

VÝROBNÉ TECHNOLOGIE
A VÝROBNÝ MANAŽMENT –
ZBORNÍK PRÍPADOVÝCH ŠTÚDIÍ

JANA ŠUGÁROVÁ, RICHARD ANTALA, JOZEF BÍLIK
IVAN BURANSKÝ, MAROŠ DUBNIČKA, ALEXANDER GULA
MICHAL HERDA, SARAH JURČOVÁ, NATÁLIA KADERÁBEKOVÁ
ERIKA KOSZTOLÁNSZKA, BARBORA LUDROVCOVÁ
JANA MESÁROŠOVÁ, LADISLAV MOROVIČ, MARTIN SAHUL
JANA SAMÁKOVÁ, PETER ŠUGÁR

VÝROBNÉ TECHNOLOGIE A VÝROBNÝ MANAŽMENT – ZBORNÍK PRÍPADOVÝCH ŠTÚDIÍ

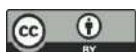
SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
2025

Výstup riešenia
grantovej úlohy KEGA 026STU-4/2023 s názvom

„Implementácia inovatívnych foriem učenia a praktického tréningu do vzdelávania v oblasti výrobných technológií a výrobného manažmentu s cieľom zvýšiť atraktivnosť štúdia a podporiť rozvoj prierezových kompetencií absolventov“

Dielo je vydané pod medzinárodnou licenciou Creative Commons CC BY 4.0, ktorá povoľuje použitie, zdieľanie, prispôsobovanie, šírenie a reprodukovanie na ľubovoľnom médiu alebo v ľubovoľnom formáte, ak je uvedený pôvodný autor, zdroj a odkaz na Creative Commons licenciu, a ak sú vyznačené prípadné zmeny vykonané v diele. Viac informácií o licencií a použití diela na adrese:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.



doc. Ing. Jana Šugárová PhD., Ing. Richard Antala, PhD., doc. Ing. Jozef Bílik PhD.
doc. Ing. Ivan Buranský, PhD., Ing. Maroš Dubnička, Ing. Alexander Gula
Ing. Michal Herda, Ing. Sarah Jurčová, Ing. Natália Kaderábeková
Ing. Erika Kosztolánszka, Ing. Barbora Ludrovcová, PhD., Ing. Jana Mesárošová, PhD.,
doc. Ing. Ladislav Morovič, PhD., Ing. Martin Sahul, PhD., doc. Ing. Jana Samáková, PhD.,
prof. Ing. Peter Šugár, CSc.

Recenzenti: prof. Dr. Ing. Miroslav Neslušan
 doc. Ing. Ľudmila Dulebová, PhD.
 Ing. Miroslav Jopek, Ph.D.

Editoval: doc. Ing. Jana Šugárová, PhD.

Schválila Vedecká rada Materiálovotechnologickej fakulty STU v Bratislave

ISBN 978-80-227-5545-0

OBSAH

PREDSLOV	11
1 OPTIMALIZÁCIA PROCESU ŤAHANIA ŠVOVÝCH RÚR MALÝCH PRIEMEROV Z AUSTENITICKÝCH OCELÍ	13
<i>Bílik, J., Herda, M.</i>	
Úvod	15
1.1 Súčasný stav výroby	15
1.2 Ciele optimalizácie	18
1.3 Postup a návrh riešenia	18
1.3.1 Optimalizácia geometrie prievlaku	18
1.3.2 Optimalizácia rýchlosti ťahania	27
1.3.3 Ďalšie možnosti zníženia trenia	29
Záver	32
Zoznam bibliografických odkazov	32
2 ZVÝŠENIE EFEKTÍVNOSTI A SLEDOVANIE KVALITY VÝROBY DRÔTOV PRE KÁBLE	35
<i>Bílik, J., Kosztolánszka, E.</i>	
Úvod	37
2.1 Súčasný stav výroby drôtov	37
2.1.1 Výroba drôtov ťahaním	37
2.1.1.1 Tepelné spracovanie drôtov	38
2.1.1.2 Stroje na ťahanie drôtov	39
2.1.2 Výroba drôtu pretlačovaním	40
2.1.2.1 Pretlačovanie za studena	40
2.1.2.1.1 Teoretický rozbor procesu výroby drôtov pretlačovaním	41
2.2 Súčasný stav výroby vo firme Vicente Torns Slovakia a. s.	42
2.3 Experimentálna analýza vlastností drôtov	45
2.3.1 Výsledky merania tvrdosti HV5	45
2.3.2 Výsledky zo skúšky jednoosovým ťahom	46
2.4 Výpočet veľkosti skutočného pretvorenia a redukcie pri výrobe drôtu pretlačovaním pri súčasnom stave výroby	51
2.5 Návrhy na optimalizáciu procesu výroby daných typorozmerov drôtov	53
2.6 Hodnotenie mikroštruktúry	55
2.7 Ďalšie návrhy riešenia na zefektívnenie výroby v podmienkach firmy Vicente Torns Slovakia a. s.	56
2.7.1 Návrh č. 1 – zmena geometrie pretlačovacej hlavy	57
2.7.2 Návrh č. 2 – úprava pôvodnej pretlačovacej hlavy zaoblením hrany vonkajšej časti nástroja	57
Záver	58
Zoznam bibliografických odkazov	59
3 KOMPLEXNÁ ANALÝZA DIAMANTU PODOBNÝCH (DLC) POVLAKOV	61
<i>Ludrovcová, B., Sahul, M..</i>	
Úvod	63
3.1 Technológia povlakovania	63
3.1.1 Základné rozdelenie metód povlakovania	65
3.1.2 PVD a CVD technológie povlakovania	70
3.1.2.1 Chemická depozícia pár – CVD povlakovanie	70
3.1.2.2 Fyzikálna depozícia pár – PVD povlakovanie	71

3.1.3	Chyby povlakov	72
3.2	Vlastnosti DLC povlakov a metódy hodnotenia ich vlastností	73
3.2.1	Metalografia	76
3.2.2	Mechanické vlastnosti – nanoindentácia	77
3.2.3	Adhézne vlastnosti – scratch test, mercedes test	78
3.2.4	Drsnosť – kontaktné a bezkontaktné metódy merania	80
3.2.5	Hrúbka povlaku – Kalo test	81
3.2.6	Odolnosť proti opotrebeniu – ball-on-disc	82
3.2.7	Štruktúra a chemické zloženie DLC povlakov	83
3.3	Analýza mechanických vlastností ta-C povlakov	85
3.3.1	Použité materiály a metódy	85
3.3.2	Výsledky	87
3.3.3	Zhrnutie	91
	Záver	92
	Zoznam bibliografických odkazov	93
4	ALTERNATÍVY ÚPRAV AKTÍVNYCH ČASTÍ TVÁRNIACICH NÁSTROJOV	99
	<i>Šugárová, J., Bílik, J., Šugár, P., Gula, A.</i>	
	Úvod	101
4.1	Materiály aktívnych častí tvárniacich nástrojov	101
4.1.1	Nástrojové ocele	103
4.1.1.1	Nástrojové uhlíkové ocele	109
4.1.1.2	Nástrojové legované ocele	109
4.1.1.3	Rýchlorezné nástrojové ocele	110
4.1.2	Spekané karbidy	110
4.1.3	Stelity	111
4.1.4	Technická keramika	111
4.2	Úpravy povrchových vrstiev aktívnych častí tvárniacich nástrojov	112
4.2.1	Opotrebenie nástrojov na tvárnenie	112
4.2.1.1	Adhézne opotrebenie	113
4.2.1.2	Abrazívne opotrebenie	114
4.2.1.3	Kontaktná únava	115
4.2.2	Možnosti povrchových úprav aktívnych častí nástrojov	115
4.2.2.1	Povrchové kalenie	115
4.2.2.2	Chemicko-tepelné spracovanie materiálov	117
4.2.2.3	Povlakovanie	119
4.2.3	Metódy hodnotenia tribologických vlastností	120
4.3	Experimentálna analýza vlastností boridovaných povrchových vrstiev – prípadová štúdia	121
4.3.1	Boridovanie	121
4.3.2	Mikroštruktúrna analýza vzoriek po boridovaní	122
4.3.3	Hodnotenie hrúbky boridickej vrstvy	124
4.3.4	Hodnotenie mikrotvrdosti boridickej vrstvy	128
4.3.5	Hodnotenie adhézneho priľnavosti	133
4.3.6	Optimálne parametre boridovania	135
	Záver	135
	Zoznam bibliografických odkazov	136
5	MIKROGEOMETRIA A ZMÄČAVOSŤ LASEROM MODIFIKOVANÉHO POVRCHU	139
	<i>Šugár, P., Antala, R., Šugárová, J.</i>	
	Úvod	141
5.1	Drsnosť povrchu a jej hodnotenie	141

5.1.1	Parametre profilovej drsnosti	141
5.1.2	Parametre plošnej drsnosti	143
5.2	Zmäčavosť povrchu a jej hodnotenie	144
5.2.1	Metódy merania kontaktného uhla	145
5.2.2	Metódy merania povrchového napätia	146
5.2.3	Metódy merania voľnej povrchovej energie	147
5.2.3.1	Zismanova teória	147
5.2.3.2	Fowkesova teória	148
5.2.3.3	Teória OWRK (Owens – Wendt – Rabel – Kaelble)	148
5.2.3.4	Acido-bázická teória	148
5.3	Laserová modifikácia povrchu	148
5.3.1	Laserové textúrovanie	149
5.3.2	Laserové štruktúrovanie povrchu	150
5.4	Hodnotenie mikrogeometrických vlastností a zmáčavosti laserom modifikovaného povrchu – prípadová štúdia	151
5.4.1	Úprava povrchu laserom	151
5.4.2	Drsnosť povrchu po laserovej úprave	153
5.4.2.1	Výsledky merania parametrov profilovej drsnosti povrchu	153
5.4.2.2	Výsledky merania parametrov plošnej drsnosti povrchu	154
5.4.3	Meranie uhla zmáčavosti povrchu metódou sediacej kvapky	156
5.4.3.1	Výsledky merania zmáčavosti	158
	Záver	159
	Zoznam bibliografických odkazov	160

6 APLIKÁCIA RÁMCA SCRUM PRI RIADENÍ AGILNÝCH PROJEKTOV 163

Samáková, J., Mesárošová, J., Kaderábková, N.

	Úvod	165
6.1	Tradičné riadenie projektov	165
6.2	Agilné riadenie projektov	167
6.3	Hybridné riadenie projektov	169
6.4	Agilné rámce využívané pri riadení projektov	170
6.4.1	SCRUM	171
6.4.2	Kanban	171
6.4.3	Scrumban	172
6.5	Agilný rámec SCRUM	172
6.5.1	SCRUM tím	172
6.5.2	SCRUM artefakty	173
6.5.3	SCRUM udalosti/SCRUM ceremónie	177
6.6	Literárny prehľad v databáze WOS	178
6.7	Praktická aplikácia SCRUM v analyzovanom podniku	180
6.7.1	Agilný tím	181
6.7.2	Riadenie projektu prostredníctvom rámca SCRUM	182
6.7.3	Softvérové nástroje využívané pri riadení agilných projektov	185
	Záver	186
	Zoznam bibliografických odkazov	188

7 OPTIMALIZÁCIA ÚROVNE AUTONÓMNEJ ÚDRŽBY V PRIEMYSELNOM PODNIKU 193

Mesárošová, J., Jurčová, S., Samáková, J.

	Úvod	195
7.1	Manažérstvo údržby.....	195
7.1.1	Požiadavky na manažérstvo údržby	196

7.1.2 Základné stratégie údržby	196
7.1.3 Totálne produktívna údržba	198
7.1.3.1 Sedem krokov autonómnej údržby	200
7.1.4 Kľúčové ukazovatele údržby	202
7.2 Analýza úrovne autonómnej údržby na vybranom stroji v priemyselnom podniku	205
7.2.1 Analýza porúch na strihacom stroji	205
7.2.2 Zhodnotenie činností autonómnej údržby na strihacom stroji	209
7.3 Optimalizácia úrovne autonómnej údržby na vybranom stroji v priemyselnom podniku	210
7.3.1 Prvý krok autonómnej údržby: Počiatočné čistenie	210
7.3.2 Druhý krok autonómnej údržby: Eliminácia zdrojov znečistenia	211
7.3.3 Tretí krok autonómnej údržby: Normy čistenia a mazania	212
7.3.4 Štvrtý krok autonómnej údržby: Všeobecná kontrola	215
7.3.5 Piaty krok autonómnej údržby: Autonómna kontrola	215
7.3.6 Šiesty krok autonómnej údržby: Organizácia a poriadok	216
7.3.7 Siedmy krok autonómnej údržby: Rozvoj autonómnej údržby	218
Záver	219
Zoznam bibliografických odkazov	220

8 KOMBINOVANIE PASÍVNEJ A AKTÍVNEJ METÓDY TRIANGULÁCIE PRI 3D DIGITALIZÁCIÍ 223

Morovič, L.

Úvod	225
8.1 Metódy zberu dát súradníc bodov	225
8.2 Hybridné prístupy v 3D digitalizácii	227
8.2.1 Kombinácia pasívnej a aktívnej triangulácie	227
8.2.2 Kombinácia laserového 3D skenovania (LiDAR) a fotogrametrie	229
8.2.3 Kombinácia laserového 3D skenovania a štruktúrovaného svetla	229
8.2.4 Kombinácia časovo-ofsetových metód a triangulácie	229
8.2.5 Multisenzorové systémy a senzorová fúzia	230
8.3 Pasívna triangulácia – fotogrametria	231
8.3.1 Bezkontaktný súradnicový merací stroj GOM TRITOP	232
8.3.2 Príklady aplikácie bezkontaktného súradnicového meracieho stroja GOM TRITOP	233
8.4 Aktívna triangulácia – meranie štruktúrovaným svetlom	234
8.4.1 3D skenery GOM ATOS	235
8.4.2 Približný výpočet vzdialenosti senzorovej jednotky 3D skenera od skenovaného povrchu	238
8.5 Prípadová štúdia kombinovania pasívnej a aktívnej metódy triangulácie pri 3D digitalizácii	239
8.5.1 Príprava objektu na 3D meranie	240
8.5.2 Fotogrametrické meranie	241
8.5.3 Meranie štruktúrovaným svetlom	242
8.5.4 Polygonizácia mraku bodov	244
8.5.5 Tvorba CAD modelov (CAD plôch) z polygómovej siete – reverzné modelovanie s využitím softvéru InnovMetric PolyWorks	247
8.5.5.1 Reverzné modelovanie vonkajšieho prvku blatníka	248
8.5.5.2 Reverzné modelovanie vnútorných prvkov blatníka	250
8.5.5.3 Reverzné modelovanie prvku pri dverách	252
8.5.5.4 Finálne digitálne spájanie prvkov blatníka	254
8.5.6 Farebné mapy odchýlok	254
8.5.7 Renderovanie blatníka	257
Záver	259
Zoznam bibliografických odkazov	260

9 APLIKÁCIA REVERZNÉHO GEOMETRICKÉHO MODELOVANIA PRI REKONŠTRUKCII SÚČIASTOK VYROBENÝCH ADITÍVNOU TECHNOLOGIOU SLA A FDM	267
<i>Buranský, I., Dubnička, M.</i>	
Úvod	269
9.1 Reverzné inžinierstvo	269
9.2 Získavanie údajov reálnych súčiastok	271
9.3 Reverzné geometrické modelovanie	273
9.4 Analýza polygonálneho modelu	276
9.5 Analýza odchýlok v procese reverzného geometrického modelovania	279
9.5.1 Porovnanie menovitého rozmeru so skutočnými rozmermi na polygonálnom modeli	279
9.5.2 Porovnanie menovitého priemeru so skutočnými priemerom vzhľadom na spôsob prichytenia	281
9.5.3 Výpočet efektívneho priemeru na základe výšky rezu a hrúbky vrstvy pre súčiastky vyrábané aditívnou technológiou	283
9.5.4 Porovnanie vplyvu hrúbky vrstvy na priemer valcovej plochy získaný rezom	288
9.5.5 Porovnanie nominálneho valca s valcom vyrobených aditívnou technológiou FDM/FF	290
9.6 Príklady pre aditívnu technológiu FDM/FFF a SLA	293
Záver	302
Zoznam bibliografických odkazov	303

PREDSLOV

Dynamicky sa meniace prostredie priemyselnej praxe kladie nové požiadavky na prípravu univerzitne vzdelaných odborníkov pripravených riešiť náročné úlohy moderných strojárskych výrobných, spojené s neustále sa skracujúcim inovačným cyklom, meniacimi sa očakávaniami trhu, nástupom komplexnej automatizácie, digitalizácie a potrieb riešenia udržateľnosti. Ukazuje sa, že tradičné spôsoby vzdelávania, preferujúce získavanie veľkého objemu poznatkov a ich reprodukciu, ktoré v súčasnosti narážajú na svoje limity, je potrebné vhodne doplniť rôznymi formami skúsenostného (heuristického) vzdelávania, vytvárajúceho priestor na rozvoj tvorivého potenciálu edukanta učením sa prostredníctvom riešenia problémových, v praxi overených úloh.

V snahe koncepcne, metodicky a obsahovo inovovať existujúce formy vzdelávania v oblasti výrobných technológií a výrobného manažmentu bol v rokoch 2023 až 2025 na Ústave výrobných technológií Materiálovotechnologickej fakulty STU v Bratislave so sídlom v Trnave riešený projekt KEGA s názvom *Implementácia inovatívnych foriem učenia a praktického tréningu do vzdelávania v oblasti výrobných technológií a výrobného manažmentu s cieľom zvýšiť atraktivnosť štúdia a podporiť rozvoj prierezových kompetencií absolventov*. Jeho primárnym cieľom bola implementácia inovatívnych, interaktívnych vzdelávacích foriem, rozširujúcich existujúce štandardné metódy vzdelávania o prvky praktického a neformálneho poznávania, s cieľom vyváženého rozvoja profesijných aj prenositeľných kompetencií absolventov.

Jedným z výstupov projektu je predkladaná publikácia, ktorá prináša 9 problémovo-orientovaných úloh z oblasti tvárnenia, povrchového inžinierstva, reverzného inžinierstva a riadenia podnikových procesov, ktoré sú výsledkom úzkej spolupráce autorov z prostredia akademického výskumu a vzdelávania s partnermi z priemyselnej praxe. Publikácia prepája výsledky vedeckého výskumu autorov s poznatkami overenými priemyselnou praxou, čím poskytuje špecifický súbor poznatkov a skúseností, napomáhajúcich rozvoju poznania a ďalšieho vzdelávania v odbore.

V kapitolách 1 a 2 publikácia prináša pohľad na riešenie vybraných problémov z oblasti optimalizácie výroby švových rúr malých priemerov vo firme Železiarne Podbrezová, a. s. a drôtov elektrických káblov v podniku Vicente Torns Slovakia a. s., Veľké Kosihy.

Príkladom rôznych technológií úpravy funkčných vlastností povrchov a problémom s tým spojených sa venujú kapitoly 3 až 5. Tretia sa zameriava na vysvetlenie postupov charakterizácie špeciálnych, diamantu podobných povlakov, štvrtá podrobne analyzuje praktické skúsenosti s povrchovými úpravami funkčných častí nástrojov používaných v procesoch plošného tvárnenia a v piatej je podrobne vysvetlený vplyv pracovného prostredia na drsnosť a povrchovú zmáčavosť laserom modifikovaného povrchu práškového biokompozitného materiálu na báze titanu.

Problematike riadenia priemyselných procesov sú venované kapitoly 6 a 7, približujúce možnosti riadenia agilných výrobných procesov v medzinárodnej spoločnosti pre informačné technológie a autonómnej údržby v podniku Peikko Slovakia spol. s r. o. Trnava.

Oblasť reverzného inžinierstva pokrývajú prípadové štúdiá v kapitolách 8 a 9. Kým ôsma rieši problém spracovania dát, konkrétne aplikáciou kombinácie pasívnej a aktívnej metódy triangulácie pri digitalizácii 3D objektov, deviata sa zameriava na otázku reverzného geometrického modelovania pri rekonštrukcii aditívne vyrobených súčiastok.

V mene všetkých autorov si dovoľujem vysloviť presvedčenie, že publikácia v tejto forme bude cenným príspevkom na zvýšenie symbiôzy teoretického a na prax orientovaného vzdelávania študentov výrobného inžinierstva a priemyselného inžinierstva na Materiálovotechnologickej fakulte STU v Trnave, prípadne na iných, technologicky orientovaných fakultách na Slovensku a v Českej republike.

Všetkým tým, ktorí stáli pri jej zrode si dovoľujem vysloviť úprimné poďakovanie. Zvlášť chcem poďakovať recenzentom, prof. Dr. Ing. Miroslavovi Neslušanovi, doc. Ing. Ľudmile Dulebovej, PhD. a Ing. Miroslavovi Jopekovi, Ph.D., ktorých cenné rady a pripomienky k obsahovej i formálnej stránke spracovania publikácie prispeli k dotvoreniu jej konečnej podoby.

Trnava, október 2025

Jana Šugárová

1 OPTIMALIZÁCIA PROCESU ŤAHANIA ŠVOVÝCH RÚR MALÝCH PRIEMEROV Z AUSTENITICKÝCH OCELÍ

BÍLIK, J. – HERDA, M.

Úvod

Švové a bezšvové rúry rôznych veľkostí a akostí majú široké uplatnenie v rôznych oblastiach priemyselnej výroby, v energetike a ďalších odvetviach. Prípadová štúdia je zameraná na zlepšenie procesu výroby tenkostenných koróziivzdorných švových rúr malých priemerov do 12 mm ťahaním cez prievlak. Samotnému ťahaniu na finálny rozmer predchádza výroba švovej zvaranej rúry kontinuálnym ohýbaním medzi valcami s nasledujúcim zvaraním. Pri finálnom ťahaní na konečný rozmer pri malých priemeroch sa využíva najmä prievlačné ťahanie, čo je aj predmetom danej prípadovej štúdie. Pri prievlačnom ťahaní ide o ťahanie cez prievlak bez vnútorného trňa. Tieto rúry majú uplatnenie najmä v potravinárskom priemysle, automobilovom a leteckom priemysle, v meracej technike, vykurovacích telesách, alebo v zdravotníctve pri výrobe ihliel do injekčných striekačiek. Tiež sú používané pre tepelné výmenníky určené na ochladzovanie výfukových plynov v automobilovom priemysle a pre palivovo-olejové tepelné výmenníky používané v leteckom priemysle.

1.1 Súčasný stav výroby

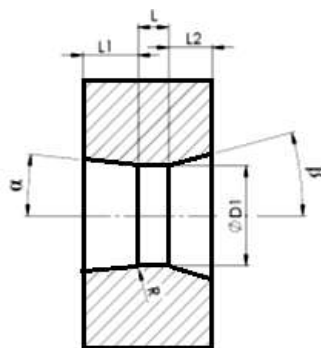
Výroba švových rúr oproti výrobe bezšvových rúr si vyžaduje nižšie vstupné investície a nižšie výrobné náklady, a preto sú švové rúry lacnejšie ako bezšvové, majú však určité obmedzenia z hľadiska ich aplikácie.

V spoločnosti PRECISION TUBES EUROPE spol. s r. o., Komárno sa rúry ťahajú na ťažných stolicích s navíjaním vytiahnutej rúry do tvaru zvitku. Rúry sa ťahajú prievlačným ťahaním pri maximálnej rýchlosti ťahania 6 m.min^{-1} , alebo v niektorých prípadoch s plávajúcim trňom s maximálnou rýchlosťou ťahania 3 m.min^{-1} . Zvárané tenkostenné koróziivzdorné rúry sú vyrábané s vonkajším priemerom od 0,2 mm až do 12 mm a hrúbkou steny od 0,05 do 1 mm. Štandardná tolerancia podľa technických noriem je na obidva rozmery $\pm 0,05 \text{ mm}$. V Tabuľke 1.1 sú uvedené materiály používané pri výrobe koróziivzdorných rúr.

Tabuľka 1.1. Materiály používané pri výrobe rúr z koróziivzdornej ocele

Číslo materiálu	Označenie	Číslo materiálu	Označenie
1.4301	X5CrNi18-10	1.4435	X2CrNiMo18-14-3
1.4303	X4CrNi18-12	1.4439	X2CrNiMo17-13-5
1.4306	X2CrNi19-11	1.4539	X1NiCrMoCu25-20-5
1.4307	X2CrNi18-9	1.4541	X6CrNiTi18-10
1.4310	X10CrNi18-8	1.4550	X6CrNiNb18-10
1.4318	X2CrNi18-7	1.4561	X1CrNiMoTi18-13-2
1.4401	X5CrNiMo17-12-2	1.4565	X2CrNiMnMoNbN25-18-5-4
1.4404	X2CrNiMo17-12-2	1.4571	X6CrNiMoTi17-12-2

Prípadová štúdia je zameraná na optimalizáciu procesu výroby švovej rúry z koróziivzdornej ocele s vonkajším priemerom 6 mm. Súčasná geometria prievlaku je znázornená na Obr. 1.1 a hodnoty jednotlivých rozmerov sú uvedené v Tabuľke 1.2.



Obr. 1.1. Geometria prievlaku

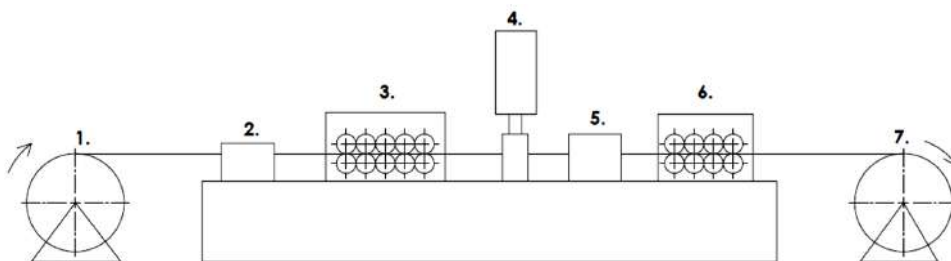
α – uhol vstupnej časti, $\phi D1$ – priemer kalibračného valca, L – dĺžka kalibračného valca,
 R – prechodový polomer, $L1$ – dĺžka vstupnej časti, $L2$ – dĺžka výstupového kužela,
 β – uhol výstupového kužela

Tabuľka 1.2. Hodnoty jednotlivých rozmerov prievlaku

Parameter	α (°)	$\phi D1$ (mm)	L (mm)	R (mm)	$L1$ (mm)	$L2$ (mm)	β (°)
Hodnota	6	5,94	0,9	0,1	3,3	2,6	15

Ďalšími vstupným veličinami sú materiál prievlaku, použité mazivo a súčasná používaná rýchlosť ťahania v_f . Materiál, z ktorého je prievlak vyrobený, je polykryštalický diamant (PCD). Ako mazivo sa používa vysokoviskózný olej, ktorého prevádzková teplota je 60 °C a počas procesu tvárnenia v prievlaku sa ďalej zohrieva. Merná hmotnosť maziva pri teplote 25 °C je 1240 kg.m⁻³. Rýchlosť ťahania je 5 m.min⁻¹.

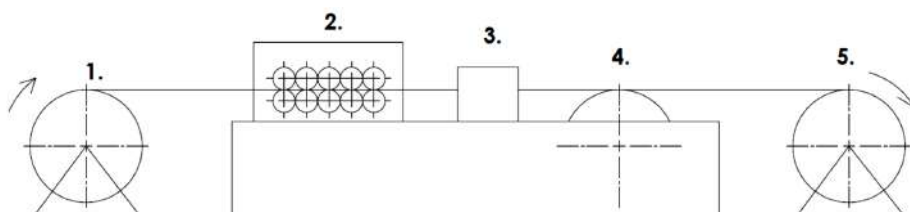
Na Obr. 1.2 je schéma pracoviska na výrobu švovej zvaranej rúry kontinuálnym ohýbaním medzi valcami s nasledujúcim zváraním. Vstupným polotovarom je pás plechu s požadovanou šírkou vo forme zvitku, ktorý sa nasadí na odvíjací bubon. Pred zavedením pásu medzi zakružovacie valce sa pás mechanicky čistí pomocou papiera namočeného v etanole. Pás plechu sa takto odmastí a zachytia sa nežiadúce nečistoty. V ďalšom kroku pás plechu prechádza cez zakružovacie kladky (valce), kde sa postupne zakružuje do tvaru rúry a postupuje ďalej do zvaracej komory. Po zvarení zvarená rúra postupuje do kontrolnej komory, kde sa kontroluje zvar, ďalej cez ďalšie zakružovacie kladky, kde sa kalibruje tvar rúry a navíja sa na bubon. (Schrek, 2005)



Obr. 1.2. Schéma výrobného systému na výrobu švovej rúry (Schrek, 2005)

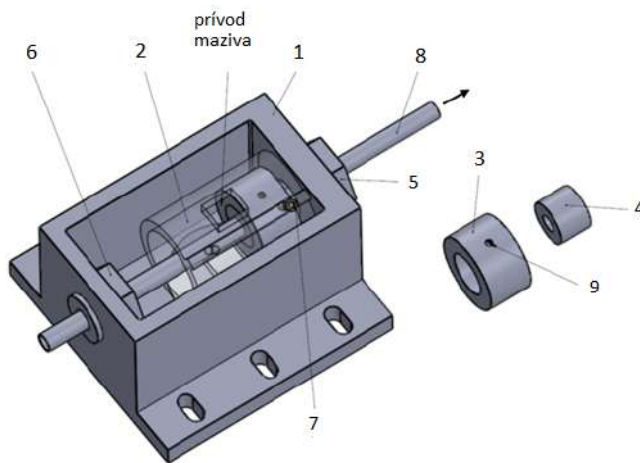
1 – odvíjací bubon, 2 – mechanické čistenie, 3 – zakružovacie kladky (valce), 4 – zvaracie zariadenie so zvaracou komorou, 5 – kontrola zvaru, 6 – zakružovacie kladky, 7 – navíjací bubon

Takto navinutá rúra vo forme zvitku ide v prípade potreby (t. j. v prípade, keď ešte nasleduje ďalšie ťahanie) na žihacie pracovisko. Navinutá rúra sa odvíja do žihacej pece, kde sa vyžiha pri teplote 950 až 1080 °C počas 1 h a znovu sa navíja na ďalší bubon. Navinutá rúra potom postupuje na ďalšie ťahacie pracovisko. Zvitok s navinutou rúrou sa pripevní na odvíjačku a rúra sa postupne zavedie cez zavádzacie kladky k prievlaku, kde je privádzaný mazací olej a rúra sa ťahá cez prevíjací bubon, ktorý udáva rýchlosť ťahania, až sa znovu navíja na navíjací bubon. Schematické rozloženie jednotlivých častí ťahacieho pracoviska je na Obr. 1.3. (Schrek, 2005)



Obr. 1.3. Schéma výrobného systému na výrobu presných švových rúr prievlačným ťahaním (Schrek, 2005)
1 – odvíjací bubon, 2 – zavádzacie kladky, 3 – prievlak, 4 – prevíjací bubon, 5 – navíjací bubon

Na Obr. 1.4 je znázornená zostava, ktorá sa v súčasnosti používa na ťahanie rúr. Zostava je upevnená na ťažnej stolici pomocou držiaka zostavy. Smer ťahania znázorňuje šípka. Mazivo sa privádza zhora cez otvor v držiaku púzdra na rúru pred prievlak a po rúre je dopravené do miesta tvárnenia (ťažného kužľa v prievlaku). Nadbytočné mazivo preteká cez spodný otvor držiaku pre prievlak a otvor v držiaku zostavy do nádoby.



Obr. 1.4. Zostava používaná na ťahanie rúry
1 – držiak zostavy, 2 – držiak púzdra pre prievlak, 3 – puzdro pre prievlak, 4 – prievlak, 5 – matica, 6 – matica s vodiacou vložkou, 7 – poistná skrutka, 8 – ťahaná rúra, 9 – poistná skrutka

1.2 Ciele optimalizácie

Cieľom riešenia bola optimalizácia priebehu procesu ťahania s možnosťou zvýšenia rýchlosti ťahania za účelom zvýšenia produktivity výroby pre konkrétny typorozmer rúry. V Tabuľke 1.3 sú uvedené rozmery a požiadavky kladené na daný typorozmer rúry.

Tabuľka 1.3. Rozmery a požiadavky kladené na daný typorozmer rúry

Materiál ťahanej rúry	AISI 304 (1.4301, X5CrNi18-10)
Vonkajší priemer vstupnej rúry ϕD_0 (mm)	6,45 až 6,65
Hrúbka steny vstupnej rúry t_0 (mm)	1
Požadovaný vonkajší priemer rúry po ťahaní ϕD (mm)	$6^{-0,05}$
Požadovaná hrúbka steny rúry po ťahaní t (mm)	$1^{+0,05}$

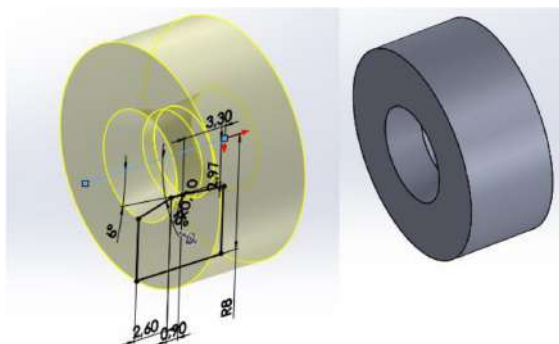
1.3 Postup a návrh riešenia

Viaceri autori sa vo svojich štúdiách vo väčšine prípadov zhodujú, že najväčší vplyv na proces ťahania má samotné trenie medzi rúrou a prievlakom, a tiež medzi rúrou a tŕňom ak ide o ťahanie na tŕni, čo úzko súvisí s geometriou prievlaku. (Palengat, 2013)

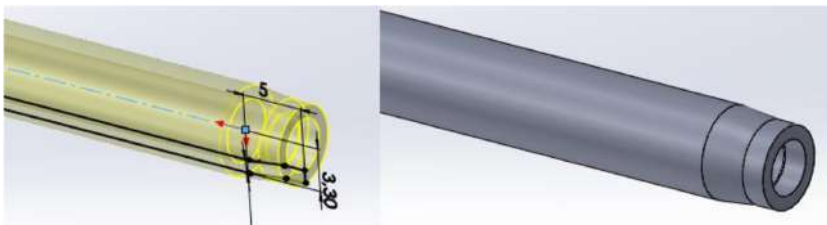
1.3.1 Optimalizácia geometrie prievlaku

Vhodná geometria prievlakov umožní znížiť ťahové napätia v materiály ťahanej rúry za prievlakom, a tým aj znížiť ťažnú silu. Znížením ťažnej sily dôjde k zníženiu odporu voči ťahaniu, a tým vznikne možnosť zvýšenia ťažnej rýchlosti. Rôzne štúdie o vplyve geometrie na technologické parametre experimentálne potvrdili, že úpravou uhla vstupnej kužeľovej časti prievlaku α možno významne znížiť napätia, vznikajúce v materiály počas ťahania. (Neves, 2005; Bella, 2016)

Z vyššie uvedeného dôvodu sa na zlepšenie procesu ťahania rúr išlo cestou úpravy, a teda optimalizácie geometrie prievlakov na zníženie pôsobiaceho trenia medzi prievlakom a ťahanou rúrou. Pri optimalizácii geometrie uhla vstupného kužeľa bola využitá simulácia procesu ťahania v simulačnom softvéri DEFORM. 3D model použitý pre proces simulácie bol vytvorený v programe Solidworks a bol importovaný do simulačného softvéru. 3D model prievlaku je uvedený na Obr. 1.5 a 3D model rúry na simuláciu je na Obr. 1.6.



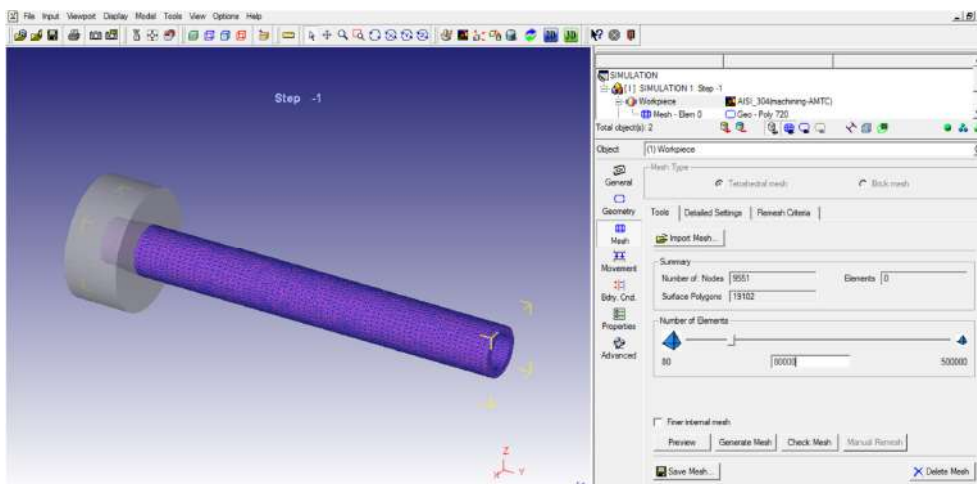
Obr. 1.5. Vytvorený 3D model prievlaku (Herda, 2015)



Obr. 1.6. Vytvorený 3D model rúry s predtvárneným tvarom (hrotom) na presunutie cez prievlak (Herda, 2015)

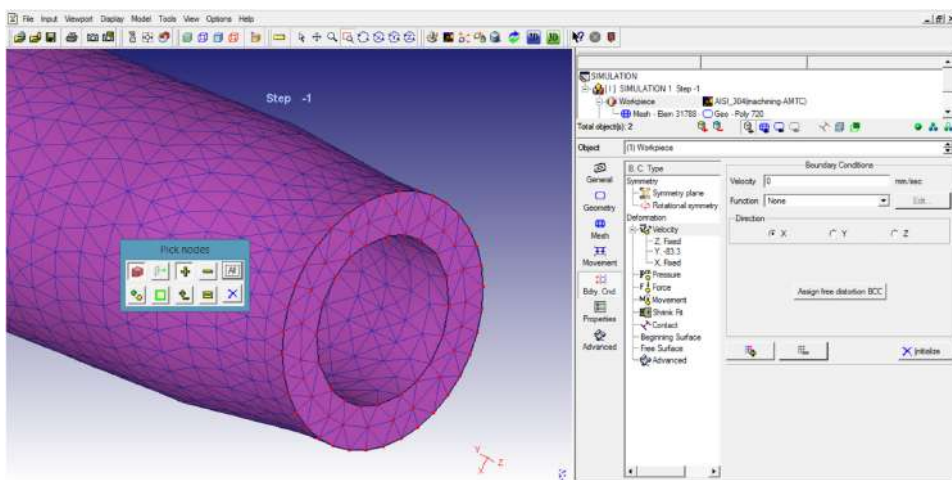
Na správne vytvorenie kontaktu medzi prievlakom a rúrou je potrebné upraviť začiatok rúry. Upravená rúra musí obsahovať tvarovo rovnakú plochu ako je tvar prievlaku v mieste prvého kontaktu s rúrou. To znamená, že je potrebné upraviť tvar geometrie rúry do tzv. predtvárneného tvaru (vytvorenie hrotu).

Pri importe geometrie analyzovaných modelov sa importoval osobitne model rúry a potom sa importoval model prievlaku. Nasledovalo zadanie generálnych informácií, a to materiálu rúry a typu objektu modelu. V tomto prípade sa pre rúru zvolil elasto-plastický typ, pre prievlak sa zvolil typ rigid (pevný) a zvolil sa materiál rúry z databázy softvéru, a to AISI 304. Nasledovalo vytvorenie siete prvkov (Mesh) pre rúru a to v tomto prípade konkrétne štvorsten (tetrahedron) s množstvo použitých prvkov 80 000 (Obr. 1.7).



Obr. 1.7. Vytvorenie siete prvkov pre rúru (Herda, 2015)

Nasledovalo zadefinovanie okrajových podmienok (Obr. 1.8) a to zafixovanie čelnej plochy rúry v osi X a Z a teda zadanie nulovej rýchlosti v týchto smeroch. Ďalej bolo potrebné zadefinovanie ťažnej rýchlosti v osi Y. Pri analýze vplyvu geometrie prievlaku (uhla vstupného kužeľa) na veľkosť ťahového napätia v ťahanej rúre za prievlakom bola zadefinovaná pre danú rúru rýchlosť ťahania $5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, ktorá bola štandardne používaná.



Obr. 1.8. Zadefinovanie okrajových podmienok (Herda, 2015)

Ďalším krokom bolo vytvorenie kontaktu medzi rúrou a prievlakom. V tomto kroku zohráva veľmi dôležitú úlohu predpripravený model rúry s predtvarovanou časťou (hrotom). Ak je model rúry správne pripravený, softvér dokáže sám vytvoriť kontakt medzi modelom rúry a modelom prievlaku. V tomto kroku bolo potrebné zadať aj súčiniteľ trenia, ktorý bol zadaný s hodnotou $f = 0,35$.

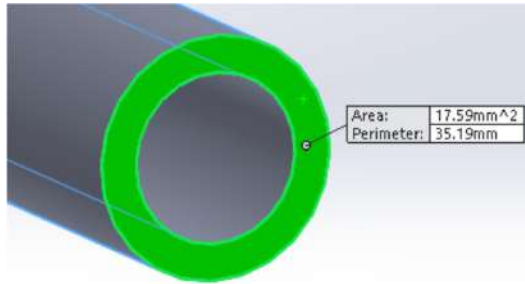
Počet krokov analýzy bol zadaný 50 a časový prírastok jedného kroku bol 0,01 s. Pred spustením samotnej simulácie sa realizovalo vytvorenie databázy analýzy, ktorá slúžila pre softvér na čítanie a čerpanie potrebných informácií pri vykonávaní analýzy. V tomto prípade po spustení a prebehnutí simulácie výsledkom analýzy boli hlavne farebné mapy a hodnoty vzniknutých napätí v osi ťahania σ_p . Aby pri ťahaní za prievlakom nedochádzalo k nežiadúcej deformácii prierezu rúry a tým k zmene rozmerov rúry musí byť toto napätie menšie ako je medza sklzu po deformačnom spevnení, ktoré nastane v dôsledku ťahania a ktoré je úmerné veľkosti pretvorenia v danom ťahu.

Na správne vyhodnotenie počítačových analýz a pre ďalší možný postup bolo preto potrebné poznať maximálne dovolené ťahové napätie σ_{dov} v rúre tak, aby nedošlo k jej deformácii, resp. k porušeniu za prievlakom. Na určenie týchto napätí slúži napät'ovo deformačný diagram. Z hľadiska použitia tohto diagramu na určenie dovoleného ťahového napätia v ťahanej rúre bolo potrebné vypočítať skutočné (logaritmické) pretvorenie pri ťahaní a to podľa vzťahu:

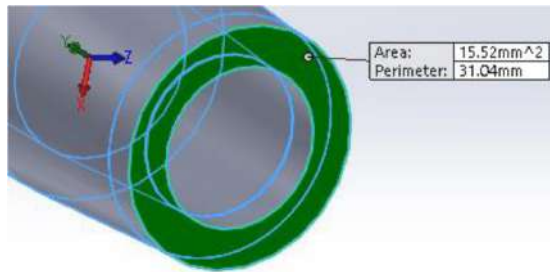
$$\varphi = \ln \frac{S_0}{S} \quad (1.1)$$

kde φ je logaritmické pretvorenie (-),
 S_0 – prierez vstupnej rúry pred ťahaním (mm^2),
 S – prierez rúry po ťahaní (mm^2).

Prierez vstupnej rúry pred ťahaním S_0 a prierez rúry po ťahaní S bol určený pomocou softvéru Solidworks na základe 3D modelu vstupnej rúry a 3D modelu rúry po ťahaní (Obr. 1.9 a Obr. 1.10).



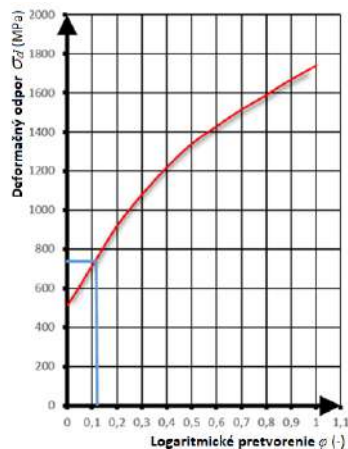
Obr. 1.9. Prierez vstupnej rúry pred ťahaním S_0 (Herda, 2015)



Obr. 1.10. Prierez rúry po ťahaní S (Herda, 2015)

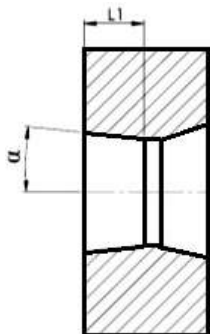
Prierez vstupnej rúry pred ťahaním je $17,59 \text{ mm}^2$ a prierez rúry po ťahaní je $15,52 \text{ mm}^2$. Skutočné pretvorenie pri ťahaní danej rúry, podľa vzťahu (1.1) je: $\varphi = \ln \frac{S_0}{S} = \ln \frac{17,59}{15,52} = 0,125$.

Krivka deformačného odporu zo skúšky tlakom pre oceľ AISI 304 je znázornená na Obr. 1.11, z ktorého na základe vypočítaného logaritmického pretvorenia φ bolo stanovené najväčšie možné napätie (deformačný odpor σ_d) pri ťahaní rúry tak, aby nedošlo k jej deformácii za prievlakom.



Obr. 1.11. Krivka deformačného odporu (stanovenie najväčšieho možného (dovoleného) napätia)

Z diagramu na Obr. 1.11 vyplýva, že najväčšie dovolené napätie v ťahanej rúre za prievlakom je $\sigma_{dov} = 735$ MPa. Ďalšia úprava geometrie prievlaku spočívala v prvom rade v zmene uhla zavádzacej časti α . Z tejto úpravy vyplýva aj zmena dĺžky zavádzacej časti prievlaku $L1$. Upravované časti sú znázornené na Obr. 1.12. Rozmery prievlaku, ktoré sa menili v rámci optimalizácie geometrie prievlaku sú uvedené v Tabuľke 1.4.



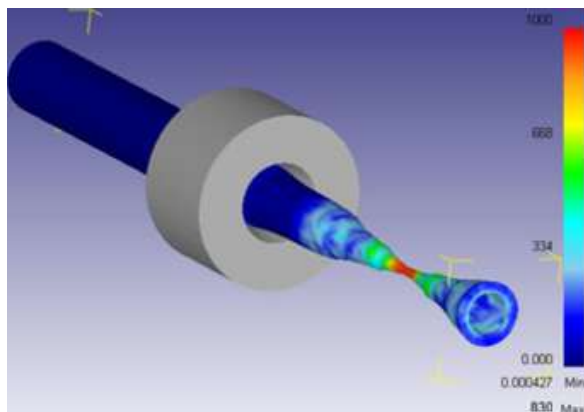
Obr. 1.12. Upravované časti prievlaku
 α – uhol zavádzacej časti, $L1$ – dĺžka zavádzacej časti

Tabuľka 1.4. Rozmery prievlaku menené v rámci optimalizácie geometrie pomocou simulácie

α (°)	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$L1$ mm)	7,9	6,6	5,9	5,1	4,5	4	3,6	3,3	3,1	2,9	2,7

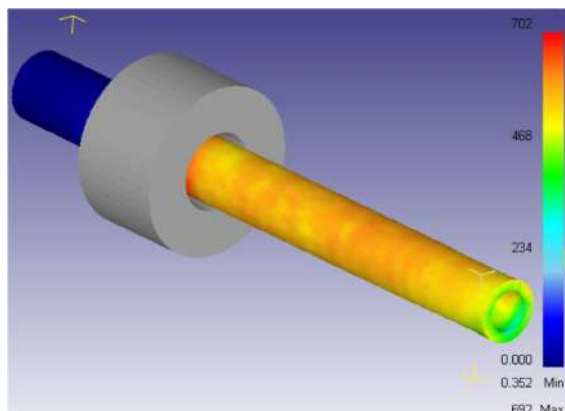
Z analýzy pri použití uhla zavádzacej časti 5° vyplynulo, že maximálne ťahové napätie $\sigma_{i\max}$ dosahovalo hodnotu 850 MPa, čo by znamenalo prekročenie dovolenej hodnoty napätia 735 MPa a rúra by sa pri použití takého uhla deformovala za prievlakom, prípadne by sa roztrhla.

Z analýzy pri použití uhla zavádzacej časti 6° taktiež vyplynulo, že rúra by sa pri použití takého uhla deformovala za prievlakom, prípadne by sa roztrhla, nakoľko maximálne ťahové napätie dosahovalo hodnotu 830 MPa. Výsledok analýzy pre uhol vstupného kužela prievlaku 6° je uvedený na Obr. 1.13.



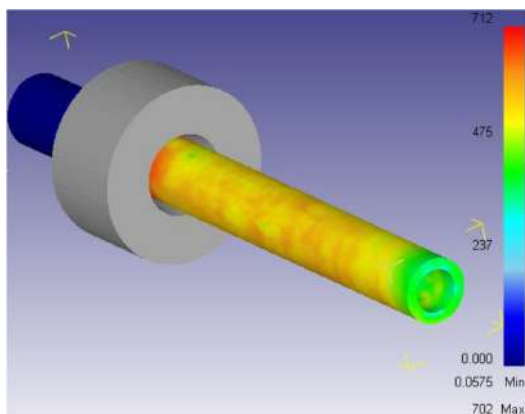
Obr. 1.13. Výsledky analýzy pri použití uhla zavádzacej časti 6° (Herda, 2015)

Pri použití uhla zavádzacej časti 7° už maximálne ťahové napätie σ_{imax} v rúre za prievlakom dosahovalo hodnotu 692 MPa, ktoré je menšie ako dovolené, a preto nedôjde k deformácii rúry za prievlakom. Výsledok analýzy pre uhol vstupného kužela prievlaku 7° je uvedený na Obr. 1.14.



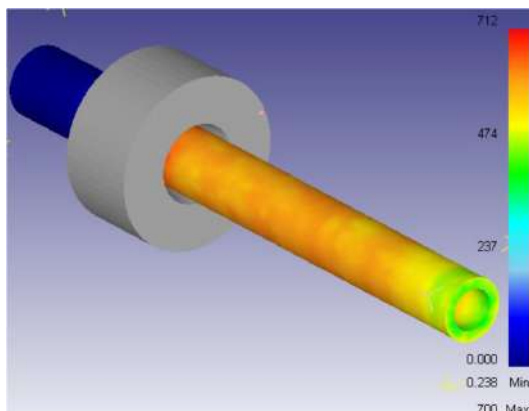
Obr. 1.14. Výsledok analýzy pri použití uhla uhla zavádzacej časti 7° (Herda, 2015)

Pri použití uhla zavádzacej časti 8° dosahovalo maximálne ťahové napätie σ_{imax} hodnotu 702 MPa, teda nižšiu hodnotu ako dovolené napätie. Výsledok analýzy pre uhol vstupného kužela prievlaku 8° je uvedený na Obr. 1.15.



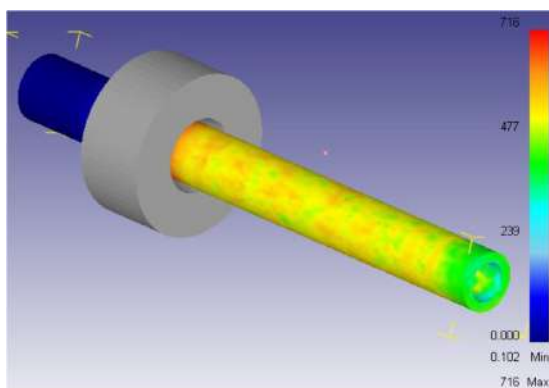
Obr. 1.15. Výsledok analýzy pri použití uhla uhla zavádzacej časti 8° (Herda, 2015)

Pri použití uhla zavádzacej časti 9° dosahovalo maximálne ťahové napätie σ_{imax} hodnotu 700 MPa, teda nižšiu hodnotu ako dovolené napätie. Výsledok analýzy pre uhol vstupného kužela prievlaku 9° je uvedený na Obr. 1.16.



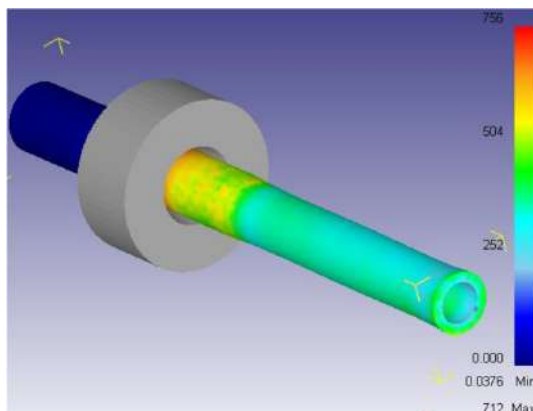
Obr. 1.16. Výsledok analýzy pri použití uhla zavádzacej časti 9° (Herda, 2015)

Pri použití uhla zavádzacej časti 10° dosahovalo maximálne ťahové napätie $\sigma_{i\max}$ hodnotu 716 MPa, teda nižšiu hodnotu ako dovolené napätie. Výsledok analýzy pre uhol vstupného kužela prievlaku 10° je uvedený na Obr. 1.17.



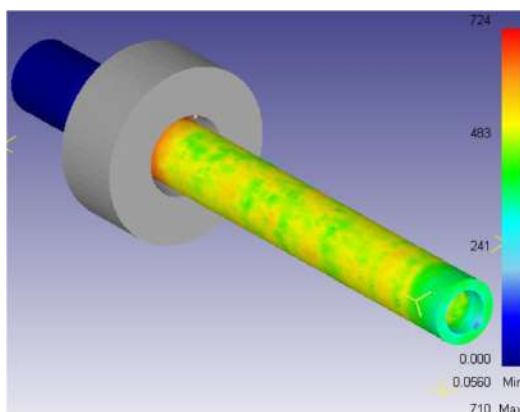
Obr. 1.17. Výsledok analýzy pri použití uhla zavádzacej časti 10° (Herda, 2015)

Pri použití uhla zavádzacej časti 11° dosahovalo maximálne ťahové napätie $\sigma_{i\max}$ hodnotu 712 MPa, teda nižšiu hodnotu ako dovolené napätie. Výsledok analýzy pre uhol vstupného kužela prievlaku 11° je uvedený na Obr. 1.18.



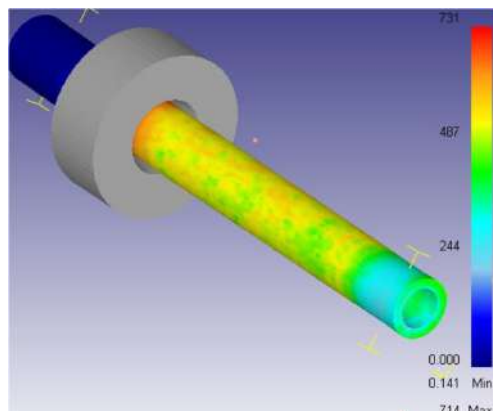
Obr. 1.18. Výsledok analýzy pri použití uhla zavádzacej časti 11° (Herda, 2015)

Pri použití uhla zavádzacej časti 12° dosahovalo maximálne ťahové napätie $\sigma_{i\max}$ hodnotu 710 MPa, teda nižšiu hodnotu ako dovolené napätie. Výsledok analýzy pre uhol vstupného kužela prievlaku 12° je uvedený na Obr. 1.19.



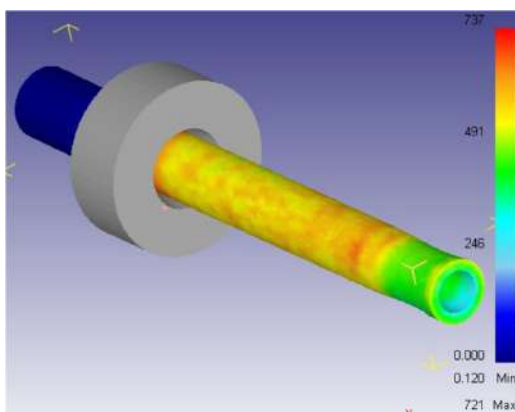
Obr. 1.19. Výsledok analýzy pri použití uhla zavádzacej časti 12° (Herda, 2015)

Pri použití uhla zavádzacej časti 13° dosahovalo maximálne ťahové napätie $\sigma_{i\max}$ hodnotu 714 MPa, teda nižšiu hodnotu ako dovolené napätie. Výsledok analýzy pre uhol vstupného kužela prievlaku 13° je uvedený na Obr. 1.20.



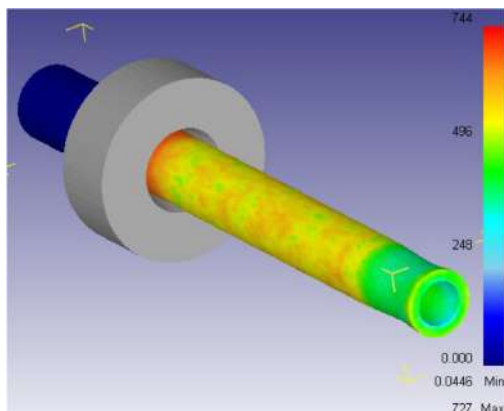
Obr. 1.20. Výsledok analýzy pri použití uhla zavádzacej časti 13° (Herda, 2015)

Pri použití uhla zavádzacej časti 14° dosahovalo maximálne ťahové napätie $\sigma_{i\max}$ hodnotu 721 MPa, teda o niečo nižšiu hodnotu ako dovolené napätie. Výsledok analýzy pre uhol vstupného kužeľa prievlaku 14° je uvedený na Obr. 1.21.



Obr. 1.21. Výsledok analýzy pri použití uhla zavádzacej časti 14° (Herda, 2015)

Pri použití uhla zavádzacej časti 15° dosahovalo maximálne ťahové napätie $\sigma_{i\max}$ hodnotu 727 MPa, ktorá je už blízko k dovolenej hodnote 735 MPa. Výsledok analýzy pre uhol vstupného kužeľa prievlaku 15° je uvedený na Obr. 1.22.



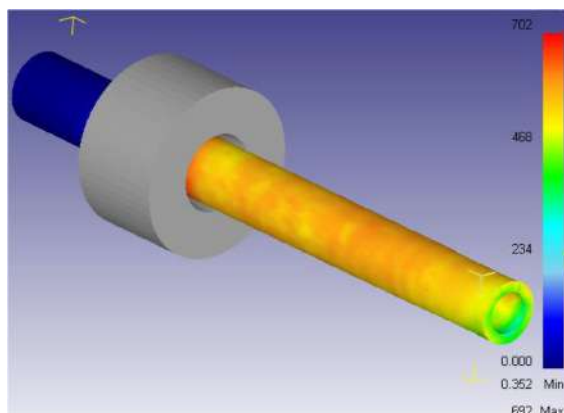
Obr. 1.22. Výsledok analýzy pri použití uhla zavádzacej časti 15° (Herda, 2015)

1.3.2 Optimalizácia rýchlosti ťahania

Na základe výsledkov simulácie ako najvýhodnejší uhol v zavádzacej časti vyšiel uhol 7°, kde boli zistené najmenšie maximálne hodnoty ťahového napätia za prievlakom s hodnotou 692 MPa v smere ťahania, preto sa tento uhol použil aj v ďalšej optimalizácii rýchlosti ťahania.

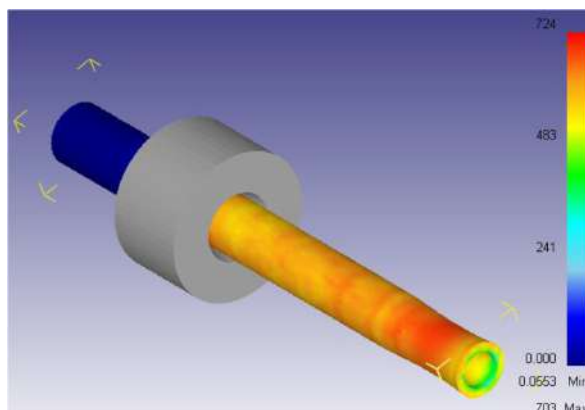
Predpokladalo sa, že zvyšovaním rýchlosti ťahania pri nezmenenom spôsobe mazania sa bude zvyšovať deformačný odpor materiálu a teda aj maximálne ťahové napätie v ťahanej rúre za prievlakom. Preto sa pomocou analýzy použitím softvéru Deform 3D zisťovalo akou najväčšou rýchlosťou je možno ťahať rúru cez tento prievlak tak, aby maximálne ťahové napätie neprekročilo dovoľenú hodnotu $\sigma_{dov} = 735$ MPa.

Pri analýze boli použité ťažné rýchlosti v_f 5, 6, 7, 8 a 9 m.min⁻¹. Pri použití rýchlosti ťahania 5 m.min⁻¹ dosiahlo maximálne ťahové napätie v osi ťahania σ_{imax} hodnotu 692 MPa. Výsledky analýzy sú uvedené na Obr. 1.23.



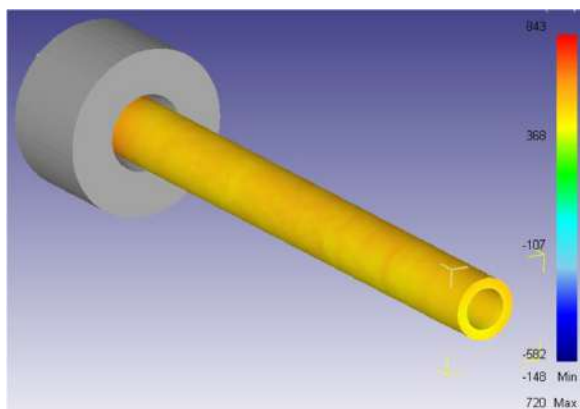
Obr. 1.23. Výsledky analýzy pri použití ťažnej rýchlosti 5 m.min⁻¹ (Herda, 2015)

Pri použití rýchlosti ťahania 6 m.min^{-1} dosiahlo maximálne ťahové napätie v osi ťahania σ_{imax} hodnotu 703 MPa. Výsledky analýzy sú uvedené na Obr. 1.24.



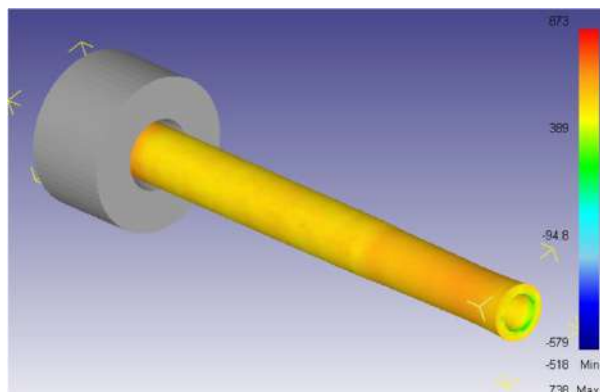
Obr. 1.24. Výsledky analýzy pri použití ťažnej rýchlosti 6 m.min^{-1} (Herda, 2015)

Pri použití rýchlosti ťahania 7 m.min^{-1} má vzniknuté maximálne ťahové napätie za prievlakom v osi ťahania hodnotu 720 MPa. Výsledky analýzy sú uvedené na Obr. 1.25.



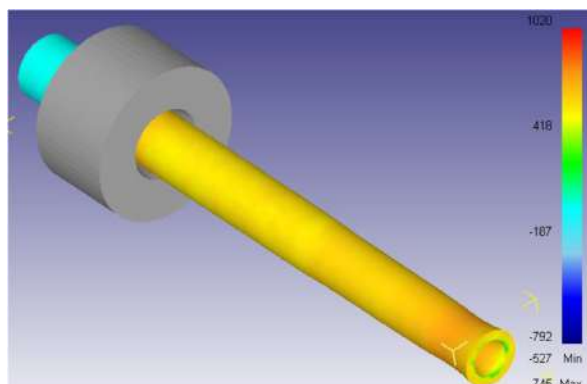
Obr. 1.25. Výsledky analýzy pri použití ťažnej rýchlosti 7 m.min^{-1} (Herda, 2015)

Pri použití rýchlosti ťahania 8 m.min^{-1} má vzniknuté maximálne ťahové napätie v osi ťahania hodnotu 738 MPa a došlo k miernemu prekročeniu dovoleného napätia, ktoré je 735 MPa, čo môže viesť k plastickej deformácii ťahanej rúry za prievlakom a teda k nežiaducej zmene rozmeru ťahanej rúry. Výsledky analýzy sú uvedené na Obr. 1.26.



Obr. 1.26. Výsledky analýzy pri použití ťažnej rýchlosti 8 m.min⁻¹ (Herda, 2015)

Napriek tomuto negatívnemu výsledku bola realizovaná aj simulácia pri použití rýchlosti ťahania 9 m.min⁻¹ aby sa potvrdil trend ďalšieho zvýšenia maximálnej ťažnej sily v ťahanej rúre za prievlakom. Pri použití tejto rýchlosti ťahania má vzniknuté maximálne ťahové napätie v osi ťahania hodnotu 745 MPa, čím sa potvrdil trend nárastu ťahového napätia. Výsledky analýzy sú uvedené na Obr. 1.27.



Obr. 1.27. Výsledky analýzy pri použití ťažnej rýchlosti 9 m.min⁻¹ (Herda, 2015)

Z dôvodu, aby nedochádzalo pri ťahaní k nežiaducej plastickej deformácii rúry za prievlakom musí platiť $\sigma_{imax} < \sigma_{dov}$, a tak z analýz vyplýva, že najvyššou ťažnou rýchlosťou v_t pri prievlaku s uhlom zavádzacej časti α 7° môže byť rýchlosť 7 m.min⁻¹. Toto zvýšenie rýchlosti ťahania zo 5 na 7 m.min⁻¹ umožnilo zvýšenie produktivity pri výrobe daného typorozmeru rúry o 16,7 %.

1.3.3 Ďalšie možnosti zníženia trenia

Pre možnosť prípadného ďalšieho zvýšenia rýchlosti ťahania bola analyzovaná a riešená aj možnosť zníženia koeficientu trenia medzi prievlakom a ťahanou rúrou na zníženie veľkosti ťahových napätí. To by mohlo umožniť ďalšie zvýšenie rýchlosti ťahania, a tým zvýšenie produktivity práce.

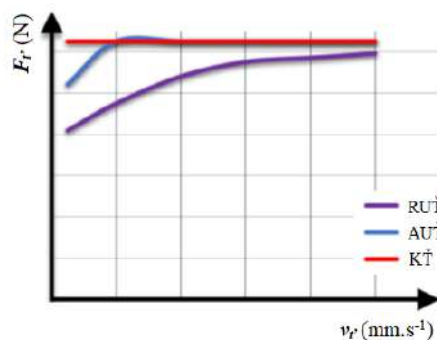
Pri klasických metódach tvárnenia sa na zníženie pôsobenia medzi tvárniacim nástrojom a tvárneným materiálom využíva použitie vhodného maziva. Ďalšou možnosťou na zníženie trenia je aj aplikácia ultrazvukovej energie. Ide o zníženie trenia na princípe skrátenia času kontaktu medzi trúcimi sa plochami. (Maropis, 2010)

The diagram illustrates a mechanical assembly with a central shaft and a sleeve. The sleeve is labeled 'prievlak' (overlap) and the shaft is labeled 'rúra' (pipe). The shaft is shown with a central section that is wider than the ends, indicating a change in diameter. The sleeve is shown with a central section that is narrower than the ends, indicating a change in inner diameter. The sleeve is positioned over the shaft, and the overlap is shown on both sides. The diagram also shows the direction of axial vibration ('smer ťahania') and radial vibration ('radiálne vibrácie').

Na grafe na Obr. 1.29 je znázornená charakteristická závislosť medzi rýchlosťou ťahania v_t a ťažnou silou F_t pre ťahanie klasickým spôsobom bez ultrazvukových vibrácií (červená krivka), pre ťahanie s ultrazvukovými vibráciami v axiálnom smere (modrá krivka) a pre ťahanie s ultrazvukovými vibráciami v radiálnom smere (fialová krivka).

30

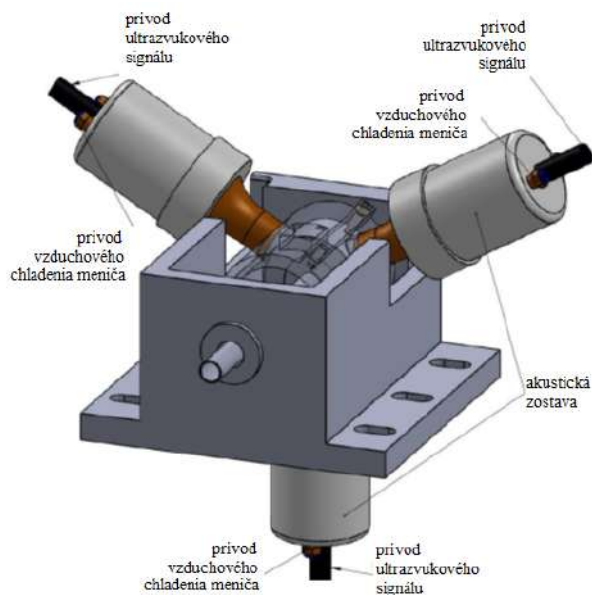
a v konečnom dôsledku na zvýšenie rýchlosti ťahania. Vibrácie vytvárajú opakujúci sa cyklus zvyšovania a znižovania tlaku na rozhraní prievlaku a rúry čo okrem zníženia ťažnej sily vedie aj k zvýšeniu kvality povrchu ťahanej rúry. (Hayashi, 2003; Maropis, 2010)



Obr. 1.29. Charakteristická závislosť medzi rýchlosťou ťahania v_t a ťažnou silou F_t (Hayashi, 2003)

*AUĤ – ťahanie s ultrazvukovými vibráciami v axiálnom smere,
RUĤ – ťahanie s ultrazvukovými vibráciami v radiálnom smere,
KĤ – klasické ťahanie bez ultrazvukových vibrácií*

Na základe uvedených poznatkov bola na ťahanie daného typorozmeru rúry navrhnutá aj zostava na ťahanie s využitím ultrazvukových vibrácií v radiálnom smere. Celková zostava bez generátora a rozdeľovača signálu, ktoré možno umiestniť kdekoľvek vedľa ťažnej stolice, je zobrazená na Obr. 1.30 . Na ďalšie zvýšenie rýchlosti ťahania sa javí zníženie koeficientu trenia pomocou ultrazvuku ako vhodné riešenie, ktoré si však vyžaduje vyššie investičné náklady.



Obr. 1.30. Celková zostava pre ultrazvukom podporované ťahanie rúr (Herda, 2015)

Z realizovaných analýz možno konštatovať, že prievlak so vstupným uhlom kužeľa od 7° do 9° je lepšou alternatívou a ponúka možnosť zvýšenia rýchlosti ťahania. Ako optimálny uhol ťažného kužeľa pri ťahaní daného typorozmeru rúry bol na základe optimalizácie zistený uhol 7°, ktorý bol použitý aj na optimalizáciu rýchlosti ťahania. Z ďalšej optimalizácie rýchlosti ťahania vyplynulo, že najvyššou ťažnou rýchlosťou pri prievlaku s uhlom zavádzacej časti 7° môže byť 7 m.min⁻¹. Preto bolo možno zvýšiť rýchlosť ťahania z pôvodnej rýchlosti 5 na 7 m.min⁻¹.

Záver

Cieľom prípadovej štúdie bolo poukázať na riešenie úlohy zameranej na optimalizáciu priebehu procesu ťahania a možnosť zvýšenia rýchlosti ťahania s cieľom zvýšiť produktivitu výroby pre konkrétny typorozmer rúry v prevádzkových podmienkach s využitím počítačovej podpory. Riešenie spočívalo v optimalizácii uhla ťažného kužeľa na zníženie ťažnej sily a teda ťahového napätia v ťahanej rúre za prievlakom s cieľom zvýšiť rýchlosť ťahania.

Na základe simulácie pomocou simulačného softvéru Deform 3D ako optimálny uhol ťažného kužeľa α bol zistený uhol 7°, ktorý bol potom použitý na optimalizáciu rýchlosti ťahania. Na základe analýzy sa zistilo, že pri ťahaní daného typorozmeru rúry možno zvýšiť rýchlosť ťahania z pôvodne používanej rýchlosti 6 m.min⁻¹ na 7 m.min⁻¹ bez toho aby došlo k prekročeniu dovoleného ťahového napätia v ťahanej rúre za prievlakom, a teda k vzniku nežiaducej plastickej deformácie a k negatívnemu ovplyvneniu presnosti vytiahnutej rúry. Toto zvýšenie rýchlosti ťahania pri zavedení do prevádzky prinieslo zvýšenie produktivity o 16,7 %.

Ako ďalšia možnosť zvýšenia rýchlosti ťahania na základe zníženia ťažnej sily, a teda zníženia ťahového napätia v ťahanej rúre za prievlakom bola sledovaná možnosť zníženia trenia na základe aplikácie ultrazvuku v procese ťahania. Zistilo sa na základe vykonanej štúdie literárnych zdrojov, že aplikáciou ultrazvukových vibrácií v radiálnom smere možno výrazne znížiť ťažnú silu a tiež zlepšiť aj kvalitu povrchu ťahanej rúry. Preto bola navrhnutá pre ťahanie daného typorozmeru rúry zostava na ťahanie s využitím ultrazvukových vibrácií v radiálnom smere. Toto riešenie by si však vyžadovalo vyššie investičné náklady oproti riešeniu s úpravou geometrie prievlaku.

Zoznam bibliografických odkazov

BELLA, P., BUČEK, P., RIDZOŇ, M., MOJŽIŠ, M. and PARILÁK, Ľ. 2016. Influence of die geometry on drawing force in cold drawing of steel tubes using numerical simulation. *Key Engineering Materials*, 2016. 716, pp. 708-712. ISSN 1013-9826.

HAYASHI, M., JIN, M., THIPPRAKMAS, S., MURAKAWA, M., JUNG-CHUNG H., YU-CHUNG T. and CHING-HUA H. 2003. Simulation of ultrasonic-vibration drawing using the finite element method (FEM). *Journal of Materials Processing Technology*, 140 (1-3), pp. 30-35, ISSN 0924-0136. [online] [cit. 2023-22-03] Dostupné na internete: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00699-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00699-X).

HERDA, M. 2015. Návrh zlepšenia procesu ťahania švových zvarovaných rúr z austenitických ocelí s počítačovou podporou. (Diplomová práca). Vedúci diplomovej práce: doc. Ing. Jozef Bílik, PhD. Trnava, MTF STU, 2015, s. 70.

MAROPIS, N. 2010. *Using ultrasonic energy for drawing tube.* [online] [cit. 2015-22-03] Dostupné na internete: <http://www.thefabricator.com/article/tubepipefabrication/using-ultrasonic-energy-for-drawing-tube>.

NEVES, F., BUTTON, S.T., CAMINAGA, C. and GENTILE, F. C. 2005. Numerical and experimental analysis of tube drawing with fixed plug. In *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2005. XXVII (4). pp. 425-431. [online] [cit. 2025-01-11] Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/publication/245405922_Numerical_and_experimental_analysis_of_tube_drawing_with_fixed_plug.

Noria Corporation. 2015 *How to Reduce Friction between Surfaces.* [online] [cit. 2024-02-03] Dostupné na internete: <http://www.machinerylubrication.com/Read/29181/reduce-friction-surfaces>.

PALENGAT, M., CHANGON, G., FAVIER, D., LOUCHE, H., LINARDON, C. and PLAIDEAU, CH. 2013. Cold drawing of 316L stainless steel thin-walled tubes: experiments and finite element analysis. In *International Journal of Mechanical Sciences*. 70. pp. 69-78.

SCHREK, A. 2005. *Ťahanie rúrok hraničných rozmerov z austenitických ocelí.* 1.vyd. Bratislava: STU v Bratislave SjF, 2005. s. 144. MDT 669.14 621.77.

Podakovanie

Tento príspevok vznikol v rámci projektu: *Implementácia inovatívnych foriem učenia a praktického tréningu do vzdelávania v oblasti výrobných technológií a výrobného manažmentu s cieľom zvýšiť atraktivnosť štúdia a podporiť rozvoj prierezových kompetencií absolventov (026STU-4/2023)*, s podporou agentúry KEGA MŠVVaŠ SR.

2 ZVÝŠENIE EFEKTÍVNOSTI A SLEDOVANIE KVALITY VÝROBY DRÔTOV PRE KÁBLE

BÍLIK, J., – KOSZTOLÁNSZKA, E.

Úvod

Prípadová štúdia je zameraná na problematiku riešenia výroby drôtov pretlačov určených najmä pre oblasť výroby káblov. Výroba drôtov je vysoko aktuálna vzhľadom na širokú oblasť ich využitia v rôznych odvetviach priemyselnej výroby. Cieľom riešenia bola analýza procesu výroby a návrh opatrení na zvýšenie efektívnosti výroby z hľadiska kvality a produktivity výroby. Cieľom bola tiež analýza vlastností vstupného polotovaru a vlastností drôtu vyrábaného pretlačovaním v súvislosti s veľkosťou pretvorenia v procese pretlačovania. Prípadová štúdia je zameraná na výrobu plochých medených drôtov s obdĺžnikovým prierezom určených na výrobu medených elektrických káblov.

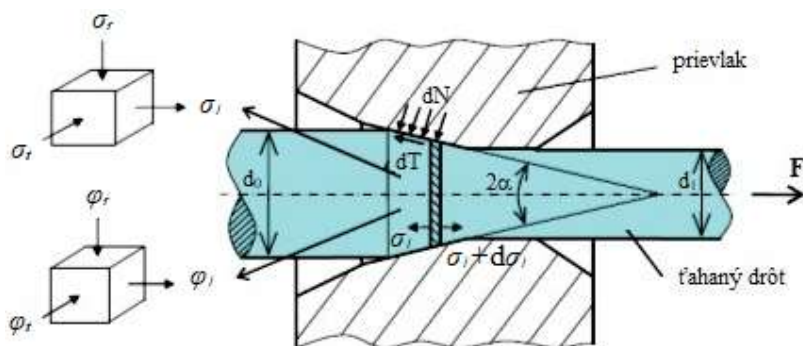
2.1 Súčasný stav výroby drôtov

Pri výrobe drôtov dochádza k výraznej zmene prierezu vstupného polotovaru, ktorý je najčastejšie vo forme valcovaného drôtu dodávaného vo zvitkoch. V súčasnosti sa pri výrobe drôtov najčastejšie využíva technológia ťahania cez prievlaky a to najmä pri výrobe drôtov kruhového prierezu. Pri výrobe drôtov sa v niektorých prípadoch využíva aj technológia dopredného pretlačovania, ako je to napr. pri výrobe drôtov pre zváracie elektródy a pod. Okrem toho sa pri výrobe medených drôtov nekruhového prierezu využíva aj technológia pretlačovania, pri ktorej je polotovar vo forme zvitku a do pretlačovacej hlavy tlačný pomocou valcov, ktoré vyvíjajú pretlačovaciu silu. Prípadová štúdia je zameraná najmä na túto technológiu výroby.

2.1.1 Výroba drôtov ťahaním

Ťahanie drôtu je vlastne preťahovanie polotovaru otvorom cez prievlak, kde sa znižuje priečny prierez a zväčšuje sa jeho dĺžka. Ťahaním sa dosahujú požadované rozmery a tvar drôtu. Zlepšujú sa aj mechanické vlastnosti materiálu a kvalita povrchu. Ťahanie drôtu na finálny rozmer sa uskutočňuje za studena pod rekryštalizačnou teplotou. Pri ťahaní dochádza k plastickému pretvoreniu, ktoré je spojené s deformáciou zŕn a vznikom textúry. Ťahaný alebo valcovaný drôt musí mať vhodnú štruktúru na ťahanie, musí mať odstránené okuje a vhodnú povrchovú úpravu, ktorá slúži ako nosič maziva. Ťažná sila je prenášaná drôtom, ktorý je ovinutý okolo rotujúceho ťažného bubna drôtoťahu. Drôt prechádza postupne viacerými prievlakmi. V každom prievlaku dochádza k redukcii prierezu, predĺženiu drôtu a zvyšovaniu rýchlosti ťahaného drôtu. Zároveň dochádza k zmene mechanických vlastností, a to hlavne k zvyšovaniu hodnôt pevnostných vlastností a znižovaniu hodnôt plastických vlastností. Prejaví sa to hlavne zvýšením medze klzu, pevnosti v ťahu, znížením ťažnosti, kontrakcie, znížením počtu striedavých ohybov pri skúške striedavým ohybom a znížením uhla skrútenia pri skúške krutom. (Bača, Bílik a Tittel, 2010; Tittel, 2009)

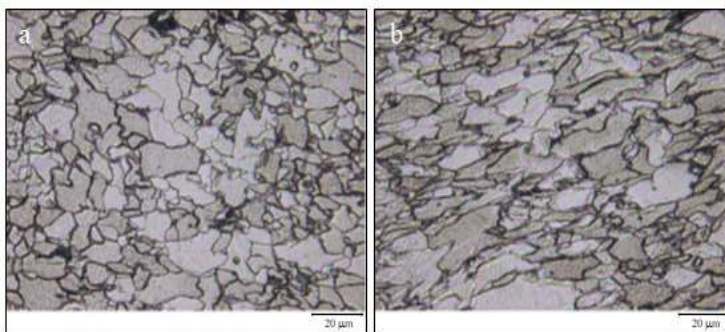
Ťahaný oceľový drôt sa používa na výrobu rôznych výrobkov, ako napr. zvárané siete, pletivá, klince, laná, pramence na predpínaciu výstuž, pružiny, kordy do pneumatík a dopravných pásov, ihly, hadicové drôty, spojovacie materiály a iné. Hliníkové a medené drôty sa uplatňujú najmä pri výrobe káblov pre oblasť elektrotechniky. Možnosť širokej modifikácie vlastností ťahaného drôtu umožňuje zabezpečiť na daný cieľ použitia optimálne parametre drôtu. Na Obr. 2.1 je uvedený princíp ťahania drôtu cez prievlak za studena.



Obr. 2.1. Princíp ťahania drôtu (Bača, Bilík a Tittel, 2010)

F – ťažná sila, d_0 – vstupný priemer drôtu, d_1 – výstupný priemer drôtu,
 2α – uhol ťažného kužela, σ_l – pozdĺžne (absolútne najväčšie) ťahové napätie,
 σ_r – radiálne tlakové napätie, σ_l – obvodové tlakové napätie, dN – elementárne normálové tlaky,
 dT – elementárna trecia sila ($dT = m \cdot dN$), ϕ_l – pozdĺžne pretvorenie v smere ťahového napätia,
 ϕ_r – radiálne pretvorenie, ϕ_t – tangenciálne pretvorenie

Na Obr. 2.2 je mikroštruktúra vstupného polotovaru pred ťahaním a mikroštruktúra drôtu po ťahaní nízkouhlíkovej ocele STN 41 1373.



Obr. 2.2. Mikroštruktúra nízkouhlíkovej ocele STN 41 1373 (Ťahanie drôtov, 2017)
a – pred ťahaním b – po ťahaním

Štruktúra vstupného polotovaru v podobe valcovaného drôtu nejaví známky plastickej deformácie a je tvorená rovnoosými zrnami. Počas ťahania (tvárnenia) za studena sa zrná deformujú, t. j. natáhajú v smere ťahania a vzniká tzv. textúra. Vznik textúry je spojený s anizotropiou mechanických vlastností. Anizotropia je považovaná za negatívny efekt tvárnenia za studena. (Ťahanie drôtov, 2017)

2.1.1.1 Tepelné spracovanie drôtov

Tepelné spracovanie má pri výrobe oceľového drôtu dvojitý význam, a to: (Egermeier a kol., 1976)

- obnovuje schopnosť materiálu znášať ďalšiu plastickú deformáciu, ktorá sa pri tvárnení za studena vyčerpáva,

- tepelným spracovaním sa môžu rozhodujúcou mierou ovplyvniť požadované mechanické vlastnosti hotového drôtu.

Kombinácia tepelného spracovania drôtu a ťahania umožňuje vyrábať drôty s veľkou škálou rôznych vlastností. Vo väčšine prípadov je tepelné spracovanie predposledná operácia, ktorou sa ovplyvňujú mechanické a fyzikálne vlastnosti drôtu, za ktorou nasleduje ťahanie na konečný priemer. Ťahaním na konečný priemer sa dosahuje spolu s finálnymi vlastnosťami drôtu. V niektorých prípadoch však tepelné spracovanie je poslednou konečnou operáciou. (Egermeier a kol., 1976)

Tepelné spracovanie je nutné vždy, pokiaľ dôjde k vyčerpaniu plastických vlastností a technológia vyžaduje ďalšie ťahanie drôtu, prípadne spracovanie (tvárnenie) drôtu. Spôsoby tepelného spracovania drôtov, prípadne výrobkov z ocelí najviac ovplyvňuje obsah C v oceli. Drôty z nízkouhlíkových ocelí sa po vyčerpaní plasticity žijajú na obnovenie schopnosti podrobiť sa ďalšiemu tvárneniu. V tom prípade ide o obnovu plastických schopností použitím žihania. Najpoužívanější spôsoby žihania sú: (Bača, Bílik a Tittel, 2010)

- normalizačné žihanie,
- rekryštalizačné žihanie,
- žihanie na mätko.

Stredne a vysokouhlíkové oceľové drôty sa po vyčerpaní plasticity patentujú na obnovenie schopnosti podrobiť sa ďalšiemu tvárneniu. Proces pozostáva z austenitického ohrevu, prechodu cez roztavené olovo s teplotou od 500 do 550 °C a následného ochladenia vo vode. Získa sa tým veľmi húževnatá a pevná štruktúra zmesi jemného lamelárneho perlitu a bainitu. Vzniknutá štruktúra umožňuje ťahať drôt z celkovým úberom nad 90 %. (Bača, Bílik a Tittel, 2010)

2.1.1.2 Stroje na ťahanie drôtov

Vlastné ťahanie drôtu sa vykonáva na strojoch, ktoré sa nazývajú drôtoťahy. Delia sa podľa spôsobu ťahania drôtu, podľa priemeru drôtu, podľa konštrukcie a pod. Podľa **spôsobu ťahania drôtu** sa delia na *drôtoťahy na ťahanie za sucha* a *drôtoťahy na ťahanie za mokra*, prípadne môže byť i kombinácia týchto typov s tým, že prvé ťahy sú za sucha a ďalšie za mokra. Na zabezpečenie technológie ťahania sú okrem drôtoťahov potrebné aj pomocné zariadenia ako sú napr. zväračky a hrotovačky. Pri ťahaní za mokra sú prievlaky ponorené v kvapaline (mazacom a chladiacom prostredí), najčastejšie v emulzii. Pri ťahaní za sucha sa používa napr. mydlový prášok. (Bača, Bílik a Tittel, 2010)

Ďalej sa drôtoťahy delia podľa **počtu ťahov**, a to na: *jednotáhové* a *viacťahové*. Podľa **priemeru drôtu** sa delia na drôtoťahy:

- na ťahanie veľkých priemerov drôtu od 4 do 20 mm,
- na ťahanie stredných priemerov drôtu od 1,6 do 4 mm,
- na ťahanie jemných priemerov drôtu od 0,6 do 1,6 mm,
- na ťahanie zvlášť jemných drôtov s priemerom pod 0,6 mm. (Egermeier a kol., 1976)

2.1.2 Výroba drôtu pretlačovaním

Pretlačovanie je proces tvárnenia, pri ktorom sa materiál pôsobením tlaku pretláča cez zúžený prierez pretlačovacieho nástroja. Pretlačovanie je základnou prácou objemového tvárnenia. Pretlačovanie v procesoch výrobných technológií je hlavne technológia pretlačovania za studena. Pretlačovanie za tepla, ktorým sa vyhotovujú polovýrobky na ďalšie spracovanie (napr. profily, rúrky a iné), patrí do procesu hutníckej prvovýroby. (Blaščík a kol., 1988; Bača, Bílik a Tittel, 2010)

2.1.2.1 Pretlačovanie za studena

Pri pretlačovaní za studena sa materiál pri všestrannom tlaku vytláča z uzatvorenej dutiny cez zúžený prierez (otvor) a konečný tvar súčasti (prietlačku) je daný tvarom nástroja (prietlačníka a prietlačnice). Sily, ktoré sú potrebné na pôsobenie pretlačovacích nástrojov na materiál sú vyvodzované lismi. Pretože polovýrobok sa pritom spracúva bez ohrevu, čiže pri teplote okolia. (Moravec a Bílik, 2017; Šugár a Šugárová, 2009)

Pri pretlačovaní dochádza vplyvom veľkých tlakov pri väčších rýchlostiach k vývinu tepla, preto pretlačované súčasti dosiahnu niekedy teplotu až 200 °C. Aj napriek tejto teplote, pretože je pod teplotou rekryštalizácie, ide o tvárnenie za studena a dochádza k poklesu ťažnosti a nárastu pevnosti a tvrdosti tvárneného materiálu. Východiskovým polotovarom pre pretlačovanie sú tzv. klátiky kruhového, ale i štvorcového prierezu. (Blaščík a kol., 1988)

Pretlačovaním za studena sa vyrábajú väčšinou menšie výrobky prakticky na hotovo z mäkkých ocelí, hliníka, farebných kovov. V poslednom období sa najmä hydrostatickým pretlačovaním tvárnia aj ocele vyšších pevností a dokonca aj nástrojové ocele. Kontrakcia u ocelí vhodných na pretlačovanie za studena má byť minimálne 55 % a pomer medze klzu a pevnosti v ťahu má byť (Re/Rm) má byť v intervale od 0,5 do 0,6. (Bača, Bílik a Tittel, 2010; Šugár a Šugárová, 2009)

Na pretlačovanie za studena hliníka a jeho zliatin je najvhodnejší čistý hliník (Al 99,9) a zliatiny Al-Mn, Al-Mg-Si s obsahom Mg < 4 %. V prípade pretlačovania medi a jej zliatin je vhodná čistá Cu, cínové bronzы do 9 % Sn, hliníkové bronzы do 8 % Al, mosadze do 32 % Zn (napr. Ms 90, Ms 68).

Hlavnými výhodami pretlačovania za studena sú: (Bača, Bílik a Tittel, 2010; Šugár a Šugárová, 2009)

- vysoká produktivita v porovnaní s obrábaním a odlieváním,
- veľká úspora materiálu – niektoré súčasti sa robia prakticky na hotovo s minimálnym odpadom,
- možnosť dosiahnutia veľkého stupňa pretvorenia na jednu operáciu, vďaka priaznivým tlakovým napätiam,
- zlepšenie mechanických vlastností materiálu po pretlačovaní jeho deformačným spevnením,
- vysoká presnosť rozmerov a vysoká kvalita povrchu (rozmery prietlačku zodpovedajú rozmerom nástroja a tiež kvalita povrchu zodpovedá kvalite povrchu nástroja).

2.1.2.1.1 Teoretický rozbor procesu výroby drôtov pretlačovaním

Výhody objemového tvárnenia sú hlavne značná úspora materiálu, zníženie výrobných časov a potrebnej energie, čím majú podstatný vplyv na zníženie výrobných nákladov pri zlepšenej kvalite finálnych výrobkov. (Forejt a Píška, 2006)

Technologické charakteristiky pretláčania

Pri aplikácii technológie výroby pretlačovaním za studena je potrebné venovať veľkú pozornosť voľbe prípravy polovýrobku prietlačku. Na pretlačovanie sú vhodné materiály s najnižšími pevnostnými charakteristikami a najvyššou možnou ťažnosťou. Objem polovýrobku sa musí rovnať objemu prietlačku so zväčšením o technologické prídavky. Tvar a rozmery polovýrobku sa volia podľa tvaru a rozmerov prietlačku, druhu technologickej operácie pretlačovania a prípustného stupňa deformácie. Bežné polovýrobky vyžadujú pred pretlačovaním prípravu, ktorá zahŕňa najmä tieto operácie:

- lúpanie polovýrobku na odstránenie povrchovej vrstvy s nerovnomernými vlastnosťami a na dosiahnutie potrebnej rozmerovej presnosti,
- delenie na požadovanú dĺžku,
- žihanie na mätko na zníženie pretlačovacieho tlaku,
- čistenie povrchu,
- fosfátovanie povrchu polovýrobku pri pretlačovaní ocelí,
- mazanie.

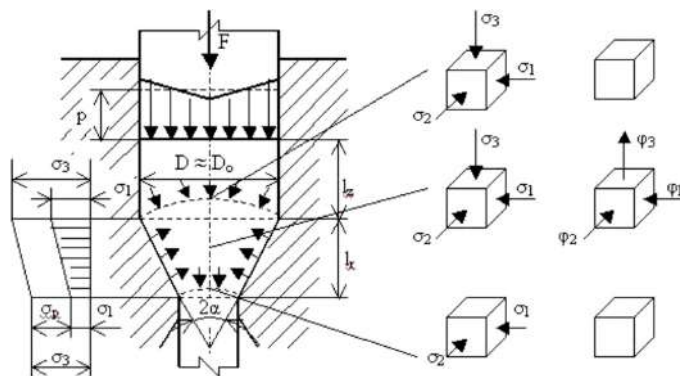
Pri požiadavke väčšieho stupňa deformácie, ako je hraničná tvárnosť materiálu, je potrebné zvoliť viac pretlačovacích operácií a pred každou operáciou odstrániť spevnenie materiálu rekryštalizačným žiňaním a aj upraviť povrch. (Hrivňák a kol., 1992)

Stav napätosti a pretvorenia pri pretlačovaní

Pri procesoch pretlačovania vznikajú v tvárnenom objeme výhodné tlakové napätia, a preto sa dajú dosiahnuť veľké stupne pretvorenia bez porušenia materiálu. Pri procesoch pretlačovania sú tri oblasti, a to: (Bača, Bílik a Tittel, 2010)

- I – oblasť nepretvorená prenášajúca silu,
- II – oblasť tvárnenia, v ktorej prebieha proces pretvorenia,
- III – oblasť pretvorená, v ktorej už neprebieha pretvorenie.

Na Obr. 2.3 sú uvedené schémy napätí a pretvorení pri doprednom pretlačovaní.



Obr. 2.3. Schémy napätí a pretvoreni pri doprednom pretlačovaní (Bača, Bílik a Tittel, 2010)
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – hlavné napätia, ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 – hlavné logaritmické pretvorenia, σ_p – prirodzený deformačný odpor,
 p – tvármiaci tlak, F – pretlačovacia sila

2.2 Súčasný stav výroby vo firme Vicente Torns Slovakia a. s.

Firma VINCENTE TORN SLOVAKIA a. s., Veľké Kosihy sa venuje výskumu, vývoju, výrobe a komercializácii výrobkov z medi a hliníka pre rôzne oblasti priemyslu (energetika, automobilový priemysel, stavebníctvo, infraštruktúra a pod). Firma disponuje výrobnými zariadeniami na pretlačovanie (extrúziu) a ťahanie drôtu ako aj ďalšími zariadeniami na realizáciu procesov výroby drôtu. Firma disponuje týmito zariadeniami:

1. Na pretlačovanie – 3 stroje TLJ 300 (prierez vodičov od 10 do 150 mm²),
2. Na ťahanie – drôtoťah Frigeco TS45-11-1 (rozsah vyrábaných rozmerov od 1,35 do 4,45 mm).

Ďalej disponuje zariadeniami na ďalšie spracovanie drôtu ako sú vertikálne a horizontálne stroje na smaltovanie okrúhlych vodičov, vertikálne stroje na smaltovanie plochých vodičov, stroje na izoláciu individuálnych, dvojité a trojitých vodičov. Okrem toho disponuje aj strojmi na pletenie plochých smaltovaných vodičov. (Vicente Torns Group, 2019)

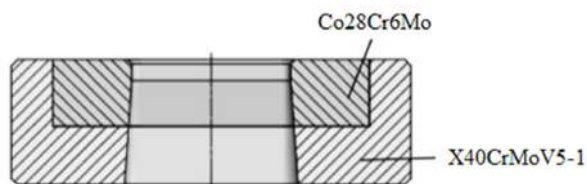
Spoločnosť využíva aj pretlačovanie pomocou valcov a špeciálnych nástrojov, ktorých vonkajšia časť je z materiálu X40CRMOV5-1 a vnútorná, teda funkčná časť nástroja je z materiálu Co28Cr6Mo. Táto technológia je založená na podobnom princípe ako je technológia ECAR (equal channel angular rolling), ktorá patrí medzi technológie intenzívnych plastických deformácií (IPD). Pri samotnom pretlačovaní v dôsledku výraznej plastickej deformácie a rýchlosti pretvorenia vzniká množstvo tepla a dochádza k ohreву pretlačovaného materiálu až nad teplotu rekryštalizácie.

Materiál X40CRMOV5-1 (nástrojová oceľ STN 41 9554) je húževnatá nástrojová oceľ, odolná proti tepelnému zaťažovaniu, dobre znáša teplotné rázy, nástroje je možno chladit' vodou, obtiažne sa brúsi, má dobrú prekaliteľnosť aj pri väčších rozmeroch, má dobrú tepelnú vodivosť. Používa sa na formy pre tlakové liatie ľahkých kovov, časti malých a stredných zápustiek, časti foriem na plasty, nože na strihanie za tepla, pretlačovanie za tepla. Chemické zloženie je C 0,4 %, Cr 5,1 %, Si 1 %, Mo 1,3 %, V 1 %, Si 1 %. Žihanie na mätko sa môže realizovať pri teplote od 750 do 790 °C. Tvrdosť v žihanom stave sa dosahuje 229 HB a pevnosť v ťahu okolo 770 MPa. Kalenie sa môže realizovať pri teplote od 1000

do 1050 °C a optimálna popúšťacia teplota je od 550 do 650 °C. Optimálna tvrdosť v kalenom stave je: 54 HRC. (1.2344/X40CrMoV5-1/19554/H13/TLH, 2019)

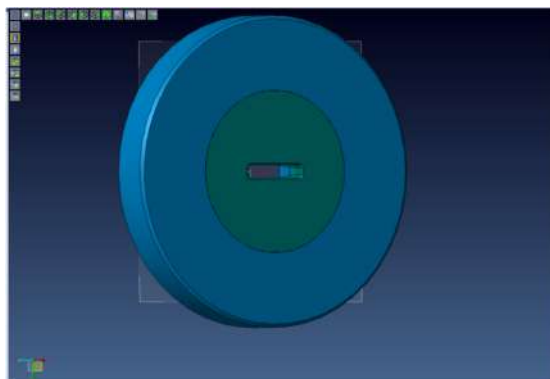
Materiál Co28Cr6Mo má vynikajúcu pevnosť pri vysokých teplotách, vysokú húževnatosť, dobrú odolnosť voči kavitáčnej korózii a vysokú odolnosť proti opotrebeniu. Jej použitie je na lopatky turbín, na aplikácie s horúcimi tryskami, ďalej komponenty v spaľovacích alebo výfukových systémoch a pod. (Co-Alloy CoCr28Mo6/2.4979/F75, 2020)

Na Obr. 2.4 je znázornené použitie daných materiálov na nástroj pri výrobe drôtov pretlačovaním.

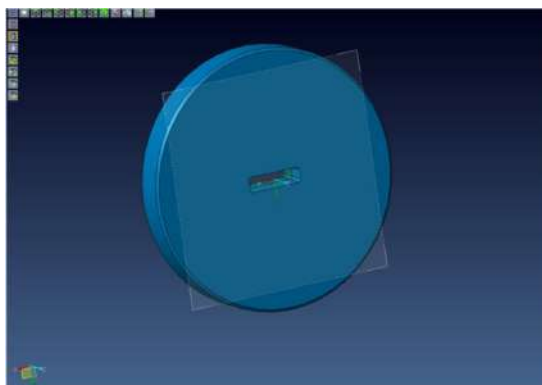


Obr. 2.4. Nástroj na výrobu drôtov pretlačovaním v spoločnosti Vicente Torns Slovakia

Na Obr. 2.5 a Obr. 2.6 je uvedený 3D model nástroja v dvoch pohľadoch.



Obr. 2.5. 3D model nástroja z čelnej strany



Obr. 2.6. 3D model nástroja zo zadnej strany

Technologický proces výroby drôtu pretlačovaním je realizovaný vo výrobnej linke pozostávajúcej z odvíjacieho zariadenia, zariadenia na pretlačovanie pomocou valcov a špeciálnej pretlačovacej hlavy, chladiaceho zariadenia a navíjacieho zariadenia. Niektoré časti linky ako je zariadenie na pretlačovanie a chladenie sú uvedené na Obr. 2.7 až Obr. 2.11.



Obr. 2.7. Vstup materiálu (polotovaru) do stroja medzi valce na pretlačovanie (Kosztolánszka, 2019)



Obr. 2.8. Pohľad na otvorenú výstupnú časť pretlačovacieho zariadenia s odklopným špeciálnym nástrojom (otvorený stroj) (Kosztolánszka, 2019)



Obr. 2.9. Pohľad zhora na otvorenú výstupnú časť s odklopným nástrojom (pretlačovacou hlavou) (Kosztolánszka, 2019)



Obr. 2.10. Výstup drôtov z pretlačovacej hlavy a začiatok chladenia



Obr. 2.11. Proces chladenia po pretlačovaní

2.3 Experimentálna analýza vlastností drôtov

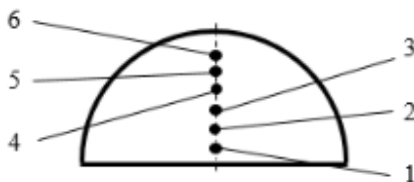
Na analýzu vlastností vybratých typorozmerov drôtov sa realizovalo meranie tvrdosti a určenie mechanických vlastností na základe ťahovej skúšky. Na sledovanie vplyvu deformácie na štruktúru bola realizovaná analýza mikroštruktúry pred a po pretlačovaní. (Kosztolánszka, 2019)

2.3.1 Výsledky merania tvrdosti HV5

Na experimentálnu analýzu boli použité 2 typy medeného polotovaru a 3 typy drôtov, vyrobených technológiou pretlačovania. Realizovalo sa meranie tvrdosti podľa Vickersa na priečnom reze na vzorkách, pripravených zo vstupného polotovaru a z vyrobených drôtov. Veľkosť záťaže bola 49,03 N (5 kp) a čas záťaže 10 s. Tvrdosť bola meraná tvrdomerom ZWICK 3212 podľa normy STN EN ISO 6507.

Meranie tvrdosti na polotovare v priečnom reze

Na Obr. 2.12 sú znázornené miesta merania tvrdosti na vstupnom polotovare s priemerom $\varnothing$ 12,7 mm.



Obr. 2.12. Miesta merania tvrdosti na polotovare v priečnom reze

Namerané hodnoty tvrdosti HV5 vstupného polotovaru z bezkyslíkovej (OXY) a elektrotroskovo pretavovanej (ETP) medi sú uvedené v Tabuľke 2.1 a Tabuľke 2.2.

Tabuľka 2.1. Namerané hodnoty tvrdosti HV5 pre polotovar OXY

Miesto merania	1	2	3	4	5	6
Vzdialenosť od stredu (mm)	1	2	3	4	5	6
Tvrdosť HV5	55,2	54,6	60,3	63,5	64,2	71,2

Tabuľka 2.2. Namerané hodnoty tvrdosti HV5 pre polotovar ETP

Miesto merania	1	2	3	4	5	6
Vzdialenosť od stredu (mm)	1	2	3	4	5	6
Tvrdosť HV5	56,3	58,2	62,6	65,6	66,3	71,2

Meranie tvrdosti na vyrobených drôtoch v priečnom reze

Namerané hodnoty tvrdosti HV5 drôtu sú uvedené v Tabuľke 2.3, Tabuľke 2.4 a Tabuľke 2.5.

Tabuľka 2.3. Namerané hodnoty tvrdosti HV5 pre drôt 9,5 x 4,5

Číslo merania	1	2	3	Stredná hodnota	Odchýlka merania
Tvrdosť HV5	62,9	70,8	64,2	65,97	± 4,24

Tabuľka 2.4. Namerané hodnoty tvrdosti HV5 pre drôt 10,5 x 1,65

Číslo merania	1	2	3	Stredná hodnota	Odchýlka merania
Tvrdosť HV5	58,2	56,5	62,6	59,10	± 3,15

Tabuľka 2.5. Namerané hodnoty tvrdosti HV5 pre drôt 5,75 x 1,35

Číslo merania	1	2	3	Stredná hodnota	Odchýlka merania
Tvrdosť HV5	75,7	73,2	72,8	73,90	± 1,57

2.3.2 Výsledky zo skúšky jednoosovým ťahom

Na meranie tvrdosti tak aj na ťahové skúšky boli pripravené vzorky z 2 typov polotovaru a 3 typov drôtov. Ťahové skúšky boli robené na trhačke EU 40. Ide o takmer čistú meď. Ide o polotovary: ETP (elektrotroskovo pretavovaná meď) a OXY (bezoxidová, resp. bezkyslíková meď).

Výsledky pre vstupný polotovár

Stredný východiskový priemer polotovaru OXY je $d_{pol} = 12,7$ mm, počiatočná meraná dĺžka vzorky je $L_0 = 100$ mm. Výsledky merania zo skúšky jednoosovým ťahom sú uvedené v Tabuľke 2.6.

Tabuľka 2.6. Výsledky merania z ťahovej skúšky pre polotovár OXY

Sila na medzi klzu $F_{Rp0,2}$ (kN)	12,4
Sila na pevnosti v ťahu F_{Rm} (kN)	22,3
Predĺženie do roztrhnutia ΔL_R (mm)	77,5
Priemer krčka v mieste roztrhnutia d_R (mm)	6,1
Počiatočný prierez vzorky S_0 (mm ²)	126,6
Prierez v mieste roztrhnutia S_R (mm ²)	29,21
Dohovorená medza klzu $R_{p0,2}$ (MPa)	97,95
Pevnosť v ťahu R_m (MPa)	176,15
Ťažnosť A (%)	77,5
Kontrakcia Z (%)	76,9

Pre ukazovatele plasticity platí:

a) Pomer medze klzu a pevnosti v ťahu:

$$\frac{R_{p0,2}}{R_m} = \frac{77,5}{176,15} = 0,556 \quad (2.1)$$

b) Statická húževnatosť:

$$A_{SH} = (R_m - R_{p0,2}) \cdot A = (176,15 - 97,95) \cdot 0,775 = 60,6 \text{ (MPa)} \quad (2.2)$$

Stredný východiskový priemer polotovaru ETP je $d_{pol} = 12,7$ mm, počiatočná meraná dĺžka vzorky je $L_0 = 85$ mm. Výsledky merania zo skúšky jednoosovým ťahom pre polotovár sú uvedené v Tabuľke 2.7.

Tabuľka 2.7. Výsledky merania z ťahovej skúšky pre polotovár ETP

Sila na medzi klzu $F_{Rp0,2}$ (kN)	13,0
Sila na pevnosti v ťahu F_{Rm} (kN)	30,0
Predĺženie do roztrhnutia ΔL_R (mm)	76,5
Priemer krčka v mieste roztrhnutia d_R (mm)	6,3
Počiatočný prierez vzorky S_0 (mm ²)	126,6
Prierez v mieste roztrhnutia S_R (mm ²)	31,16
Dohovorená medza klzu $R_{p0,2}$ (MPa)	102,7
Pevnosť v ťahu R_m (MPa)	237,0
Ťažnosť A (%)	90,0
Kontrakcia Z (%)	75,4

Pre ukazovatele plasticity platí:

a) Pomer medze klzu a pevnosti v ťahu:

$$\frac{R_{p0,2}}{R_m} = \frac{102,7}{237} = 0,433 \quad (2.3)$$

b) Statická húževnatosť:

$$A_{SH} = (R_m - R_{p0,2}) \cdot A = (237 - 102,7) \cdot 0,9 = 120,9 \text{ (MPa)} \quad (2.4)$$

Ako je zrejmé z výsledkov u elektrotroskovo pretavovaných polotovarov vychádzajú lepšie výsledky z hľadiska tvárniteľnosti, čo súvisí so znížením obsahu nečistôt a zmenou štruktúry (zjemnením štruktúry) po ETP.

Výsledky pre vyrobené drôty

Pre každý typorozmer vyrobeného drôtu bola ťahová skúška realizovaná na dvoch vzorkách, pripravených rezaním na požadovanú celkovú dĺžku 250 mm. Na vzorkách bola ryskami vyznačená počiatočná meraná dĺžka $L_0 = 150$ mm.

A) Drôt 9,5 x 4,5 mm

Výsledky z ťahovej skúšky vo forme nameraných a vypočítaných hodnôt pre vzorku č. 1 sú uvedené v Tabuľke 2.8 a pre vzorku č. 2 v Tabuľke 2.9.

Tabuľka 2.8. Výsledky merania z ťahovej skúšky vzorky č. 1

Sila na medzi klzu $F_{Rp0,2}$ (kN)	4,7
Sila na pevnosti v ťahu F_{Rm} (kN)	10,5
Predĺženie do roztrhnutia ΔL_R (mm)	75,0
Rozmery krčka v mieste roztrhnutia (šírka x hrúbka) (mm)	5,84 x 2,06
Počiatočný prierez vzorky S_0 (mm ²)	42,75
Prierez v mieste roztrhnutia S_R (mm ²)	12,03
Dohovorená medza klzu $R_{p0,2}$ (MPa)	109,9
Pevnosť v ťahu R_m (MPa)	245,6
Ťažnosť A (%)	50,0
Kontrakcia Z (%)	71,8

Pre ukazovatele plasticity platí:

a) Pomer medze klzu a pevnosti v ťahu:

$$\frac{R_{p0,2}}{R_m} = \frac{109,9}{245,6} = 0,447 \quad (2.5)$$

b) Statická húževnatosť:

$$A_{SH} = (R_m - R_{p0,2}) \cdot A = (245,6 - 109,9) \cdot 0,5 = 67,9 \text{ (MPa)} \quad (2.6)$$

Tabuľka 2.9. Výsledky merania z ťahovej skúšky vzorky č. 2

Sila na medzi klzu $F_{Rp0,2}$ (kN)	4,6
Sila na pevnosti v ťahu F_{Rm} (kN)	10,4
Predĺženie do roztrhnutia ΔL_R (mm)	79,5
Rozmery krčka v mieste roztrhnutia (šírka x hrúbka) (mm)	5,73 x 2,08
Počiatočný prierez vzorky S_0 (mm ²)	42,75
Prierez v mieste roztrhnutia S_R (mm ²)	11,92
Dohovorená medza klzu $R_{p0,2}$ (MPa)	107,6
Pevnosť v ťahu R_m (MPa)	243,3
Ťažnosť A (%)	53,0
Kontrakcia Z (%)	72,1

Pre ukazovatele plasticity platí:

a) Pomer medze klzu a pevnosti v ťahu:

$$\frac{R_{p0,2}}{R_m} = \frac{107,6}{243,3} = 0,442 \quad (2.7)$$

b) Statická húževnatosť:

$$A_{SH} = (R_m - R_{p0,2}) \cdot A = (243,3 - 107,6) \cdot 0,53 = 71,9 \text{ (MPa)} \quad (2.8)$$

B) Drôt 10,5 x 1,65 mm

Výsledky z ťahovej skúšky o forme nameraných a vypočítaných hodnôt pre vzorku č. 1 sú uvedené v Tabuľke 2.10 a pre vzorku č. 2 v Tabuľke 2.11.

Tabuľka 2.10. Výsledky merania z ťahovej skúšky vzorky č. 1

Sila na medzi klzu $F_{Rp0,2}$ (kN)	1,3
Sila na pevnosti v ťahu F_{Rm} (kN)	3,96
Predĺženie do roztrhnutia ΔL_R (mm)	72,1
Rozmery krčka v mieste roztrhnutia (šírka x hrúbka) (mm)	7,22 x 1,14
Počiatočný prierez vzorky S_0 (mm ²)	17,325
Prierez v mieste roztrhnutia S_R (mm ²)	8,23
Dohovorená medza klzu $R_{p0,2}$ (MPa)	75,04
Pevnosť v ťahu R_m (MPa)	228,6
Ťažnosť A (%)	48,1
Kontrakcia Z (%)	52,5

Pre ukazovatele plasticity platí:

a) Pomer medze klzu a pevnosti v ťahu:

$$\frac{R_{p0,2}}{R_m} = \frac{75,04}{228,6} = 0,328 \quad (2.9)$$

b) Statická húževnatosť:

$$A_{SH} = (R_m - R_{p0,2}) \cdot A = (228,6 - 75,04) \cdot 0,525 = 80,6 \text{ (MPa)} \quad (2.10)$$

Tabuľka 2.11. Výsledky merania z ťahovej skúšky vzorky č. 2

Sila na medzi klzu $F_{Rp0,2}$ (kN)	1,4
Sila na pevnosti v ťahu F_{Rm} (kN)	4,1
Predĺženie do roztrhnutia ΔL_R (mm)	72,0
Rozmery krčka v mieste roztrhnutia (šírka x hrúbka) (mm)	7,60 x 1,12
Počiatočný prierez vzorky S_0 (mm ²)	17,325
Prierez v mieste roztrhnutia S_R (mm ²)	8,512
Dohovorená medza klzu $R_{p0,2}$ (MPa)	80,8
Pevnosť v ťahu R_m (MPa)	236,65
Ťažnosť A (%)	48,0
Kontrakcia Z (%)	50,9

Pre ukazovatele plasticity platí:

a) Pomer medze klzu a pevnosti v ťahu:

$$\frac{R_{p0,2}}{R_m} = \frac{80,8}{236,65} = 0,341 \quad (2.11)$$

b) Statická húževnatosť:

$$A_{SH} = (R_m - R_{p0,2}) \cdot A = (236,65 - 80,8) \cdot 0,48 = 74,8 \text{ (MPa)} \quad (2.12)$$

C) Drôt 5,75 x 1,35 mm

Výsledky z ťahovej skúšky o forme nameraných a vypočítaných hodnôt pre vzorku č. 1 sú uvedené v Tabuľke 2.12 a pre vzorku č. 2 v Tabuľke 2. 13.

Tabuľka 2.12. Výsledky merania z ťahovej skúšky vzorky č. 1

Sila na medzi klzu $F_{Rp0,2}$ (kN)	0,72
Sila na pevnosti v ťahu F_{Rm} (kN)	1,94
Predĺženie do roztrhnutia ΔL_R (mm)	64,5
Rozmery krčka v mieste roztrhnutia (šírka x hrúbka) (mm)	4,08 x 0,85
Počiatočný prierez vzorky S_0 (mm ²)	7,762
Prierez v mieste roztrhnutia S_R (mm ²)	3,47
Dohovorená medza klzu $R_{p0,2}$ (MPa)	92,75
Pevnosť v ťahu R_m (MPa)	249,9
Ťažnosť A (%)	43,0
Kontrakcia Z (%)	55,3

Pre ukazovatele plasticity platí:

a) Pomer medze klzu a pevnosti v ťahu:

$$\frac{R_{p0,2}}{R_m} = \frac{92,75}{249,9} = 0,371 \quad (2.13)$$

b) Statická húževnatosť:

$$A_{SH} = (R_m - R_{p0,2}) \cdot A = (249,9 - 92,75) \cdot 0,43 = 67,6 \text{ (MPa)} \quad (2.14)$$

Tabuľka 2.13. Výsledky merania z ťahovej skúšky vzorky č. 2

Sila na medzi klzu $F_{Rp0,2}$ (kN)	0,70
Sila na pevnosti v ťahu F_{Rm} (kN)	1,90
Predĺženie do roztrhnutia ΔL_R (mm)	63,2
Rozmery krčka v mieste roztrhnutia (šírka x hrúbka) (mm)	4,20 x 0,90
Počiatočný prierez vzorky S_0 (mm ²)	7,762
Prierez v mieste roztrhnutia S_R (mm ²)	3,78
Dohovorená medza klzu $R_{p0,2}$ (MPa)	90,2
Pevnosť v ťahu R_m (MPa)	244,8
Ťažnosť A (%)	42,1
Kontrakcia Z (%)	51,3

Pre ukazovatele plasticity platí:

a) Pomer medze klzu a pevnosti v ťahu:

$$\frac{R_{p0,2}}{R_m} = \frac{90,2}{244,8} = 0,368 \quad (2.15)$$

b) Statická húževnatosť:

$$A_{SH} = (R_m - R_{p0,2}) \cdot A = (244,8 - 90,2) \cdot 0,421 = 65,1 \text{ (MPa)} \quad (2.16)$$

Vstupný materiál s priemerom $d_{0s} = 12,7$ mm aj z neho vyrobené drôty s rozmermi 9,5 x 4,5, 10,5 x 1,65 a 5,75 x 1,35 majú pomer medze klzu a pevnosti v ťahu menší ako 0,65 ako aj vysokú ťažnosť nad 40 % čo svedčí o veľmi dobrých plastických vlastnostiach polotovaru aj vyrobených drôtov.

2.4 Výpočet veľkosti skutočného pretvorenia a redukcie pri výrobe drôtu pretlačovaním pri súčasnom stave výroby

Z hľadiska priebehu procesu tvárnenia aj z hľadiska výsledných vlastností výtvarkov, a teda aj drôtov, významnú úlohu zohráva veľkosť pretvorenia, ktorá je jednou z termomechanických podmienok tvárnenia. Preto bol realizovaný výpočet pretvorenia materiálu pri výrobe jednotlivých typorozmerov drôtov.

Priemer vstupného polotovaru pre všetky tri typorozmery drôtu bol $d_{pol} = 12,7$ mm, prierez vstupného polotovaru: $S_{pol} = 126,61$ mm². Časť prierezu vstupného polotovaru sa pred jeho vstupom do pretlačovacej hlavy odstráni orezaním a potom prierez, vstupujúci do pretlačovacej hlavy po orezaní S_0 je:

$$S_0 = S_{pol} - S_{or} \quad (2.17)$$

kde S_{pol} je prierez vstupného polotovaru v mm²,
 S_{or} – orezaný prierez polotovaru v mm².

Odpad pri orezávaní pred vstupom polotovaru do pretlačovacej hlavy tvoril pri súčasnom spôsobe výroby je približne 7 %. Potom orezaný prierez S_{or} , o ktorý sa zmenší pôvodný prierez polotovaru je:

$$S_{or} = 0,07.123,61 = 8,86 \text{ (mm}^2\text{)} \quad (2.18)$$

Prierez polotovaru, vstupujúci do pretlačovacej hlavy po orezaní potom je:

$$S_0 = 126,61 - 8,86 = 117,75 \text{ (mm}^2\text{)} \quad (2.19)$$

A) Výpočet veľkosti pretvorenia pre drôt 9,5 x 4,5

Pre výpočet skutočného (logaritmického) pretvorenia materiálu φ platí:

$$\varphi = \ln \frac{S_0}{S} \quad (2.20)$$

kde S_0 je počiatočný prierez, vstupujúci do pretlačovacej hlavy po orezaní v mm²,
 S – prierez drôtu po pretlačovaní v mm².

Prierez drôtu po pretlačovaní je:

$$S = 9,5.4,5 = 42,75 \text{ (mm}^2\text{)} \quad (2.21)$$

Potom veľkosť skutočného pretvorenia φ , podľa vzťahu (2.20) je:

$$\varphi = \ln \frac{S_0}{S} = \ln \frac{117,75}{42,75} = 1,01 \quad (2.22)$$

Pre výpočet veľkosti redukcie R platí:

$$R = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100 = \frac{117,75 - 42,75}{117,75} \cdot 100 = 63,7 \text{ (\%)} \quad (2.23)$$

B) Výpočet veľkosti pretvorenia pre drôt 10,5 x 1,65

Prierez drôtu po pretlačovaní je:

$$S = 10,5.1,65 = 17,325 \text{ (mm}^2\text{)} \quad (2.24)$$

Potom veľkosť skutočného pretvorenia φ , podľa vzťahu (2.20) je:

$$\varphi = \ln \frac{S_0}{S} = \ln \frac{117,75}{17,325} = 1,916 \quad (2.25)$$

Pre výpočet veľkosti redukcie R platí:

$$R = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100 = \frac{117,75 - 17,325}{117,75} \cdot 100 = 85,3 \text{ (\%)} \quad (2.26)$$

C) Výpočet pre drôt 5,75 x 1,35

Prierez drôtu po pretlačovaní je:

$$S = 5,75.1,35 = 7,763 \text{ (mm}^2\text{)} \quad (2.27)$$

Potom veľkosť skutočného pretvorenia φ , podľa vzťahu (2.20) je:

$$\varphi = \ln \frac{S_o}{S} = \ln \frac{117,75}{7,763} = 2,719 \quad (2.28)$$

Pre výpočet veľkosti redukcie R platí:

$$R = \frac{S_o - S}{S_o} \cdot 100 = \frac{117,75 - 7,763}{117,75} \cdot 100 = 93,4 \text{ (\%)} \quad (2.29)$$

2.5 Návrhy na optimalizáciu procesu výroby daných typorozmerov drôtov

Po analýze súčasného procesu výroby boli spracované návrhy na zvýšenie efektívnosti výroby za účelom zníženia nákladov na výrobu. Prvý návrh (variant A) vychádzal zo zníženie odpadu pri orezávaní vstupného polotovaru pred jeho vstupom do pretlačovacej hlavy pri zachovaní súčasnej technológie výroby.

a) Zmenšenie priemeru vstupného polotovaru pri zachovaní súčasnej technológie výroby

Návrh vychádzal zo zníženia odpadu, vznikajúceho pred vstupom polotovaru do pretlačovacej hlavy pri orezávaní o 50 %. Na základe toho bol prierez vstupného polotovaru S_{0A} , pre variant A, stanovený podľa tohoto vzťahu:

$$S_{0A} = S_{pol} - \frac{S_{or}}{2} = 126,61 - \frac{8,86}{2} = 122,18 \text{ (mm}^2\text{)} \quad (2.30)$$

Z toho priemer upraveného vstupného polotovaru d_{polU} bol stanovený takto:

$$d_{polU} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{polU}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 122,18}{\pi}} = 12,5 \text{ (mm)} \quad (2.31)$$

Pri zachovaní súčasnej technológie výroby, keď v prvej fáze dochádza k orezaniu takto upraveného polotovaru na prierez $S_o = 117,75 \text{ mm}^2$, preto veľkosť pretvorenia a redukcie pri výrobe daných drôtov ostane rovnaká. Nevýhodou tohto riešenia bola potreba úpravy vstupných valcov pri pretlačovaní a nákup vstupného polotovaru s priemerom $d_{polU} = 12,5 \text{ mm}$.

b) Návrh na úpravu technológie výroby drôtov pretlačovaním bez orezovania zmenou geometrie pretlačovacej hlavy pri zachovaní pôvodného priemeru vstupného polotovaru

Výpočet veľkosti skutočného pretvorenia a redukcie pri výrobe drôtu pretlačovaním bez orezovania pri zachovaní pôvodného priemeru vstupného polotovaru. Priemer vstupného polotovaru je $d_{pol} = 12,7 \text{ mm}$, prierez vstupného polotovaru je $S_{pol} = 126,61 \text{ mm}^2$.

A) Výpočet veľkosti pretvorenia pre drôt 9,5 x 4,5

Skutočného pretvorenie materiálu sa vypočíta podľa vzťahu (2.32):

$$\varphi = \ln \frac{S_{pol}}{S} \quad (2.32)$$

kde S_{pol} je počiatočný prierez polotovaru, vstupujúci do pretlačovacej hlavy bez orezania v mm^2 ($S_{pol} = 126,61 \text{ mm}^2$),

S – prierez drôtu po pretlačovaní mm^2 ($S = 9,5 \cdot 4,5 = 42,75 \text{ mm}^2$).

Veľkosť skutočného pretvorenia materiálu φ je:

$$\varphi = \ln \frac{S_{pol}}{S} = \ln \frac{126,61}{42,75} = 1,085 \quad (2.33)$$

Výpočet veľkosti redukcie R je:

$$R = \frac{S_{pol} - S}{S_{pol}} \cdot 100 = \frac{126,61 - 42,75}{126,61} \cdot 100 = 66,2 \% \quad (2.34)$$

B) Výpočet veľkosti pretvorenia pre drôt 10,5 x 1,65

Skutočného pretvorenie materiálu sa vypočíta podľa vzťahu (2.32), kde počiatočný prierez polotovaru, vstupujúci do pretlačovacej hlavy bez orezania je $S_{pol} = 126,61 \text{ mm}^2$ a prierez drôtu po pretlačovaní je $S = 10,5 \cdot 1,65 = 17,325 \text{ mm}^2$. Veľkosť skutočného pretvorenia materiálu φ potom je:

$$\varphi = \ln \frac{S_{pol}}{S} = \ln \frac{126,61}{17,325} = 1,988 \quad (2.35)$$

Výpočet veľkosti redukcie R je:

$$R = \frac{S_{pol} - S}{S_{pol}} \cdot 100 = \frac{126,61 - 17,325}{126,61} \cdot 100 = 86,3 \% \quad (2.36)$$

C) Výpočet veľkosti pretvorenia pre drôt 5,75 x 1,35

Skutočného pretvorenie materiálu sa vypočíta podľa vzťahu (2.32), kde počiatočný prierez polotovaru, vstupujúci do pretlačovacej hlavy bez orezania je $S_{pol} = 126,61 \text{ mm}^2$ a prierez drôtu po pretlačovaní je $S = 5,75 \cdot 1,35 = 7,763 \text{ mm}^2$. Veľkosť skutočného pretvorenia φ potom je:

$$\varphi = \ln \frac{S_{pol}}{S} = \ln \frac{126,61}{7,763} = 2,791 \quad (2.37)$$

Výpočet veľkosti redukcie R je:

$$R = \frac{S_{pol} - S}{S_{pol}} \cdot 100 = \frac{126,61 - 7,763}{126,61} \cdot 100 = 93,8 \% \quad (2.38)$$

Úpravou technológie, zmenou geometrie pretlačovacej hlavy pri zachovaní priemeru pôvodného polotovaru došlo k zvýšeniu veľkosti pretvorenia a redukcie, ale toto zvýšenie nie je výrazné, a preto ani neovplyvní významne výsledné vlastnosti drôtu. Výhodou tohto riešenia bolo odstránenie odpadu, vznikajúceho pri orezávaní a nemusel sa meniť priemer vstupného polotovaru, ktorý je dodávaný od externého dodávateľa.

2.6 Hodnotenie mikroštruktúry

Na posúdenie vplyvu procesu výroby drôtov technológiou pretlačovania bola sledovaná aj mikroštruktúra pred a po pretlačovaní.

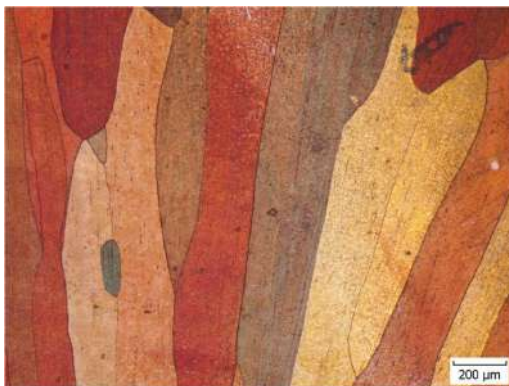
Prípravu vzorky sa realizovala v týchto krokoch: delenie materiálu (odber vzorky), označenie vzorky, zalievanie/zalisovanie, brúsenie, leštenie, zviditeľnenie štruktúry leptaním. Pri príprave vzoriek bolo dôležité zabrániť nežiaducej deformácii alebo tepelnému ovplyvneniu materiálu, aby nedošlo k zmene mikroštruktúry. Pre vzorku sa použili 3 brúsne kotúče so zrnitosťou 120, 240 a 600 μm , pričom boli nastavené frekvencie otáčania 300 s^{-1} a záťaž 30 N. Ďalej bolo aplikované mechanické leštenie pomocou diamantových pást so zrnitosťou 6, 3 a 1 μm , čím sa dosiahol hladký, lesklý povrch. Počas leštenia bolo nanášané na kotúč zrnáčadlo. Po každom leštení boli vzorky opláchnuté vodou a alkoholom, aby na nich neostali časti diamantov.

Na vzorkách bolo potom použité chemické leptanie, využitím vhodne zvoleného chemického roztoku kyseliny, alebo soli a dostatočného času leptania. Vzorky pred leptaním boli vždy vyčistené vatou a alkoholom. Po leptaní vzorky boli umiestnené pod tečúcu vodu a opláchnuté alkoholom a vysušené teplým vzduchom. Na leptanie bolo použité leptadlo určené pre zliatiny medi Cu-Zn a to 10 % roztok persíranu amónneho s časom leptania 30 s. Na Obr. 2.13 je uvedená mikroštruktúra elektrotroskovo pretavovanej medi (ETP) pred pretlačovaním.



Obr. 2.13. Mikroštruktúra elektrotroskovo pretavovanej medi (ETP) pred pretlačovaním

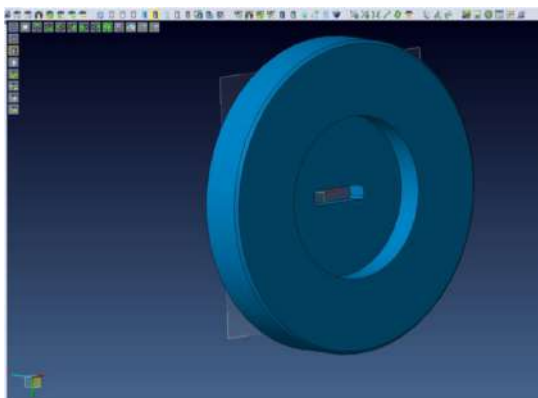
Na Obr. 2.14 je uvedená mikroštruktúra elektrotroskovo pretavovanej medi (ETP) na pozdĺžnom reze po pretlačovaní.



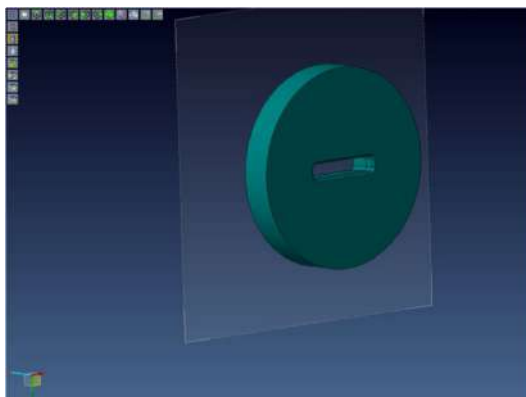
Obr. 2.14. Mikroštruktúra elektrotroskovo pretavovanej medi (ETP) po pretlačovaní

2.7 Ďalšie návrhy riešenia na zefektívnenie výroby v podmienkach firmy Vicente Torns Slovakia a. s.

Táto kapitola opisuje ďalšie návrhy riešenia na zefektívnenie výroby drôtov vo firme Vicente Torns Slovakia a. s., Veľké Kosihy. Návrhy riešenia vychádzali zo zmeny tvaru nástroja, alebo úpravy parametrov pretláčania. Prvá úprava sa týkala vonkajšej časti nástroja (Obr. 2.15), ktorý je z materiálu X40CRMOV5-1 (STN 41 9554) pričom vnútorná časť nástroja (Obr. 2.16) z materiálu Co28Cr6Mo by ostala nezmenená.



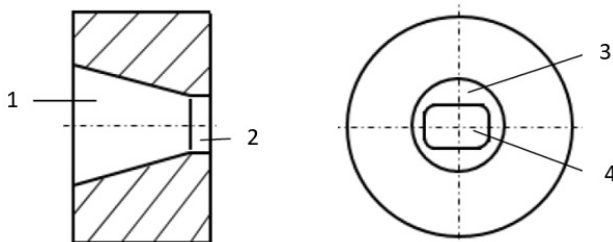
Obr. 2.15. Vonkajšia časť nástroja (materiál X40CRMOV5-1)



Obr. 2.16 .Vnútorá časť nástroja (materiál Co28Cr6Mo)

2.7.1 Návrh č. 1 – zmena geometrie pretlačovacej hlavy

Zmena geometrie pretlačovacej hlavy by si vyžadovala aj zmenu technológie výroby pretlačovacej hlavy pomocou medenej elektródy a vytvorenie modelu v CAD softvéri. Tento návrh spočíva v tom, že vonkajšia časť nástroja nebude hranatá ako na pôvodnom nástroji, ale by sa prierez postupne menil (zmenšoval) z kruhového prierezu na požadovaný obdĺžnikový prierez podľa vstupného polotovaru (Obr. 2.17).

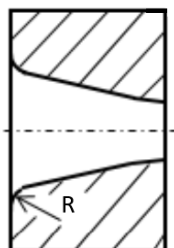


Obr. 2.17. Nová geometria pretlačovacej hlavy (návrh č.1)

1 – vstup polotovaru, 2 – výstup z pretlačovacej hlavy, 3 – tvar polotovaru, 4 – tvar drôtu na výstupe

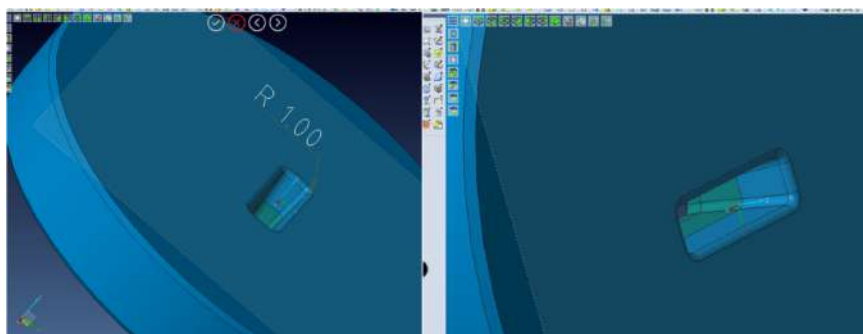
2.7.2 Návrh č. 2 – úprava pôvodnej pretlačovacej hlavy zaoblením hrany vonkajšej časti nástroja

Pri tomto návrhu ide o úpravu geometrie nástroja zaoblením ostrej hrany na vstupnej časti noža. Na pôvodnom nástroji je ostrá hrana. Táto hrana bola zaoblená na $R = 1 \text{ mm}$ (Obr. 2.18).



Obr. 2.18. Úpravu geometrie nástroja zaoblením ostrej hrany na vstupnej časti nástroja (návrh č. 2)

Na Obr. 2.19 je 3D model pretlačovacej hlavy so zaoblením hrany na vstupnej časti vonkajšej časti nástroja.



Obr. 2.19. 3D model nástroja so zaoblením vstupnej časti $R = 1 \text{ mm}$

Na modely je ostrá hrana vstupnej časti zaoblená na $R = 1 \text{ mm}$. Táto zmena spôsobí, že polotovar bude mať lepší vstup do nástroja.

Záver

Prípadová štúdia sa zaoberá zefektívnením technológie výroby drôtov vo firme Vicente Torns Slovakia a. s., Veľké Kosihy a hodnotením výsledných mechanických vlastností vyrábaných drôtov. Súčasťou prípadovej štúdie sú aj návrhy a ich realizácia za účelom zefektívnenia výrobného procesu pri pretlačovaní. Pri pretlačovaní boli navrhnuté úpravy pretlačovacieho nástroja, vedúce k zníženiu odpadu a teda k zníženiu spotreby materiálu.

Na základe vykonaných skúšok na vstupnom polotovare, ako aj na vybraných typorozmeroch vyrobených drôtov, sa zistili výsledné mechanické vlastnosti, a to medza klzu, pevnosť v ťahu, ťažnosť a kontrakcia. Výsledky potvrdili výborné mechanické vlastnosti vyrobených drôtov ako aj dobrú plasticitu vstupných polotovarov.

Pri výrobe drôtov pretlačovaním v dôsledku veľkého plastického pretvorenia materiálu φ , ktoré na základe výpočtov pre jednotlivé typorozmery drôtov dosahovalo hodnotu od 1,01 do 2,719 a tiež v dôsledku trenia v pretlačovacom nástroji pri kontinuálnom procese výroby, vzniká vysoká teplota, presahujúca teplotu rekryštalizácie T_{rek} , ktorá tiež ovplyvňuje výsledné vlastnosti drôtov.

Pri súčasnej výrobe týchto drôtov vzniká približne 7 až 8 % odpadu pričom ide o drahý vstupný polotovár. Znížením spotreby materiálu zavedením navrhovaných riešení aj napriek určitým nákladom na úpravu geometrie pretlačovacieho nástroja došlo k významnému zníženiu celkových nákladov na výrobu.

Zoznam bibliografických odkazov

1.2344/X40CrMoV5-1/19554/H13/TLH. 2019 [online] [cit. 2024-01-25] Dostupné na internete: <http://toolsteel.cz/1-2344-x40crmov5-1-19554-h13-tlh/>.

BLAŠČÍK a kol. 1988. *Technológia tvárnenia, zlievarenstva a zvárania*. Bratislava: ALFA/SNTL Bratislava, ISBN 063-563-87.

BAČA, J., BÍLIK, J. a TITTEL, V. 2010. *Technológia tvárnenia*. Bratislava: Nakladateľstvo STU. ISBN 978-80-227-3242-0.

Co-Alloy CoCr28Mo6/2.4979/F75. 2020 [online] [cit. 2024-01-25] Dostupné na internete: https://www.slm-solutions.com/fileadmin/Content/Powder/MDSA/MDS_CO-Alloy_CoCr28Mo6_1219_EN.pdf.

EGERMEIER, V. , BALVAR, J. , DUCHOŇ, J. , ŠINGEL, J. a PŘIKRYL, J., 1976. *Řízení ochlazovaný válcovaný drát a tažený drát*. Praha: TEVÚH, typové číslo: 735 212 3207.

FOREJT, M., a PÍŠKA, M. 2006. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: CERM, 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

HRIVŇÁK, A., PODOLSKÝ, M. a DOMAZETOVÍČ, V., 1992. *Teória tvárnenia a nástroje*. Bratislava: ALFA. ISBN 80-05-01032-X.

MORAVEC, J. a BÍLIK, J. 2017. *Tvárníacie stroje a nástroje*. Žilina: vydavateľstvo UNIZA. ISBN 978-80-554-1339-6.

ŠUGÁR, P. a ŠUGÁROVÁ, J. 2029. *Výrobné technológie – zlievanie, zváranie, tvárnenie*. Zvolen: TU Zvolen, 2009. 291 s. ISBN 978-80-89090-587.

Ťahanie drôtov. 2017. [online] [cit. 2017-12-10] Dostupné na internete: www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/.../Pages_from_41lecke201106180629_sajat.pdf.

KOSZTOLÁNSZKA, E. 2019. *Zvýšenie efektívnosti výroby drôtov vo firme Vincente Torns Slovakia, a. s.* Bakalárska práca. Trnava: MTF STU.

TITTEL, V. 2009. *Technológia ťahania drôtu*. 1. vyd. Trnava: AlumniPress, 2009. 83 s. ISBN 978-80-8096-087-2. [online] [cit. 2024-01-25] Dostupné na internete: <http://www.mtf.stuba.sk>.

Vicente Torns Group. 2019. [online] [cit. 2024-01-25] Dostupné na internete: <https://www.vicentetorns.com/en/productos/>.

Podakovanie

Tento príspevok vznikol v rámci projektu: *Implementácia inovatívnych foriem učenia a praktického tréningu do vzdelávania v oblasti výrobných technológií a výrobného manažmentu s cieľom zvýšiť atraktivnosť štúdia a podporiť rozvoj prierezových kompetencií absolventov (026STU-4/2023)*, s podporou agentúry KEGA MŠVVaŠ SR.

3 KOMPLEXNÁ ANALÝZA DIAMANTU PODOBNÝCH (DLC) POVLAKOV

LUDROVCOVÁ, B., – SAHUL, M.

Úvod

Technológie povlakovania predstavujú širokú skupinu procesov, ktorých cieľom je naniest' tenkú vrstvu materiálu na povrch substrátu. Tieto vrstvy môžu zlepšiť vlastnosti povrchu, ako sú tvrdosť, odolnosť voči opotrebeniu, korózii, teplotným vplyvom alebo treniu. Povlakovanie sa využíva v rôznych priemyselných odvetviach vrátane strojárstva, automobilového, leteckého a zdravotníckeho priemyslu. Medzi najbežnejšie technológie povlakovania patria fyzikálne (PVD) a chemické (CVD) depozičné metódy.

DLC (Diamond-Like Carbon) povlaky sú špeciálnym typom uhlíkových tenkých vrstiev, ktoré kombinujú niektoré výnimočné vlastnosti diamantu s jednoduchšou štruktúrou amorfného uhlíka. Tieto povlaky sa vyznačujú mimoriadne vysokou tvrdosťou, nízkym koeficientom trenia, chemickou inertnosťou a výbornou odolnosťou voči opotrebeniu. Vďaka týmto vlastnostiam sa DLC povlaky používajú v širokej škále aplikácií – od komponentov v automobilovom a strojárenskom priemysle až po medicínske implantáty a nástroje.

Téma povlakovania, ako aj modifikácia a optimalizácia vlastností povlakov sú v súčasnosti aktuálne a je im venovaná aj nasledujúca prípadová štúdia. V prvej kapitole je uvedená stručná charakteristika jednotlivých technológií povlakovania, s užším zameraním sa práve na technológie PVD a CVD, pomocou ktorých sú vyrábané DLC povlaky. Druhá kapitola je venovaná vlastnostiam DLC povlakov a metódam, ktorými sa tieto vlastnosti hodnotia. Posledná, tretia kapitola je zameraná na experiment, pri ktorom sa skúmal vplyv depozičných parametrov povlakovania ta-C povlakov na mechanické vlastnosti vyhotovených vzoriek.

3.1 Technológia povlakovania

Oblasť technológie povlakovania (coating technology) sa zaoberá aplikáciou tenkých povlakov na povrchy rôznych substrátov s cieľom zlepšiť ich výsledné vlastnosti. Ich vývoj bol motivovaný potrebou predĺžiť životnosť priemyselných zariadení, zvýšiť energetickú účinnosť a zabezpečiť bezpečnosť v náročných podmienkach priemyselnej výroby. Technológia povlakovania je pomerne široká a zahŕňa rôzne metódy nanášania, ako sú fyzikálne a chemické depozičné procesy, elektrochemické techniky, či lakovanie. Nachádza široké uplatnenie v automobilovom priemysle, elektronike, medicíne a stavebníctve. Pokroky v oblasti nanotechnológií a materiálového inžinierstva umožnili vývoj špecifických funkčných povlakov s vlastnosťami, ako sú samoregeneračná schopnosť, antibakteriálne účinky alebo hydrofóbnosť, čím sa ich využitie rozšírilo aj do oblasti letectva a zdravotníctva.

Povlaky sú vyvíjané s ohľadom na zlepšenie ich funkčnosti a využiteľnosti. V súčasnosti sa najčastejšie využívajú na ochranu materiálov pred koróziou, opotrebením, chemickým poškodením, príp. zlepšujú mechanické, či estetické vlastnosti hotových výrobkov. Funkčné povlaky musia spĺňať špecifické funkcie, ktorými môžu byť napr. elektrická vodivosť, tepelná izolácia alebo antireflexné vlastnosti. Do tejto skupiny možno zaradiť povlaky pre elektronické zariadenia so zlepšenou elektrickou vodivosťou, ako aj antireflexné povlaky pre šošovky. Dekoratívne povlaky sa používajú predovšetkým na zlepšenie vzhľadu povrchov, napr. príbory a kuchynské riady, kúpeľňové armatúry, hodinky, automobilové diely a iný spotrebný tovar. Medzi povlaky sa zaraďujú aj farby, laky a galvanické povrchové úpravy. (Kathavate a Deshpande, 2022)

V strojárstve zohrávajú povlaky kľúčovú úlohu pri zlepšovaní vlastností materiálov, ako sú odolnosť voči opotrebeniu, korózii, zvýšeným teplotám a mechanickému namáhaniu. Ochranné vrstvy sa aplikujú na kovové, keramické alebo polymérne súčiastky s cieľom predĺžiť ich životnosť a zlepšiť ich výkonnosť počas aktívneho využívania. Medzi najbežnejšie používané povlaky patria povlaky deponované metódami PVD (Physical Vapor Deposition; fyzikálna depozícia z pár) a CVD (Chemical Vapor Deposition; chemická depozícia z pár), ktorými sa povlakujú rezné a obrábacie nástroje, čím sa znižuje trenie a zvyšuje odolnosť pri vysokých teplotách. Galvanické povlaky, vyhotovené metódami chrómovania alebo zinkovania, sa často používajú na ochranu oceľových konštrukcií pred koróziou. Žiarovo striekané povlaky (thermal spraying; napr. keramické bariérové vrstvy) sa aplikujú na lopatky turbín v leteckom a energetickom priemysle na zvýšenie ich tepelnej stability. Polymérne povlaky (napr. teflónové vrstvy), majú svoje uplatnenie pri výrobe ložísk a súčiastok vystavených chemickým látkam a inému agresívnemu prostrediu. Technológie povlakovania sú aj v súčasnosti predmetom výskumu a vývoja a prispievajú k inováciám v priemysle. (Cha a Erdemir, 2015; Ramezani a kol., 2023)

Povlaky môžu byť vyhotovené z rôznych druhov materiálov, pričom každý typ má svoje špecifiká. Základnými druhmi z hľadiska typu použitého materiálu sú povlaky keramické, kovové, polymérne, organické, anorganické, ako aj kompozitné.

Keramické povlaky sú vyrobené z anorganických materiálov. Používajú sa pri vysokoteplotných aplikáciách a sú cenené pre ich odolnosť proti opotrebeniu a koróziivzdornosť. Nanášajú sa najmä plazmovým striekaním, alebo tzv. sol-gel metódou. Bežnými keramickými povlakmi sú napr. nitrid titánu (TiN), nitrid chrómu (CrN), AlTiN, karbid kremíka (SiC), oxid hlinitý (Al₂O₃) a oxid zirkoničitý (ZrO₂). TiN je často používaný na rezných nástrojoch a medicínskych implantátoch pre svoju vysokú tvrdosť a odolnosť proti opotrebeniu. Vyznačuje sa zlatou farbou. Karbid volfrámu (WC) sa používa v tvrdokovových povlakoch (napr. WC/Co) pre jeho extrémnu tvrdosť a odolnosť proti opotrebeniu, často sa aplikuje v oblasti rezných nástrojov. Špecifické sú svojou vysokou tvrdosťou, tepelnou stabilitou a nízkou tepelnou vodivosťou. (Chate, Kulkarni a Nikhil, 2023; Pancraciou, 2018; Quadir a kol., 2023; Sahin, Misirli a Özkan, 2015; Šulhánek a kol., 2023; Tiwari a kol., 2024; Zhang a kol., 2015; Zanurin a kol., 2022)

Kovové povlaky sa používajú na ochranu materiálov proti korózii. Vyznačujú sa vynikajúcou elektrickou vodivosťou a využívajú sa aj na dekoratívne účely. Sú charakteristické tvrdosťou a odolnosťou proti opotrebeniu, bežne sa používajú v nástrojárskom priemysle a strojárstve. Depozičné procesy nanášania kovových povlakov zahŕňajú PVD a CVD technológie, elektroplátovanie a galvanizáciu, ktorými sa nanášajú povlaky na báze Cr, Ni, Zn, Cu, Ag, atď. Chrómové povlaky sa používajú pre ich vysokú tvrdosť a odolnosť proti korózii a aplikujú sa v automobilovom a leteckom priemysle. Zinkové povlaky sa používajú na ochranu proti korózii, v procesoch pozinkovania sa bežne používajú na oceľových konštrukciách. Medené povlaky sa aplikujú pre ich vynikajúcu elektrickú vodivosť a často sa používajú v elektronike. (Berger, 2015; Cha a Erdemir, 2015)

Polymérové povlaky sa používajú v širokej škále aplikácií, od automobilového priemyslu po elektroniku, a plnia ochrannú funkciu pri zachovaní nízkej hmotnosti a flexibility materiálu. Významnými skupinami sú epoxidové povlaky, vyznačujúce sa odolnosťou proti chemickému pôsobeniu a vlhkosti, ako aj polyuretánové povlaky používané najmä pre ich odolnosť proti opotrebeniu a trvanlivosť.

Epoxidové povlaky majú vysokú trvanlivosť a chemickú stabilitu, pričom sa vyznačujú najmä svojou dobrou príľnavosťou. Sú veľmi populárne v priemyselných aplikáciách

na ochranu kovových povrchov pred koróziou, najmä tam, kde je potrebná vysoká odolnosť proti chemikáliám (nádrže, potrubia). Ďalej sa používajú na ochranu betónových a oceľových povrchov pred vlhkosťou, chemikáliami a mechanickým poškodením. Sú bežné pri ochrane podláh priemyselných hál, skladov alebo garáží. Ďalšou významnou aplikáciou sú karosérie automobilov v miestach, ktoré sú vystavené zvýšenej vlhkosti a cestnej soli. Používajú sa aj na ochranu povrchov, ktoré prichádzajú do priameho kontaktu s potravinami, ako sú kontajnery alebo zásobníky, kde je dôležitá odolnosť proti chemickým vplyvom a jednoduchá údržba z hľadiska čistoty. Polyuretánové povlaky sú známe svojou oteruvzdornosťou a odolnosťou voči pôsobeniu chemikálií, UV žiareniu a nepriaznivých poveternostných podmienok. Sú flexibilné, elastické a poskytujú vysokú mechanickú pevnosť, čo ich robí vhodnými na aplikácie, ktoré vyžadujú trvácnosť a odolnosť voči poškriabaniu. Najčastejšie sa používajú v automobilovom priemysle (na ochranu karosérií), stavebníctve (na ochranu podláh a povrchov), nábytkárstve (na nátery drevených povrchov) a v priemyselných aplikáciách (na ochranu kovových povrchov pred opotrebovaním a koróziou). Sú tiež obľúbené pri výrobe športových povrchov a náteroch na vonkajšie použitie (ako napr. terasy a fasády). (Chhipa, Sharma a Bagha, 2024; A Closer Look at the Types of Coating Materials, 2025; Ren a kol., 2021; Wei a kol., 2020)

Kompozitné povlaky kombinujú organické a anorganické materiály, aby sa dosiahli špecifické vlastnosti. Používajú sa na zvýšenie trvanlivosti, ochrany proti korózii alebo tepelnej stability. (Medvedovski, 2023; Walsh, Wang a Zhou, 2020)

3.1.1 Základné rozdelenie metód povlakovania

Pojem povlakovanie zahŕňa množstvo metód a technológií pri ktorých dochádza k nanášaniu novej vrstvy na povrch materiálu. Metódy povlakovania možno rozdeliť podľa fyzikálnych a chemických princípov, ktoré sa používajú pri ich nanášaní. (Ramezani a kol., 2023) Uvedené je stručné delenie, pričom technológie podstatné z hľadiska výroby DLC povlakov sú predmetom samostatných podkapitol.

1. Fyzikálna depozícia z pár (PVD – Physical Vapor Deposition)

Princíp: Materiál povlaku sa odparuje alebo odprašuje vo vákuu a potom kondenzuje na substráte.

Používané materiály: Kovy (Ti, Al, Cr), nitridy (TiN, CrN), oxidy (Al_2O_3 , TiO_2).

Výhody: Vysoká tvrdosť, odolnosť proti opotrebeniu, ekologickosť (bez toxických odpadov).

Nevýhody: Vysoké náklady, nutnosť vákua, limitovaná príľnavosť na niektoré materiály.

2. Chemická depozícia z pár (CVD – Chemical Vapor Deposition)

Princíp: Chemická reakcia plynných prekurzorov vedie k tvorbe pevného povlaku na povrchu substrátu.

Používané materiály: Karbidy (SiC , TiC), nitridy (TiN, Si_3N_4), diamantové povlaky.

Výhody: Vysoká tepelná a chemická odolnosť, homogénne vrstvy.

Nevýhody: Vysoké teploty procesu, tvorba vedľajších chemických produktov, vyššie náklady.

3. Elektrochemické metódy povlakovania

Princíp: Do tejto skupiny povlakovania patria technológie, pri ktorých je princíp tvorby povlakov založený na elektrochemických reakciách medzi materiálmi. Možno sem zaradiť elektrolytické povlakovanie, anodizáciu, galvanické pokovovanie, elektrodepozíciu.

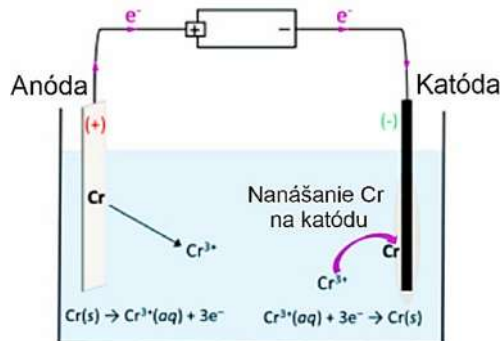
Galvanické pokovovanie (Obr. 3.1) je elektrochemický proces, pri ktorom sa tenká vrstva kovu nanáša na povrch materiálu (najčastejšie kovu) pomocou prúdu. Kovové ióny sa redukujú z elektrolytu a vytvárajú povlak na katóde (substráte). Proces prebieha v elektrolyte obsahujúcom ióny kovu, ktorý predstavuje budúci povlak. Povlakovaný predmet (katóda) je ponorený do elektrolytu a pripojený k negatívnej elektróde, zatiaľ čo anóda (pozitívna elektróda) je obvykle vyrobená z kovu, ktorý sa má nanášať. Prúdom prechádzajúcim elektrolytom dochádza k redukcii kovových iónov a ich ukladaniu na povrch substrátu.

Používané materiály: Nikel (na ochranu proti korózii a zlepšenie vzhľadu), meď (na zlepšenie vodivosti), striebro (na elektrické aplikácie a dekoratívne účely), zinok (proti korózii), chróm (dekoratívne účely a zvýšenie odolnosti proti oderu), zlato (v elektronike pre kvalitné elektrické spoje). Elektrolyty sú chemické roztoky použité v závislosti od požadovaného typu kovového povlaku, napr. síran nikelnatý (pre Ni), síran meďnatý (pre Cu), roztok kyanidu strieborného (pre Ag), oxid chrómový (pre Cr).

Výhody: Povlaky sú rovnomerné, zlepšujú pevnosť, koróziivzdornosť aj estetiku povrchov. Je možno nanášať veľmi tenké vrstvy kovov s vysokou presnosťou. Počas procesu depozície je možná presná kontrola hrúbky povlaku, čo je dôležité v mnohých aplikáciách.

Nevýhody: Aj keď možno kontrolovať hrúbku povlaku, proces je obmedzený na relatívne tenké vrstvy v závislosti od aplikovanej metódy a dĺžky procesu. Pri zložitých tvaroch môžu vzniknúť nerovnomernosti povlakov. Proces vyžaduje správne nastavenie vstupných parametrov (prúdová hustota, teplota a pH elektrolytu) aby sa dosiahli požadované vlastnosti povlakov. Nastavenie parametrov komplikuje možná korózia anódy (budúci povlak), čo vedie k menšej účinnosti a efektívnosti týchto technológií. Povlaky môžu byť náchylné na tvorbu mikrotrhlín spolu s väčším množstvom pórov, čo môže negatívne ovplyvniť ich odolnosť proti korózii a mechanickému namáhaniu. Používaním toxických elektrolytov dochádza k zaťažovaniu životného prostredia a je nutné dbať na ich správnu likvidáciu a manipuláciu s nimi. Možnosť poškodenia alebo korózie základného materiálu v dôsledku nesprávneho nastavenia parametrov procesu.

Použitie: Automobilový priemysel (ochrana kovových častí pred koróziou), elektronika (na vytváranie kvalitných elektrických kontaktov, napríklad zlaté alebo strieborné povlaky), klenotníctvo (pre dekoratívne povlaky ako zlato a striebro), strojárstvo (na ochranu nástrojov pred opotrebovaním), lodný priemysel (na ochranu pred koróziou v slaných vodách).



Obr. 3.1. Princíp galvanického povlakovania – atómy Cr sú oxidované na ióny Cr^{3+} ktoré sú potom nanášané na katódu z odlišného kovu (Introduction the galvanic process, 2025)

4. Žiarové striekanie (thermal spraying)

Princíp: Materiál vo forme prášku, drôtu alebo tyče je tavený pomocou elektrických (plazma alebo oblúk) alebo chemických (plameň) zdrojov energie, pričom je vysokorýchlostným prúdom vzduchu unášaný v podobe mikrometrických častíc na povrch substrátu (Obr. 3.2). Častice sa po náraze na povrch plasticky deformujú, spájajú a tuhnú, čím dochádza k rastu vrstvy povlaku (Obr. 3.3). Pri tejto technológii sú okrem technologických parametrov (napr. vzdialenosť dýzy od substrátu) dôležitými aj tvar a hustota nanášaného materiálu, veľkosť častíc (optimálna je 10 až 45 μm pre rovnomerné nanášanie). Rýchlosť častíc môže dosahovať až $1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. (Amin a Panchal, 2016; Gérard, 2006; Montavon a kol., 1997)

Na tomto princípe vzniklo viacero podobných technológií, známymi sú predovšetkým:

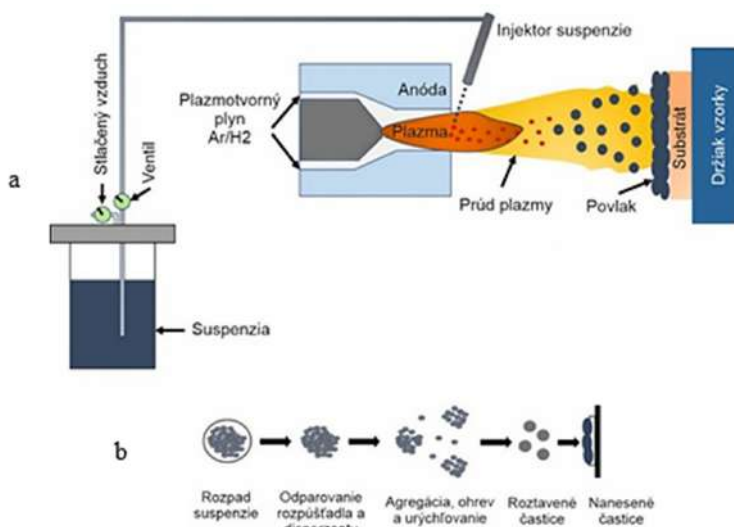
Plazmové striekanie – materiály (napr. oxidy) sú tavené vysokoteplotným plazmovým lúčom, ktorý je vhodný pri povlakovaní žiaruvzdornými materiálmi.

Plameňové striekanie – na tavenie a rozprašovanie materiálu sa používa horák.

Oblúkové striekanie – energetickým zdrojom je elektrický oblúk, ktorý taví väčšinou materiál v podobe drôtu.

High-Velocity Oxy-Fuel (HVOF) – je technológia žiarového striekania, pri ktorej sa materiál (obvykle prášok) ohrieva a urýchľuje pomocou kyslíkového plameňa. Tento proces vytvára veľmi husté povlaky s dobrou adhéziou a vynikajúcimi funkčnými vlastnosťami, ako je odolnosť proti opotrebeniu, korózii a tepelná odolnosť.

Cold spraying – je technológia nanášania povlakov, pri ktorej sa pevné častice (1 až 50 μm) urýchľujú pomocou konvergentno-divergentnej trysky na rýchlosti až $1200 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pomocou nadzvukového prúdu plynu (napr. N_2 alebo He), pričom teplota prúdu dosahuje do 1100°C . Na rozdiel od tradičných metód žiarového striekania sa častice počas procesu depozície výrazne netavia, čím dochádza k menšiemu ovplyvneniu pôvodných vlastností materiálu. (Amin a Panchal, 2016; Mittal a Shiladytia, 2022; Li a kol, 2022)



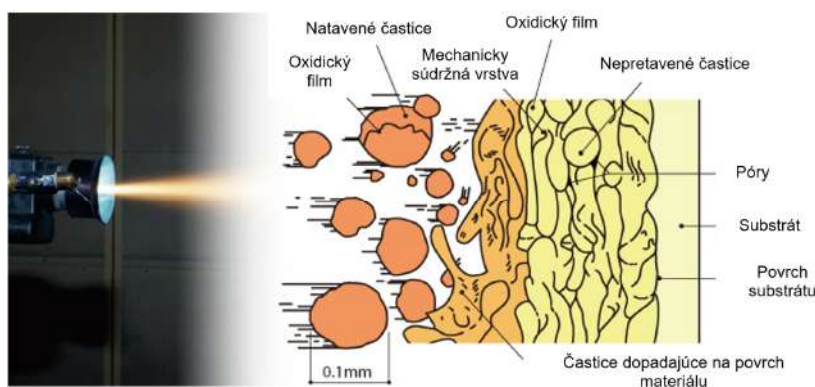
Obr. 3.2. Princíp žiarového striekania (Osaka Fuji Corporation, 2025)
a – schéma procesu plazmového striekania, b – mechanizmus tvorby povlaku

Používané materiály: kovy (Al, Zn), keramika (ZrO_2 , Al_2O_3 , WC) termoplastické materiály pre nízko teplotné aplikácie.

Výhody: Hrubejšie vrstvy až do 10 mm, vysoká odolnosť proti opotrebeniu a teplotám, oprava a renovácia opotrebovaných súčiastok.

Nevýhody: Poréznosť povlakov, zlá aplikovateľnosť v otvoroch a dutinách, nutnosť dodatočného opracovania, vyššia spotreba materiálu, vysoké náklady na zariadenie. Pri plameňovom striekaní dochádza k vysokej tvorbe oxidov.

Použitie: Ochrana proti korózii, napr. striekanie zinku alebo hliníka na oceľové konštrukcie. Renovácia, oprava opotrebovaných častí, ako sú hriadele alebo ložiská. Tepelná izolácia, aplikácia keramických materiálov na zvýšenie tepelnej odolnosti. Technológie žiarového striekania nachádzajú uplatnenie aj v automobilovom, leteckom a stavebnom priemysle. (Xu, Wang a Jiang, 2022; Meng, Meng a Li, 2022)



Obr. 3.3. Schéma rastu povlaku pri žiarovom striekaní (Osaka Fuji Corporation, 2025)

5. Metóda Sol-gel

Princíp: Sol-gel metóda (Obr. 3.4) je chemický proces používaný na výrobu anorganických povlakov, ako sú oxidy kovov, keramika a sklo. Tento postup zahŕňa premenu koloidnej disperzie na pevnú sieťovú štruktúru pomocou chemických reakcií, ako je hydrolýza a kondenzácia. Ako prekursor sa používa kovový alkoxid alebo iná zlúčenina, ktorá sa rozpustí v rozpúšťadle. Prekursor reaguje s vodou, čím vznikajú hydroxylové skupiny a koloidné častice (tzv. sol) – dochádza k hydrolýze. Koloidné častice sa spájajú a vytvárajú pevnú sieťovú štruktúru (tzv. gel) kondenzáciou. Gel podlieha starnutiu, čím sa zvýši jeho pevnosť a potom sa suší, aby sa odstránilo rozpúšťadlo a voda. Ďalej ho možno tepelne spracovať na zvýšenie hustoty a zlepšenie mechanických vlastností. (Rahman, 2021)

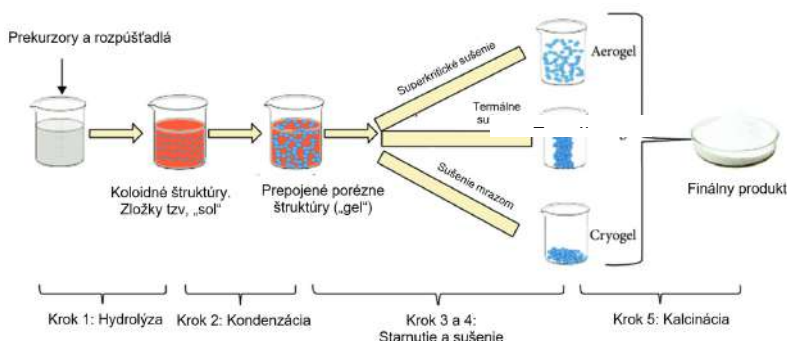
Používané materiály: Prekursori kovov, medzi ktoré patria metalo-organické zlúčeniny, ako sú alkoxidy kovov (napr. titán-tetraisopropoxid, hliníkový isopropoxid), ktoré slúžia na tvorbu oxidov. Na kontrolu pH a reakcií v sol-gel procese sa používajú zásady a kyseliny, napr. kyselina octová alebo amoniak. Pri tvorbe „sol-“, roztoku sa používajú riedidlá a rozpúšťadlá, napr. alkohol a voda.

Výhody: Proces umožňuje presnú kontrolu chemického zloženia materiálu a štruktúry, bez nutnosti použitia vysokých teplôt, čím sa šetrí energia a umožňuje použitie teplotne citlivých substrátov (napr. oxidu titánu, oxidu zinočnatého, oxidu hliníka a ďalších keramických

materiálov). Týmto spôsobom vznikajú homogénne povlaky s jemnozrnnou štruktúrou a nízkou drsnosťou, ideálne na výrobu tenkých vrstiev a nanomateriálov.

Nevýhody: Príprava solného roztoku, tvorba gélu a nasledujúce sušenie a kalenie môže trvať dlhší čas než iné metódy. Vytvorené materiály môžu byť menej husté a porézne, čo môže mať vplyv na ich mechanické vlastnosti. Ak nie je proces dobre kontrolovaný, môže vzhľadom na použitie niektorých chemikálií dôjsť k nežiaducej kontaminácii finálnych produktov.

Použitie: Sol-gel metóda sa často využíva v oblasti výroby optických a elektrických materiálov, nanotechnológií, katalyzátorov, senzorov a ochranných povlakov. Je populárna aj ako antireflexný alebo hydrofóbny povlak, ako aj pri výrobe keramických povlakov. (Prabakaran a Rajan, 2021; Rahman, 2021)



Obr. 3.4. Schéma etáp sol-gel metódy (Bokov a kol, 2021)

6. Metódy nanášania organických a polymérnych povlakov

Princíp: Kvapalné alebo práškové polyméry sa aplikujú na substrát a potom sa sušia alebo vytvrdzujú. Tieto techniky sa bežne nazývajú skôr povrchovými úpravami, ale z hľadiska princípu možno nazvať ich aj technológiami povlakovania. Táto skupina zahŕňa farbenie, lakovanie, sprejovanie, namáčanie, povlakovanie odstredivou silou – spin coating, ink-jet printing atď.

Používané materiály: Epoxidové, polyuretánové, akrylové a fluoropolymérové laky, nátery a vrstvy. Tieto procesy sa používajú na ochranu, dekoráciu alebo zlepšenie funkčných vlastností povrchov materiálov.

Výhody: Ochrana pred koróziou, široká škála farieb a dizajnov, jednoduchá aplikácia.

Nevýhody: Po dlhšom vystavení pôsobeniu UV žiarenia dochádza k ich degradácii.

Použitie: Polymérne a organické povlaky sa široko využívajú v elektronike na vytváranie funkčných vrstiev, ako sú fotorezisty a flexibilné obvody, ako povlaky na potravinách a medicínskych produktoch, antikoročné povlaky v automobilovom a leteckom priemysle, ako aj povlaky na dekoratívne účely. Kľúčovú úlohu zohrávajú aj v medicínskych zariadeniach ako biokompatibilné povlaky, v energetike pre povlakovanie solárnych článkov a batérií, v optike ako antireflexné a ochranné vrstvy. Ďalej sa aplikujú na textílie pre svoje hydroizolačné a antimikrobiálne vlastnosti, ako aj v stavebníctve, kde sa aplikujú najmä na kovy a drevo. Sú bežnými povlakmi na predmetoch dennej potreby, napr. v domácnosti, nábytkárstve, architektúre, športovom náčiní, náradí atď. (Jones, Nichols a Pappas, 2017; Sharma a kol., 2021; Zheng, 2019)

3.1.2 PVD a CVD technológie povlakovania

Rozvoj PVD a CVD technológií sa začal v polovici 20. storočia a dnes sú neoddeliteľnou súčasťou moderných priemyselných aplikácií. Technológie PVD a CVD sa používajú na vytváranie širokého spektra povlakov, ktoré majú obrovský priemyselný význam. PVD, ktorá využíva fyzikálne procesy ako odparovanie a naprašovanie, sa prvýkrát uplatnila v optike a elektronike, zatiaľ čo CVD, založená na chemických reakciách, sa rozvíjala súbežne s oblasťou polovodičov.

Prvé komerčné aplikácie PVD sa začali až v 60. rokoch 20. storočia, keď sa táto technológia začala používať na depozíciu povlakov na rezných nástrojoch. CVD technológia našla svoje prvé významné uplatnenie v polovodičovom priemysle v 50. rokoch, kde sa využívala na výrobu tenkých povlakov pre tranzistory. Jedným z prvých významných patentov pre CVD bol patent Union Carbide z roku 1952, ktorý detailne opísal proces výroby povlakov na báze kremíka. PVD bola komerčne rozvinutá o niekoľko rokov neskôr, pričom kľúčové patenty pochádzajú z USA a Nemecka. (Jong-Hee a Sudarshan, 2001)

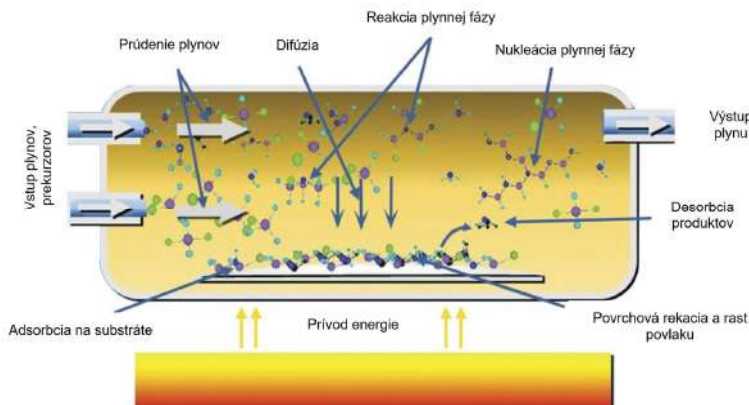
Obe technológie, PVD aj CVD, umožňujú vytvárať tenké a odolné vrstvy, ktoré významne zvyšujú životnosť a výkonnosť nástrojov a súčiastok. Ich kombinácia a rozmanité aplikácie robia z týchto technológií nenahraditeľnú súčasť modernej výroby a materiálového výskumu. Tieto povlaky sú široko používané v nástrojárskom priemysle, elektronike a ďalších oblastiach.

Medzi priemyselne najpoužívanjšie povlaky, ktoré možno aplikovať oboma spomínanými technológiami, patrí nitrid titánu (TiN), ktorý sa vyznačuje vysokou tvrdosťou a odolnosťou proti opotrebeniu, a oxid hlinitý (Al_2O_3), známy pre svoju výbornú teplotnú stabilitu a odolnosť proti korózii. Spoločné uplatnenie našli aj pri vývoji vesmírnych technológií, pri ochrane satelitov pred extrémnymi podmienkami vo vesmíre – napr. povlaky na satelitoch GPS a Hubbleovom teleskope. Zaujímavosťou je, že tieto technológie sa používajú aj na výrobu šperkov, pretože PVD vytvára trvanlivé a lesklé povrchy, prípadne v medicíne, kde sa CVD využíva pri výrobe povlakov na biokompatibilných implantátoch. Súčasný výskum sa zameriava na vývoj povlakov pre kvantové počítače, kde sú potrebné vrstvy vyrobené s extrémnou presnosťou. Ďalšou v súčasnosti mimoriadne populárnou a dôležitou oblasťou je povlakovanie pokročilých baterií. (Maske a More, 2024)

Budúcnosť týchto technológií smeruje k ešte vyššej presnosti a širšej škále aplikácií pre nové materiály a zariadenia, pričom sú globálne využívané od oblasti automobilového priemyslu až po vesmírnu technológiu. PVD a CVD sú dôkazom toho, že aj vrstvy s minimálnou hrúbkou sú schopné mať výrazný vplyv na život, od produktov bežného používania až po špičkový výskum.

3.1.2.1 Chemická depozícia pár – CVD povlakovanie

Technológia CVD (Obr. 3.5) je založená na chemickom princípe, pri ktorom plynné prekursor reagujú a rozkladajú sa na povrchu substrátu, čím sa vytvárajú rovnomerné vrstvy s vysokou čistotou. Tento proces prebieha pri zvýšených teplotách (300 až 1200 °C) v kontrolovanom prostredí reaktora a pozostáva z viacerých etáp. Prvou je zavedenie reaktívnych prekursorových plynov do komory. Potom sú molekuly prekursora transportované k povrchu substrátu. Na povrchu substrátu dochádza k reakcii, pričom vznikajú stabilné monoatómne vrstvy. (Haubner, 2013)

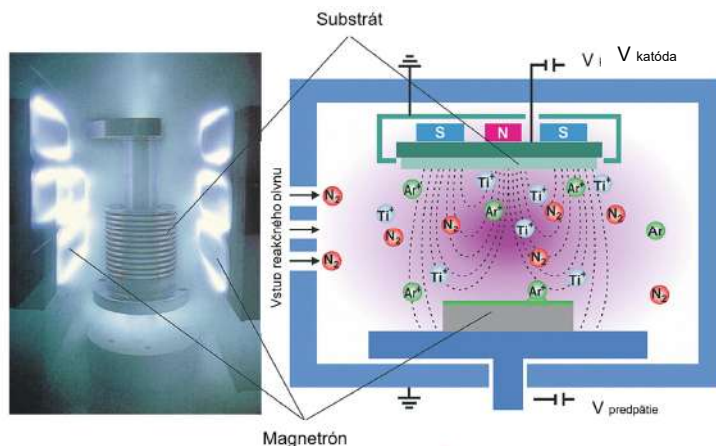


Obr. 3.5. Princíp CVD povlakovania (Chemical Vapor Deposition Physics, 2025)

Používané povlakové materiály zahŕňajú kovy, ako napr. volfrám a titán, keramické zlúčeniny, ako karbid kremíka (SiC) a nitrid kremíka (Si_3N_4), ako aj diamantové a uhlíkové povlaky, ktoré nachádzajú široké uplatnenie v elektronike a pri povlakovaní nástrojov s extrémnou odolnosťou. CVD technológia je populárna pri výrobe polovodičov, kde sa nanášajú tenké vrstvy oxidu kremičitého (SiO_2) v integrovaných obvodoch, a v automobilovom priemysle, kde zvyšuje odolnosť súčiastok motora voči opotrebeniu a vysokým teplotám. Zaujímavým využitím je aj tvorba syntetických diamantových povlakov, ktoré sú takmer rovnako tvrdé ako prírodný diamant a aplikujú sa v optike, medicíne a pri výrobe rezných nástrojov. CVD sa využíva aj vo vesmírnom výskume, kde agentúra NASA aplikuje túto technológiu na ochranu komponentov raketoplánov pred extrémnymi podmienkami. Táto metóda umožňuje presnú kontrolu hrúbky a zloženia povlakov, čím prispieva k vývoju moderných materiálov s jedinečnými vlastnosťami. (Vahlas a kol., 2006)

3.1.2.2 Fyzikálna depozícia pár – PVD povlakovanie

Fyzikálna depozícia z pár (PVD) (Obr. 3.6) je proces, pri ktorom sa pevný materiál odparuje alebo odprašuje vo vákuu a potom kondenzuje na povrchu substrátu, čím vytvára tenkú vrstvu. Tento proces prebieha pri nižších teplotách ako CVD (zvyčajne pod $600\text{ }^\circ\text{C}$) a zahŕňa metódy ako naprašovanie (sputtering) a odparovanie (evaporation). Deponované materiály zahŕňajú kovy, ako titán (Ti), chróm (Cr) a hliník (Al), ako aj zlúčeniny, ako nitrid titánu (TiN) a oxid hlinitý (Al_2O_3), ktoré sa vyznačujú vysokou tvrdosťou a odolnosťou voči opotrebeniu. PVD technológia sa široko využíva v strojárstve na povlakovanie rezných nástrojov, čím sa predlžuje ich životnosť a znižuje sa trenie v procese obrábania. V automobilovom priemysle sa používa na vytvorenie dekoratívnych a funkčných povlakov na komponentoch vystavených mechanickému namáhaniu. V elektronike sa uplatňuje pri výrobe tenkovrstvových tranzistorov a optických povlakov, napríklad na antireflexné vrstvy šošoviek okuliarov. PVD metóda je ekologickejšia alternatíva k galvanickému pokovovaniu, pretože nevyužíva toxické chemikálie a produkuje minimálne množstvo odpadu. Vďaka vysokej príľnavosti a kvalite povlakov je táto metóda neoddeliteľnou súčasťou moderného priemyslu a vývoja nových materiálov. (Deng a kol., 2020)



Obr. 3.6. Princíp magnetrónového naprašovania, kde Ar a N_2 sú katióny plynov, pričom Ar je plazmotvorný plyn; fialovou je znázornená plazma a Ti sú ióny z katódy (Physical vapor deposition (PVD), 2025)

3.1.3 Chyby povlakov

Defekty v povlakoch môžu výrazne ovplyvniť ich funkčnosť a trvanlivosť. Porozumenie týmto defektom je nevyhnutné na zlepšenie procesov nanášania povlakov a zabezpečenie ich optimálneho výkonu v rôznych priemyselných aplikáciách. Typy defektov v povlakoch sú: (Specialized Coating Systems, 2014; Pietschmann, 2023)

- **Póry** sú malé, často mikroskopické otvory, ktoré vznikajú počas procesu nanášania povlaku. Tieto defekty môžu narušiť ochranné vlastnosti povlaku a umožniť prenikanie vlhkosti alebo chemikálií do materiálu, čo môže znížiť jeho odolnosť proti korózii a umožniť prenikanie vlhkosti alebo kontaminantov a viesť k degradácii.
- **Trhliny** môžu vzniknúť v dôsledku tepelnej rozťažnosti, mechanického napätia alebo nesprávneho vytvrdzovania organických povlakov. Tieto trhliny sa môžu šíriť pri opakovanej záťaži alebo tepelných cykloch, čo vedie k delaminácii povlaku. Šírenie trhlín narušuje integritu povlaku a môže viesť k jeho odkrytiu a korózii.
- **Nerovnomerná hrúbka** povlaku môže spôsobiť vznik oblastí s nedostatočnou ochranou alebo zvýšenými koncentraciami napätia, čo ovplyvňuje celkový výkon povlakovaného komponentu.
- **Delaminácia**, resp. slabá adhézia medzi povlakom a substrátom môže viesť k porušeniu ich väzieb. Tento jav je často spôsobený nedostatočnou povrchovou úpravou alebo nekompatibilitou medzi použitými materiálmi.
- **Zostatkové napätia** medzi povlakom a substrátom môžu znížiť adhéziu a viesť k rýchlemu poškodeniu pri mechanickom alebo tepelnom zaťažení.
- **Kontaminanty** ako napr. prach, olej alebo vlhkosť počas depozície môžu spôsobiť defekty, ktoré znižujú kvalitu a životnosť povlaku.
- **„Orange peel defect“ (doslova efekt pomarančovej kôry)** predstavuje textúru na povrchu pripomínajúcu povrch pomaranča, často spôsobenú nesprávnymi technikami nanášania alebo problémami s viskozitou náteru. Táto chyba ovplyvňuje estetiku povlakov.

Príčiny vzniku chýb sú: (Pietschmann, 2023)

- **Nesprávna príprava povrchu:** Nečistoty ako oleje a masť môžu na substráte zabrániť správnej adhézii a viesť k defektom povlakov. Nedostatočné čistenie alebo vysoká drsnosť povrchu substrátu môžu ovplyvniť priľnavosť medzi povlakom a substrátom.
- **Chyby pri aplikácii:** Nesprávne techniky aplikácie, ako je striekanie alebo natieranie, môžu viesť k nerovnomernému pokrytiu materiálu a defektom povlakov.
- **Environmentálne faktory:** Teplota, vlhkosť a kvalita vzduchu môžu negatívne ovplyvniť procesy nanášania a viesť k defektom.
- **Kvalita materiálu:** Nízka kvalita vstupných materiálov povlakov alebo ich nesprávne kombinácie môžu viesť k ich defektom.
- **Problémy s vytvrdzovaním:** Nedostatočný čas alebo podmienky vytvrdzovania môžu viesť k neúplnej polymerizácii a defektom povlakov.
- **Kompatibilita materiálov:** Nekompatibilita medzi materiálom substrátu a povlakom môže spôsobiť nedostatočnú adhéziu a tým pádom delamináciu.

Na zabránenie vzniku chýb a defektov povlakov je nutné dbať na používanie správnych metód a vybavenia na ich aplikáciu, pričom je potrebné zabezpečiť správnu predprípravu substrátov.

3.2 Vlastnosti DLC povlakov a metódy hodnotenia ich vlastností

Diamantu podobné povlaky (**Diamond Like Carbon – DLC**) predstavujú skupinu amorfných uhlíkových materiálov, ktoré kombinujú vynikajúce mechanické, tribologické a chemické vlastnosti. Tieto povlaky sa vyznačujú vysokou tvrdosťou, nízkym trením, vynikajúcou odolnosťou proti opotrebeniu a chemickou inertnosťou, čo ich robí významnými materiálmi pre priemyselné aplikácie. DLC povlaky si našli uplatnenie v automobilovom priemysle, biomedicíne, letectve a presnom strojárstve vďaka ich schopnosti zvyšovať životnosť komponentov a znižovať trenie.

DLC povlaky sa skladajú z amorfných väzieb typu sp^2 (grafitových) a sp^3 (diamantových). Pomery týchto väzieb ovplyvňujú mechanické vlastnosti povlakov, ako je tvrdosť, elasticita a koeficient trenia. Vyšší obsah sp^3 väzieb vedie k väčšej tvrdosti a odolnosti proti opotrebeniu, zatiaľ čo vyšší podiel sp^2 uhlíka zlepšuje elektrickú vodivosť a trecie vlastnosti. Hrúbka DLC povlakov sa zvyčajne pohybuje v rozmedzí od 1 do 5 μm .

DLC povlaky možno aplikovať pomocou rôznych technológií PVD a CVD. Každá z týchto metód má vplyv na finálne vlastnosti povlaku, ako je adhézia, tvrdosť a tribologické vlastnosti. Plazmovo podporovaná chemická depozícia z plynnej fázy (PECVD) je proces, ktorým sa DLC povlaky deponujú pri nízkych teplotách, preto je možno ju použiť pri materiáloch citlivých na zvýšené teploty. Chemická depozícia z plynnej fázy (CVD) je technológia vhodná na vytváranie odolných vrstiev pri vyšších teplotách, čo je výhodné pri deponovaní materiálov s nízkou citlivosťou na vysoké teploty (napr. WC/Co).

DLC povlaky sú dôležité v mnohých oblastiach priemyselných technológií, ako automobilový, letecký a kozmický priemysel, biomedicínske aplikácie, rezné a tvárniace nástroje, elektronické zariadenia. DLC povlaky sa aplikujú na komponenty motorov, ako sú piesty, vačkové hriadele a palivové systémy s cieľom zníženia trenia. Používajú sa na medicínske implantáty, chirurgické nástroje a protézy, kde predlžujú ich životnosť. Navyše,

DLC povlaky zvyšujú životnosť rezných nástrojov. Používajú sa na ochranu konektorov a mikromechanických komponentov pred opotrebením a oxidáciou.

Medzi hlavné výhody DLC povlakov patria vysoká tvrdosť a odolnosť proti opotrebeniu, nízky koeficient trenia a výsledné zlepšenie energetickej efektívnosti, chemická inertnosť a biokompatibilita, odolnosť voči korózii a oxidácii. Na druhej strane existujú isté obmedzenia, ako napríklad počiatočné vysoké náklady na technologické vybavenie, možnosť nedostatočnej adhézie na niektorých materiáloch a nevyhnutnosť nájdenia špecifických depozičných parametrov pre optimálnu funkčnosť. (Erdemir a Martin, 2018; Liu a kol., 2025; Wang, 2022; Zeng a kol., 2014; Zia, Hussain a Baig, 2022)

Povlaky na nástrojoch a iných súčiastkach sa hodnotia podľa viacerých fyzikálnych, mechanických a tribologických vlastností, ktoré ovplyvňujú ich životnosť. Medzi najdôležitejšie vlastnosti patria:

1. Hrúbka povlaku

- Väčšinou sa udáva v mikrometroch (μm) a bežne sa pohybuje v rozmedzí 0,5 až 10 μm .
- Meria sa metódami ako optická profilometria, skenovacia elektrónová mikroskopia (SEM), Kalotest, alebo röntgenová fluorescenčná spektroskopia (XRF).

2. Tvrdosť (GPa, alebo HV)

- Udáva odolnosť povlaku voči vnikaniu cudzieho telesa do jeho povrchu, alebo plastickej deformácii.
- Meria sa pomocou mikrotvrdomera (Vickers, Knoop) alebo nanoindentačných zariadení (metóda Oliver & Pharr). Tvrdosť sa udáva v HV, alebo GPa.
- Napr. TiN má tvrdosť ~ 2000 HV (okolo 20 GPa), zatiaľ čo diamantové povlaky môžu dosahovať až 100 GPa.

3. Koeficient trenia (μ)

- Určuje mieru trenia medzi povlakom a iným materiálom, ovplyvňuje opotrebenie a efektívnosť mazania.
- Meria sa metódami napr. pin-on-disc, ball-on-disc v rôznych podmienkach.
- Napr. DLC povlaky majú nízky koeficient trenia ($\sim 0,1$), čo znižuje opotrebenie nástroja.

4. Priľnavosť povlaku k substrátu

- Hodnotí sa pomocou vrypovej skúšky tzv. „scratch testu“ (vnikanie indentora do materiálu povlaku na definovanej dráhe so zvyšujúcim sa zaťažením), kde sa stanovuje kritická sila vedúca k delaminácii povlaku.
- Je dôležitá pre odolnosť povlaku voči odlupovaniu počas obrábania.

5. Odolnosť voči opotrebeniu a erózii

- Testuje sa v podmienkach simulujúcich reálne zaťaženie (abrazívne testy, testy erózie).
- Metódy zahŕňajú pin-on-disc, ball-on-disc, Taberov test atď.

6. Tepelná stabilita a oxidačná odolnosť

- Kritická pre nástroje používané pri vysokých teplotách (napr. obrábanie ocele pri vysokých rýchlostiach).
- Testuje sa v peciach s postupným zvyšovaním teploty a ďalším hodnotením zmien povrchu (napr. tvorba oxidov, zmena farby), ako aj vysokoteplotnou rtg. difrakčnou analýzou.

7. Chemická stabilita a odolnosť voči korózii

- Hodnotí sa ponorením do agresívnych chemikálií alebo elektrochemickou analýzou (napr. test soľnou hmlou podľa normy ASTM B117).
- Dôležité pre nástroje pracujúce v náročných podmienkach (napr. obrábanie hliníka alebo koróznych materiálov).

8. Povrchová morfológia a drsnosť (Ra, Rz)

- Drsnosť povlaku ovplyvňuje trenie a kvalitu obrobenej plochy.
- Meria sa mechanickou, alebo optickou profilometriou, AFM (mikroskopiou atómárných síl), laserovou skenovacou konfokálnou mikroskopiou.
- Napr. hladké PVD povlaky majú $Ra < 0,1 \mu\text{m}$, čo redukuje priľnavosť triesok pri obrábaní.

9. Štruktúra a fázové zloženie

- Analyzuje sa pomocou röntgenovej difrakcie (XRD) alebo transmisnej elektrónovej mikroskopie (TEM).
- Pomáha identifikovať kryštalickú štruktúru (napr. fázové zmeny v AlTiN povlakoch pri vysokých teplotách).

V priemyselnej výrobe sa najčastejšie deponujú povlaky na obrábacie a tvárniace nástroje, pričom každý povlak má špecifické vlastnosti prispôbené konkrétnej aplikácii. V Tabuľke 3.1 sú uvedené základné vlastnosti najčastejšie používaných povlakov.

Tabuľka 3.1. Vlastnosti základných typov povlakov v porovnaní s DLC

Typ Povlaku	Hrúbka Povlaku (μm)	Tvrdosť (HV)	Koeficient Trenia (-)	Maximálna pracovná teplota ($^{\circ}\text{C}$)	Vlastnosti
TiN (Nitrid titánu)	1 až 5	~ 2000	0,4 až 0,6 (oproti oceli)	~ 600	Vysoká tvrdosť, dobrá adhézia, zlatistá farba, všeobecné obrábanie.
TiCN (Karbonitrid titánu)	2 až 5	~ 3000	0,2 až 0,3	~ 400 až 500	Vyššia tvrdosť ako TiN, nižšie trenie, lepšia odolnosť proti opotrebeniu.
AlTiN (Nitrid titánu a hliníka)	1 až 4	~ 3200 až 4000	0,3 až 0,5	~ 800 až 900	Výborná tepelná odolnosť, ochranná vrstva Al_2O_3 , vhodný na vysokorýchlostné obrábanie.
DLC/PCD (Diamantové povlaky)	0,5 až 10	~ 8000 až 10 000 (DLC), 100 000 (PCD)	0,1 až 0,2	~ 600 až 700	Extrémna tvrdosť, veľmi nízke trenie, ideálne na abrazívne materiály.
CrN (Nitrid chrómu)	1 až 4	~ 2000	0,3 až 0,6	~ 700	Vysoká chemická stabilita, dobrá odolnosť proti oxidácii, vhodný pre aplikácie s vysokým trením.

3.2.1 Metalografia

Metalografická príprava v oblasti povlakovania sa realizuje pred samotným povlakovaním aj po ňom. Pred povlakovaním je potrebné pripraviť substrát tak, aby sa zabezpečila čo najlepšia adhézia medzi substrátom a povlakom. **Pred samotným povlakovaním** je potrebné povrch vyleštiť na zodpovedajúcu drsnosť na metalografickej brúske. Brúsenie a leštenie je možno realizovať pri parametroch uvedených v Tabuľke 3.2. Po povlakovaní ide o prípravu priečnych rezov povlakov (tzv. „Cross-sections“) na stanovenie ich hrúbky a sledovanie mikroštruktúry. V rámci experimentálnych prác je vhodné povlak deponovať na viac typov substrátov s ohľadom na plánované analýzy (mechanické vlastnosti – HSS, WC/Co, vysokoteplotné testy – SiAl_2O_3).

Po leštení je potrebné povrchy očistiť od mastnoty a nečistôt v acetóne (alebo liehu, bioetanole, etanole, izopropanole, technickom liehu atď.) pomocou ultrazvukovej čističky. Na zvýšenie adhézie sa substráty dodatočne čistia plazmou v povlakovacom zariadení. Pred povlakovaním samotného povlaku je potrebné v rámci depozičného cyklu na pripravený povrch naniesť adhéznú vrstvu, ktorá je tvorená napr. tenkou vrstvou TiN, alebo CrN. Ďalej nasleduje proces povlakovania.

Tabuľka 3.2. Parametre brúsenia a leštenia pred povlakovaním
a na prípravu priečnych rezov vzoriek po povlakovaní

Krok	Operácia	Veľkosť zrna (μm) a označenie zrnitosti	Rýchlosť otáčania kotúča (RPM)	Prítlak (N)	Čas (min)
1.	Brúsenie	52,2 (P280)	260	27	12
		25,8 (P600)	260	27	5
		15,3 (P1200)	260	27	5
2.	Leštenie	9	140	27	6
		3	140	27	4
3.	Finálne doleštenie	0,05	-	-	30

Po vyhotovení vzoriek je potrebné vybrať reprezentatívne vzorky povlakov, ktoré sú bez viditeľných defektov a kontaminantov. Rezanie vzoriek sa realizuje v prípade, keď je potrebné upraviť rozmer vzoriek na mikroskopické pozorovanie priečnych rezov. Rezanie sa realizuje na presnej píle s diamantovým kotúčom (napr. Buehler Isocut). V ideálnom prípade je vzorku potrebné umiestniť tak, aby sa rez realizoval kolmo na povlakovanú plochu pričom povlak má byť rezaný ako prvý. Po rezaní je potrebné povrch očistiť v acetóne pomocou ultrazvukovej čističky, aby sa odstránili zvyšky reznej kvapaliny.

Na prípravu vzoriek **na pozorovanie priečnych rezov** je vzorky potrebné zalisovať do epoxidovej živice. Je potrebné použiť kombináciu vodivej a tvrdej (zachovanie hrán) zmesi (napr. Struers Polyfast, Buehler ConductoMet). Zalisovávanie prebieha v zariadení pri tlaku 290 barov a teplote 150 °C. Po zalisovaní vzoriek nasleduje brúsenie a leštenie ich priečnych rezov, pričom možno použiť rovnaký postup ako pri príprave substrátu pred povlakovaním (Tabuľka 3.2).

3.2.2 Mechanické vlastnosti – nanoindentácia

- **Výstup:** tvrdosť (H) – odolnosť materiálu proti vnikaniu cudzieho telesa do jeho povrchu, Youngov modul pružnosti (E) – miera elastického správania materiálu, parameter H/E – odolnosť proti opotrebeniu, parameter H^3/E^2 – odolnosť proti plastickej deformácii.

Nanoindentáciou možno zistiť mechanické vlastnosti DLC povlakov. Pred meraním je potrebné povrch vzoriek očistiť a ubezpečiť sa, že povrch nie je znečistený. Vzorky možno čistiť etanolom, izopropanolom, acetónom alebo technickým liehom v ultrazvukovej čističke a následne dočistiť povrch vatou, posledným krokom je dosušenie vzoriek stlačeným vzduchom alebo dusíkom. Pred meraním je potrebné vzorku zafixovať tak, aby nedošlo k jej pohybu a povrch bol dostatočne rovný. K meracím zariadeniam sa dodávajú rôzne typy držiakov. Ak je drsnosť povrchu príliš vysoká, môže byť potrebné leštenie, pretože nadmerná drsnosť môže spôsobiť chyby v meraní.

Pri nanoindentácii DLC povlakov sa štandardne používa Berkovichov diamantový indenter (hrot má tvar trojuholníkovej pyramídy), pretože má vysokú tvrdosť a dobre definovanú geometriu. Zaťaženie sa volí v závislosti od hrúbky povlaku:

- nízke zaťaženie (≤ 10 mN) pre tenké povlaky, s hrúbkou ≤ 1 μm , aby sa minimalizoval vplyv substrátu,
- vyššie zaťaženie (≥ 10 mN) pre hrubšie povlaky (s hrúbkou > 2 μm), aby sa zabezpečila dostatočná hĺbka penetrácie na presné vyhodnotenie mechanických vlastností. (Rtec Instruments, 2025; Wang a kol., 2013)

Maximálna hĺbka indentácie sa určuje zvyčajne do hĺbky 10 % z hrúbky povlaku, aby sa vylúčil alebo aspoň minimalizoval vplyv substrátu. Ďalšími parametrami, ktoré sa nastavujú sú rýchlosti zaťaženia a odľahčovania (napr. 0,05 až 0,5 $\text{m}\cdot\text{N}\cdot\text{s}^{-1}$), aby sa zabezpečilo presné meranie bez výrazného vplyvu tečenia materiálu. Pred samotným meraním je potrebné nanoindentor kalibrovať pri rôznych zaťaženiach na referenčnom materiáli na zabezpečenie presného merania sily a hĺbky vniku indentora. Hrot indentora je potrebné pred meraním umiestniť nad reprezentatívnu oblasť na povrchu vzorky, pričom je potrebné vyhnúť sa oblastiam s viditeľnými defektami, pórmí a okrajovým častiam. Po dosiahnutí maximálnej hĺbky možno aplikovať čas výdrže zaťaženia – ak je potrebné vyhodnotiť časovo závislé vlastnosti (napr. tečenie). Na záver sa indenter postupne odľahčuje na meranie elastického zotavenia povlaku. Je potrebné merania opakovať ideálne 5 až 10 x, aby sa zabezpečila štatistická spoľahlivosť výsledkov. Vzďialenosť medzi vtlakmi je ideálne voliť ako 10-násobok hĺbky indentácie aby sa predišlo vzájomnému ovplyvneniu. (Rtec Instruments, 2025)

Pre správnu analýzu dát je potrebné použiť softvér dodaný k meraciemu zariadeniu. Na základe záťažovej krivky (graf $P - h$) je možno vypočítať tvrdosť (H) (rovnica 3.1), modul pružnosti (E) (rovnica 3.2) a parametre H/E , H^3/E^2 . Pri výpočte tvrdosti (H) a redukovaného modulu pružnosti (E_r) z odľahčovacej krivky možno použiť metódu Oliver a Pharr:

$$H = \frac{P_{\max}}{A_c} \quad (3.1)$$

$$E = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{S}{\sqrt{A_c}} \quad (3.2)$$

kde P_{max} je maximálne aplikované zaťaženie v N,

A_c – kontaktná plocha, určená na základe kalibrácie špičky indentora v m^2 ,

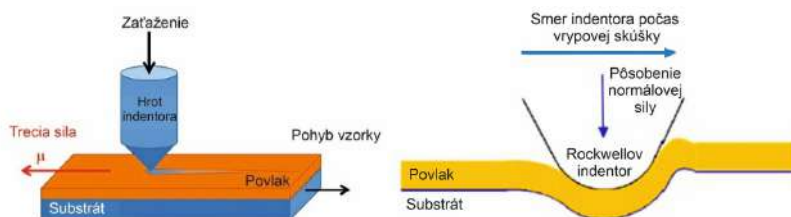
S – tuhosť pri odľahčovaní v $N \cdot m^{-1}$.

Ak sa prejavuje vplyv substrátu (najmä pri tenkých DLC povlakoch), možno použiť korekčný model substrátu (napr. Hay-Crawfordov model) na zistenie vlastností samotného povlaku. (Nanoindentation & Scratch Testing, 2025)

3.2.3 Adhézne vlastnosti – scratch test, mercedes test

- **Výstup:** stanovenie kritických zaťažení – scratch test, klasifikácia adhézie a kohézie povlakov na základe normalizovanej stupnice (Obr. 3.9) od HF1 po HF6 – mercedes test.

Scratch test je metóda na hodnotenie adhézie DLC povlakov. Test zahŕňa posun indentora (napr. hrotu z diamantu alebo karbidu volfrámu) po povrchu povlaku pri kontrolovanej zaťaži (Obr. 3.7).

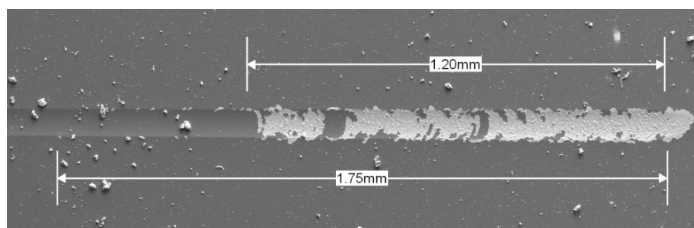


Obr. 3.7. Princíp skúšky vrypom, tzv. „Scratch test“ (Rtec Instruments, 2025)

Počas skúšky sa zaznamenávajú signály v reálnom čase, ako napr. akustická emisia (vznik a šírenie trhlín) a trenie (odpor proti pohybu hrotu). Významnými nameranými hodnotami sú:

- Progresívne zaťaženie, ktoré sa lineárne zvyšuje počas skúšky (napr. 1 až 100 $N \cdot min^{-1}$), aby sa určili kritické sily.
- Kritické zaťaženia, definované ako zaťaženia, pri ktorých nastávajú konkrétne druhy porušenia, a to:
 - a) Lc_1 – vznik prvých, zväčša jemných paralelných trhlín, bez delaminácie povlaku,
 - b) Lc_2 – čiastočná delaminácia alebo deformácia vrstvy, vznik radiálnych trhlín, spôsobených tlakovými napätiami, kohézno-adhézny prechod,
 - c) Lc_3 – úplná delaminácia povlaku, úplné adhézne porušenie.

Vyhodnotenie nameraných dát (Obr. 3.8) je možné optickou mikroskopiou, SEM alebo 3D profilometriou, pri ktorých sa dá kvantifikovať hĺbka vrypu a druhy porušenia.



Obr. 3.8. Vzorka DLC povlaku po scratch teste so zakótovanými L_{c2} a L_{c3}

Vyšší obsah sp^3 väzieb ($> 70\%$) zlepšuje odolnosť proti poškrabaniu, ale môže znížiť húževnatosť, čo môže viesť k celkovému zníženiu lomovej húževnatosti. Mäkké substráty (napr. polyméry) redukujú kritické zaťaženia kvôli väčšej plastickej deformácii pod povlakom. Tvrdé substráty (napr. keramika alebo oceľ) zas zlepšujú trvanlivosť a adhéziu povlakov.

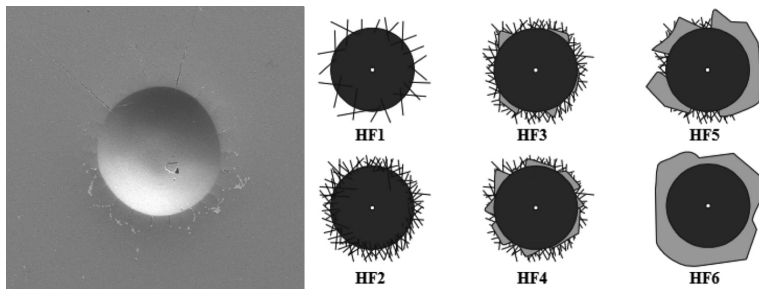
DLC povlaky typicky vykazujú hodnoty L_{c1} 12 až 25 N a L_{c2} 25 až 50 N, v závislosti od hrúbky vrstvy (hrubšie vrstvy, $h \geq 3\ \mu\text{m}$, často vykazujú vyššie hodnoty L_{c2}), tvrdosti substrátu (tvrdé substráty, napr. nástrojová oceľ, zlepšujú adhéziu v porovnaní s mäkkšími substrátmi, napr. hliník) a adhéznej medzivrstvy CrN alebo AlCrN medzivrstvy zvyšujú adhéziu tým, že redukujú zvyškové napätia, čím sa L_{c2} môže zvýšiť až o 20 až 40 %. Porovnanie L_{c1} a L_{c2} medzi DLC a CrN povlakmi je uvedené v Tabuľke 3.3.

Tabuľka 3.3. Porovnanie L_{c1} a L_{c2} medzi DLC a CrN povlakmi

Povlak	L_{c1} (N)	L_{c2} (N)
DLC ($2\ \mu\text{m}$)	15 až 25	30 až 50
CrN ($2\ \mu\text{m}$)	5 až 15	20 až 30

Mercedes test alebo Rockwell C test sa používa na hodnotenie adhézných vlastností povlakov. Táto skúška sa zvyčajne vykonáva na povlakoch na kovových substrátoch, napr. nástrojových oceliach. Pri Rockwell C teste je tvrdomer vybavený diamantovým kužeľovým indentorom, ktorý má uhol 120° a používa sa na vytvorenie vtláčku v povlaku. Na vytvorenie vtláčku sa zvyčajne používa zaťaženie 1500 N, pričom čas výdrže sa môže líšiť.

Vtláčok a jeho okolie sa pozoruje mikroskopom (svetelný, rastrovací elektrónový), pričom sa pozoruje prítomnosť trhlín a prípadná delaminácia povlaku. Pozorované defekty sa porovnávajú so štandardizovanými schémami podľa VDI 3198 (Obr. 3.9, od HF1 po HF6), na základe ktorých sa klasifikuje adhézia povlaku. (Flores-Renteria a kol., 2015)



Obr. 3.9. Hodnotenie mercedes testu pomocou VDI 3198 (Flores-Renteria a kol., 2015)

Táto skúška má skôr kvalitatívny charakter a poskytuje vizuálne hodnotenie adhézie, nie kvantitatívne výsledky. Nepríítomnosť výrazných trhlín alebo absencia delaminácie povlaku okolo vtlačku naznačuje dobrú adhéziu, pričom prítomnosť mikrotrhlín alebo delaminácia povlaku po obvode vtlačku naznačujú nedostatočnú adhéziu. Táto skúška je často doplnená ďalšími skúškami, napr. scratch testom, aby sa poskytlo komplexnejšie posúdenie adhézných vlastností povlaku.

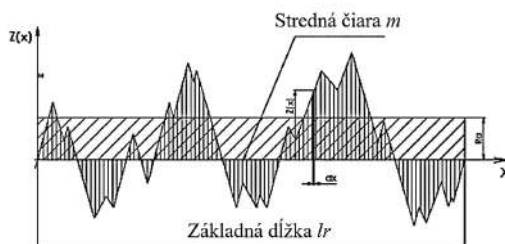
3.2.4 Drsnosť – kontaktné a bezkontaktné metódy merania

- **Výstup:** povrchová drsnosť – LSCM, optická profilometria, mechanický profilometer.

Drsnosť povrchu je možno označiť ako jeden z najdôležitejších parametrov komplexného súboru vlastností povrchov nazývaných „integrita povrchu“. Drsnosť povrchu označuje nepravidelnosti na povrchu, ktoré predstavujú odchýlky od ideálne rovného povrchu.

Na profilové hodnotenie morfológie povrchu (2D) sa používajú normalizované veličiny v praxi rozšíreného a všeobecne prijatého systému v zmysle STN EN ISO 4287. Výhodou 2D hodnotenia drsnosti je časová nenáročnosť merania, pretože sa stanovuje len jeden profil povrchu. Výsledkom je nameraný profil, ktorý možno zobraziť v 2D priestore. Tento profil možno potom použiť na vyhodnotenie R – parametrov drsnosti povrchu. (Drbúl, 2014) Najčastejšie používaným je stredná aritmetická odchýlka posudzovaného profilu R_a (Obr. 3.10) a možno ju vypočítať podľa vzťahu (3.3):

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (3.3)$$



Obr. 3.10. Schematické znázornenie strednej aritmetickej odchýlky profilu R_a (Drbúl, 2014)

Hodnotenie drsnosti povrchu v 3D priestore je možné pomocou parametrov plošnej drsnosti, ktoré sú podobné ako 2D parametre. Parametre 3D hodnotenia sú podrobne špecifikované v rámci normy ISO 25178. Norma predpisuje označenie parametrov písmenom S, ktoré označuje parametre výškové, priestorové a hybridné, ktoré sú definované pre plochu povrchu (z angl. surface – plocha).

Na meranie drsnosti sa využívajú dve hlavné techniky: kontaktná profilometria a bezkontaktné optické metódy. Pri kontaktnej profilometrii sa diamantový hrot pohybuje po povrchu a meria výškové odchýlky. Bezkontaktné optické metódy, ako konfokálna mikroskopia, interferometria alebo mikroskopia atomárnych síl (AFM) poskytujú vysoké rozlíšenie 3D obrazu povrchu. Mikroskopia atomárnych síl umožňuje meranie nanoskopickkej drsnosti s mimoriadnou presnosťou a využíva sa najmä pre tenké DLC povlaky alebo veľmi hladké povrchy s drsnosťou na nano úrovni.

Povlaky s nízkou drsnosťou zlepšujú nosnosť a odolnosť proti opotrebeniu. Pri skúškach adhézie môže vysoká drsnosť substrátu spôsobiť delamináciu alebo slabú adhéziu medzi povlakom a substrátom. Konečnú drsnosť DLC povlakov môže výrazne ovplyvniť drsnosť substrátu. Substráty s lešteným povrchom vedú k povlakom s nižšou drsnosťou, pričom nižšiu drsnosť povrchu možno dosiahnuť aj väčšou hrúbkou povlaku, napr. povlak s hrúbkou 0,8 µm môže znížiť drsnosť približne o 10 %, zatiaľ čo povlak s hrúbkou 2 µm ju môže znížiť až o 56 %. Okrem toho, drsnosť DLC povlakov býva ovplyvnená prítomnosťou makročastíc na povrchu po procese povlakovania. Počet a rozmery makročastíc možno ovplyvniť voľbou parametrov depozície a technológie.

3.2.5 Hrúbka povlaku – Kalo test

- **Výstup:** hrúbka povlaku – Kalo test.

Kalo test sa používa na meranie hrúbky povlakov. Funguje na princípe vytvorenia sférického krátera (kaloty) v povrchovej vrstve pomocou rotujúcej oceľovej guľôčky s definovaným priemerom. Brúsenie sa vykonáva za pomoci abrazívnej suspenzie, napríklad diamantovej pasty. Táto metóda je vhodná pre vrstvy s hrúbkou od 0,1 µm do 50 µm a môže byť použitá pre monopovlaky aj multivrstvové systémy. Po prebrúsení vrstvy sa kráter analyzuje pod mikroskopom. Hrúbka vrstvy t sa vypočíta pomocou geometrických vzťahov medzi rozmermi krátera a polomerom guľôčky, podľa vzťahu (3.4): (Rupetsov a Minchev, 2016)

$$t = \frac{D^2 - d^2}{8R} \quad (3.4)$$

kde t je hrúbka vrstvy v mm,

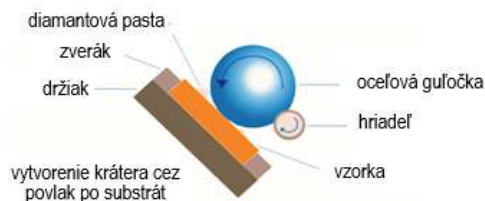
D – priemer krátera na povrchu povlaku v mm (meraný napr. optickým mikroskopom),

d – priemer krátera na rozhraní substrátu v mm (kde končí povlak),

R – polomer oceľovej guľôčky použitej pri skúške v mm.

Na vykonanie Kalo testu sa používa tzv. Calo tester (Obr. 3.11, napr. Anton Paar Calotest alebo kaloMAX), ktorý pozostáva z:

- *Oceľovej guľôčky* – kalená oceľová guľôčka s presne definovaným priemerom (napr. 20 mm).
- *Rotujúceho hriadeľa* – pripojený k motoru, ktorý otáča guľôčku proti povrchu vzorky.
- *Abrazívnej suspenzie* – napr. diamantová pasta.
- *Držiaka vzorky* – navrhnutý na bezpečné uchytenie plochých, valcových, alebo sférických vzoriek.
- *Svetelného mikroskopu* – používa sa na meranie rozmerov krátera a na výpočet hrúbky vrstvy.



Obr. 3.11. Princíp Kalo testu (Rupetsov a Minchev, 2016)

Na meranie hrúbky povlakov možno použiť aj vybrúsené a vyleštené priečne rezy vzoriek povlakov. Analyzovať pórovitosť, defekty, hrúbku, príľnutie a štruktúru povlaku možno napr. rastrovacím elektrónovým mikroskopom alebo optickým mikroskopom, ideálne pri zväčšeniach od 100 x.

3.2.6 Odolnosť proti opotrebeniu – ball-on-disc

- **Výstup:** odolnosť proti opotrebeniu – skúška ball-on-disc, hodnotenie opotrebenia pomocou LSCM, stanovenie rýchlosti opotrebenia – wear rate (podľa normy ASTM G99-23).

Ball on disc je tribologická skúška, ktorá sa používa na hodnotenie trenia, opotrebenia a lubrikačných vlastností materiálov a povrchových vrstiev. Počas tejto skúšky (Obr. 3.12) sa rotujúci disk (vzorka) dostáva do kontaktu s nehybnou guľôčkou (z kalenej ocele alebo keramiky) pod kontrolovaným zaťažením. Normálová sila (F_n), ktorá sa aplikuje, zabezpečuje konzistentný tlak v kontakte medzi guľôčkou a skúšaným povrchom. Sledovaný povrch sa otáča kontrolovanou rýchlosťou, čím vytvára buď valivý alebo šmykový pohyb v mieste kontaktu. Rýchlosť otáčania disku je možno nastaviť tak, aby simulovala rôzne tribologické podmienky, napríklad len šmykové trenie alebo kombinovaný valivý a šmykový pohyb.

Počas skúšky sa meria koeficient trenia (μ), ktorý je vypočítaný podľa vzťahu (3.5):

$$\mu = \frac{F_T}{F_n} \quad (3.5)$$

kde F_T je trecia sila v N,
 F_n – normálová sila v N.



Obr. 3.12. Princíp ball-on-disc skúšky (Stavlid, 2016)

Okrem trenia sa hodnotí aj opotrebovanie materiálu. To sa vykonáva meraním straty materiálu z guľôčky alebo vzorky po skončení skúšky. Čas potrebný na opotrebovanie vrstvy až po substrát môže byť použitý na výpočet rýchlosti opotrebovania. Táto skúška je

normalizovaná podľa ASTM G99-23. Zariadenie sa skladá z niekoľkých základných komponentov, a to z:

- *Rotujúceho disku* – je vyrobený zo skúšaného materiálu, alebo je na ňom deponovaný povlak, ktorý je predmetom skúšky.
- *Statickej guľôčky* – je obvykle vyrobená z ocele, keramiky alebo iných materiálov s vysokou pevnosťou.
- *Systému zaťaženia* – aplikuje kontrolované normálové zaťaženie, ktoré zabezpečuje konzistentný tlak v kontakte s povrchom skúšaného materiálu.
- *Pohonného systému* – umožňuje rotáciu disku nastaviteľnou rýchlosťou.
- *Senzorov* – merajú treciu silu a monitorujú zmeny koeficientu trenia počas testovania.

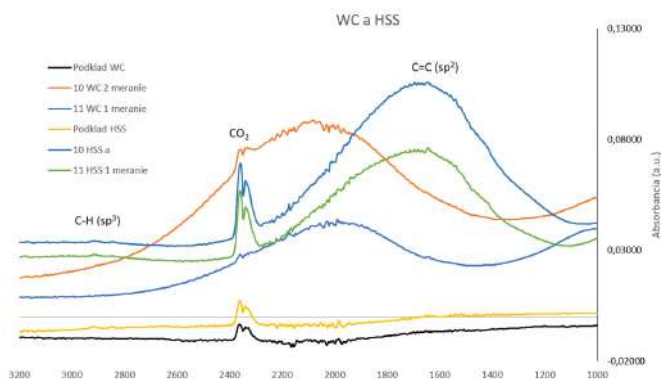
Ball-on-disc poskytuje kvantitatívne údaje o niekoľkých kľúčových vlastnostiach:

- a) **Koeficient trenia:** Tento parameter ukazuje, ako efektívne povrchová vrstva redukuje trenie za určitých podmienok.
- b) **Rýchlosť opotrebenia:** Meranie straty materiálu z guľôčky alebo disku poskytuje informácie o odolnosti voči opotrebeniu.
- c) **Lubrikačné vlastnosti:** Skúška hodnotí, ako dobre mazivá redukujú trenie a opotrebenie v oblasti kontaktu.
- d) **Režimy porušenia:** Identifikujú sa mechanizmy opotrebenia, ako je delaminácia vrstvy, praskanie alebo iné typy poškodenia.

3.2.7 Štruktúra a chemické zloženie DLC povlakov

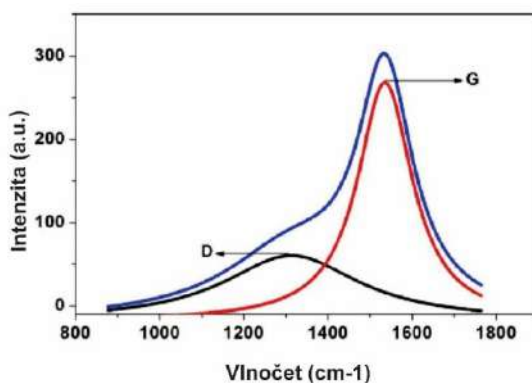
Ako už bolo spomenuté vyššie, diamantu podobné povlaky (z anj. tzv. **Diamond-Like Carbon (DLC) coatings** predstavujú širokú skupinu amorfných materiálov na báze uhlíka, ktoré výhodne kombinujú vlastnosti diamantu (sp^3 väzby) a grafitu (sp^2 väzby). Tieto povlaky sa vyznačujú vysokou tvrdosťou, chemickou odolnosťou a nízkym koeficientom trenia, čo z nich robí atraktívny materiál pre technické a biomedicínske aplikácie. Avšak, pre optimalizáciu vlastností DLC povlakov je dôležité dôkladné poznanie ich chemického zloženia a štruktúry. Jedinečnosť štruktúry a chemického zloženia týchto povlakov si vyžaduje využitie špeciálnych a pokročilých spektroskopických metód, medzi ktoré patrí Fourierovská infračervená spektroskopia (FTIR – Fourier transformation infrared spectroscopy), Ramanova spektroskopia (Raman spectroscopy) a rtg. fotoelektrónová spektroskopia (XPS – X-ray photoelectron spectroscopy).

FTIR spektroskopia je založená na absorpcii infračerveného žiarenia molekulami materiálu. Každá chemická väzba absorbuje žiarenie na špecifickej vlnovej dĺžke, čo umožňuje identifikovať prítomné funkčné skupiny. Pri analýze DLC povlakov FTIR pomáha detegovať väzby typu C-H, ako aj kyslíkové funkčné skupiny (napr. C=O), ktoré môžu vznikáť oxidáciou povrchu povlaku. Táto metóda je užitočná najmä pri štúdiu chemických modifikácií, avšak má obmedzenú citlivosť pri veľmi tenkých vrstvách. FTIR spektrá DLC povlakov, konkrétne ta-C, na substrátoch z HSS a WC/Co sú znázornené na Obr. 3.13. V spektrách sú vidieť funkčné skupiny C-H a C-C typické pre väzby sp^3 a sp^2 .



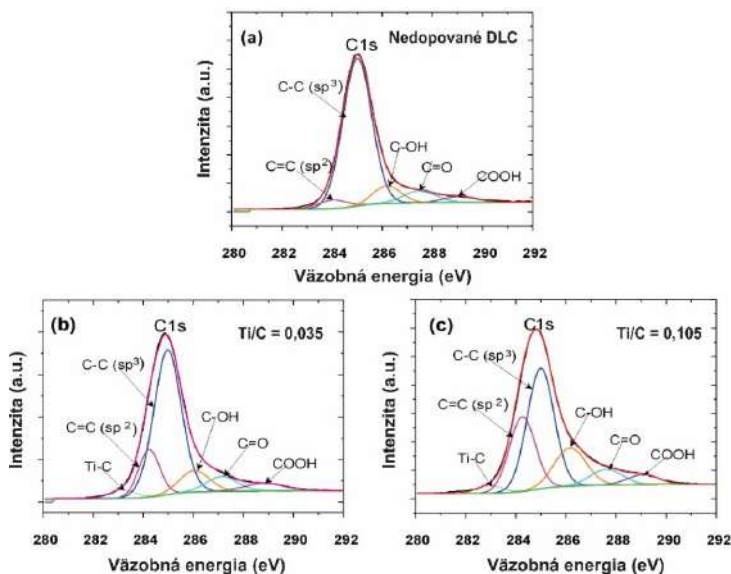
Obr. 3.13. FTIR spektrá DLC povlakov na rôznych substrátoch (HSS, WC / Co)

Ramanova spektroskopia využíva neelastický rozptyl laserového svetla na štúdium molekulových vibrácií. V prípade DLC vrstiev sa sledujú charakteristické D a G profily ($\sim 1350 \text{ cm}^{-1}$ a $\sim 1580 \text{ cm}^{-1}$), ktoré poskytujú informácie o stupni usporiadania uhlíkovej štruktúry a pomere sp^2/sp^3 väzieb (Obr. 3.14). Pomer intenzít týchto pásov ID/IG, kde ID je intenzita diamantových väzieb a IG je intenzita grafitových väzieb slúži ako ukazovateľ grafitizácie materiálu. Metóda je rýchla, bezkontaktná a citlivá na štruktúrne zmeny v uhlíkových materiáloch, preto je široko používaná pri charakterizácii DLC.



Obr. 3.14. Ramanove spektrá DLC povlaku s charakteristickými profilmi diamantu (D) a grafitu (G)

XPS spektroskopia je povrchovo citlivá technika, ktorá meria energiu elektrónov uvoľnených z atómov sledovaného materiálu vplyvom röntgenového žiarenia. Na základe väzbovej energie možno identifikovať jednotlivé prvky a ich chemické stavy. V analýze DLC povlakov umožňuje XPS kvantifikovať podiel sp^2 a sp^3 hybridizovaného uhlíka, ako aj detegovať prímеси a kontaminácie (napr. kyslík, vodík, dopujúce prvky). Vďaka vysokej citlivosti na chemické prostredie poskytuje detailný obraz o povrchovej chémii povlaku. Na Obr. 3.15 sú znázornené chemické stavy prvkov v DLC povlaku dopovaného titánom. (Bouabibsa, Lamri a Sanchette, 2018)



Obr. 3.15. Vázobné stavy prvkov v čistom, ako aj titánom dopovanom DLC povlaku (Bouabibsa, Lamri a Sanchette, 2018)

Tieto tri techniky sa navzájom dopĺňajú – FTIR a Ramanova spektroskopia sa zameriavajú na analýzu molekulových vibrácií a väzbových typov, zatiaľ čo XPS spektroskopia poskytuje detailné informácie o chemickom zložení povrchu. Ich kombinované využitie je nevyhnutné pre komplexnú charakterizáciu DLC vrstiev a optimalizáciu ich funkčných vlastností.

3.3 Analýza mechanických vlastností ta-C povlakov

Tetrahedrálne amorfné uhlíkové povlaky (ta-C) predstavujú špeciálnu kategóriu diamantu podobných povlakov (DLC). Charakteristickým znakom ta-C je vysoký podiel sp^3 hybridizovaných väzieb, ktoré sú typické pre diamant. Na rozdiel od iných DLC povlakov, ta-C povlaky neobsahujú vodík, čo prispieva k ich stabilite pri vyšších teplotách a v agresívnych prostrediach. Vďaka tejto väzbovej štruktúre môžu mať ta-C povlaky v závislosti od depozičných parametrov vysokú tvrdosť, až nad 40 GPa. Ich využitie je vzhľadom na ich vlastnosti najmä v automobilovom, biomedicínskom a nástrojárskom priemysle.

Nasledujúca časť prípadovej štúdie je zameraná na výskum ta-C povlakov, ktoré sú určené pre obrábacie nástroje. Cieľom je zistiť, ako depozičné parametre ovplyvnili mechanické vlastnosti povlakov a určiť, ktoré parametre budú vhodné na povlakovanie nástrojov.

3.3.1 Použité materiály a metódy

Povlaky ta-C boli deponované v podniku Staton, spol. s r. o., Turany technológiou oblúkového odparovania grafitovej katódy (ARC). Počas procesu povlakovania bol na zvýšenie množstva C v komore privádzaný acetylén. Architektúra všetkých povlakov bola

tvorená adhéznu vrstvou CrN, ta-C:Cr medzivrstvou a samotným povlakom ta-C. Depozičné parametre pri vyhotovení adhéznej vrstvy a ta-C:Cr medzivrstvy boli konštantné, pričom jedna depozičia trvala približne 90 min. Ako substrát bol použitý spekaný karbid WC/Co (10 hm. % Co), ktorý patrí medzi často používané rezné materiály. Príprava WC/Co substrátu pred povlakovaním pozostávala z elektroerozívneho rezania tyčí, ktoré boli následne zalisované do štandardnej nevodivej živice. Potom sa substráty metalograficky pripravili brúsením a leštením. Po dosiahnutí hladkého povrchu bez defektov sa leštené substráty vybrali zo zalisovávacej hmoty, boli očistené a pripravené na povlakovanie.

V rámci depozií ta-C povlakov sa postupne menili dva depozičné parametre, a to predpätie pulzu grafitovej katódy (U_p) a prietok acetylénu (C_2H_2). Frekvencia pulzov bola nastavená konštantne na 5 Hz. Kompletné parametre pre depoziácie adhéznej vrstvy, medzivrstvy a ta-C povlakov sú uvedené v Tabuľke 3.4, kde negatívne elektrické napätie aplikované na substrát počas depoziácie je označené ako U_b (bias voltage), označenie c_p predstavuje prúd na grafitovej katóde (cathode current) a I_{Cr} je prúd na chrómovej katóde.

Tabuľka 3.4. Depozičné parametre ta-C povlakov

Vzorka	Adhézna vrstva		Medzivrstva ta-C:Cr				ta-C povlak			
	U_b (-V)	I_{Cr} (A)	f (Hz)	U_p (-V)	c_p (-)	C_2H_2 (%)	f (Hz)	U_p (-V)	c_p (-)	C_2H_2 (%)
1	100	95	20	150	7500	10	5	150	25000	0
2	100	95	20	150	7500	10	5	150	25000	33
3	100	95	20	150	7500	10	5	150	25000	67
4	100	95	20	150	7500	10	5	200	25000	0
5	100	95	20	150	7500	10	5	200	25000	33
6	100	95	20	150	7500	10	5	200	25000	67
7	100	95	20	150	7500	10	5	250	25000	0
8	100	95	20	150	7500	10	5	250	25000	33
9	100	95	20	150	7500	10	5	250	25000	67

Po vyhotovení DLC povlakov bola realizovaná nanoindentácia s využitím nanoindentora Anton Paar NHT² na zistenie základných mechanických charakteristík povlakov, akými sú nanotvrdosť (H_{IT}), Youngov modul pružnosti (E_{IT}), a pomery H/E a H^3/E^2 . S cieľom eliminácie povrchovej drsnosti boli pred samotným meraním povlaky preleštené na metalografickej brúske. Tribologické vlastnosti povlakov (COF – koeficient trenia) boli stanovené na tribometri Bruker UMT Tribolab. Na simuláciu obrábania ocele boli realizované tribologické testy oproti guľôčkam z koróziivzdornej ocele. Na stanovenie priľnavosti, resp. adhérie povlakov bola použitá vrypová skúška (tzv. Scratch test), ako aj vtlačacia skúška (tzv. Mercedes test). Na analýzu adhérie sa použilo zariadenie Bruker UMT Tribolab.

Mechanické skúšky boli ďalej vyhodnocované aj pomocou skenovacieho elektrónového mikroskopu JEOL JSM 7600F, pomocou ktorého sa urobili snímky stôp opotrebenia po skúškach ball-on-disc, vrypov po scratch testoch a vtlačkov po mercedes testoch.

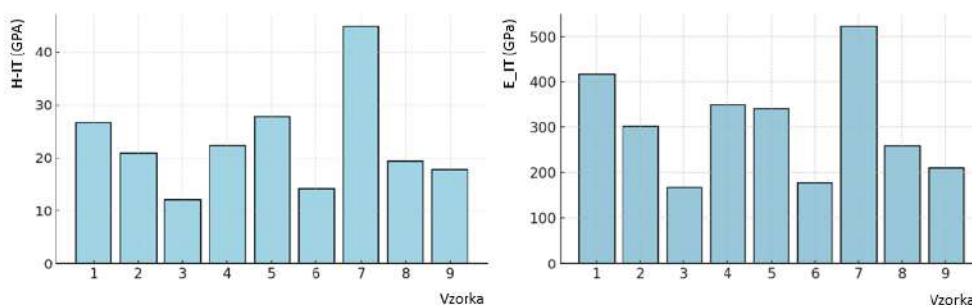
3.3.2 Výsledky

Namerané hodnoty pre vybrané tribo-mechanické charakteristiky, ako sú nanotvrdosť, Youngov modul pružnosti, koeficient trenia a pomery H/E a H^3/E^2 sú uvedené v Tabuľke 3.5. Pomery H/E poskytujú základné informácie o odolnosti proti opotrebeniu povlakov a pomery H^3/E^2 o ich odolnosti proti plastickej deformácii.

Tabuľka 3.5. Tribo-mechanické vlastnosti deponovaných povlakov (H_{IT} , E_{IT} , H/E , H^3/E^2 a COF)

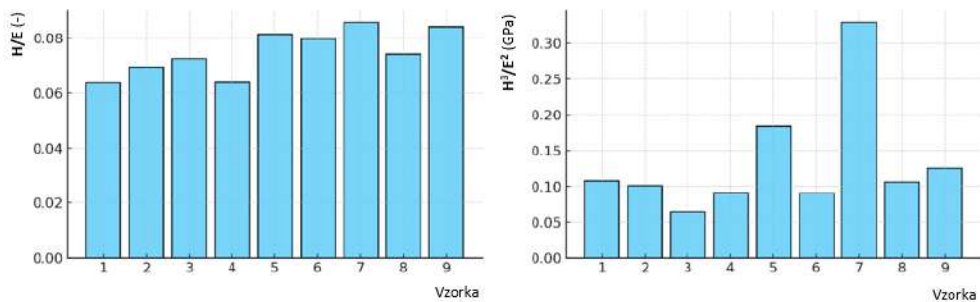
Vzorka	H_{IT} (GPa)	E_{IT} (GPa)	H/E (-)	H^3/E^2 (GPa)	COF (-)
1	$26,6 \pm 5,4$	417 ± 75	0,06379	0,10824	0,185
2	$21,0 \pm 4,3$	302 ± 45	0,06954	0,10154	0,131
3	$12,2 \pm 2,8$	168 ± 27	0,07262	0,06434	0,134
4	$22,4 \pm 4,8$	351 ± 75	0,06382	0,09123	0,165
5	$27,7 \pm 6,6$	340 ± 77	0,08147	0,18386	0,116
6	$14,2 \pm 2,5$	178 ± 24	0,07978	0,09037	0,121
7	$44,8 \pm 8,5$	522 ± 101	0,08582	0,32998	0,145
8	$19,3 \pm 4,4$	260 ± 38	0,07423	0,10635	0,124
9	$17,7 \pm 2,7$	210 ± 26	0,08429	0,12574	0,132

Ako je zrejmé z Obr. 3.16, využitie acetylénu pri depozíciách má za následok pokles tvrdosti, ako aj Youngovho modulu pružnosti povlakov. Tento pokles zrejme súvisí so zvýšeným podielom väzieb sp^2 , ako aj s prítomnosťou vodíka z plynu. Pri povlakoch deponovaných bez využitia acetylénu, bol dokumentovaný nárast nanotvrdosti a Youngovho modulu pružnosti so zvyšujúcim sa predpätím. Vo všeobecnosti bol pozorovaný nárast týchto dvoch charakteristík so zvyšujúcim predpätím bez ohľadu na prietok acetylénu.



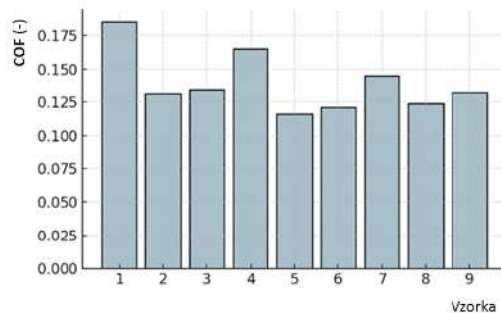
Obr. 3.16. Nameraná nanotvrdosť (H_{IT}) a Youngov modul pružnosti (E_{IT}) DLC povlakov

Najvyššia hodnota tvrdosti a modulu pružnosti (Obr. 3.17) bola zaznamenaná pri vzorke 7 ($H_{IT} = 44,8 \pm 8,5$; $E_{IT} = 522 \pm 101$). Vyššie hodnoty parametrov H/E a H^3/E^2 znamenajú aj ich vyššiu odolnosť proti opotrebeniu a plastickej deformácii. Najvyššie hodnoty parametra H/E (približne 0,08) boli pozorované pri vzorkách 5, 7 a 9. Parameter H^3/E^2 bol najvyšší pri vzorke 7 (0,330 GPa).



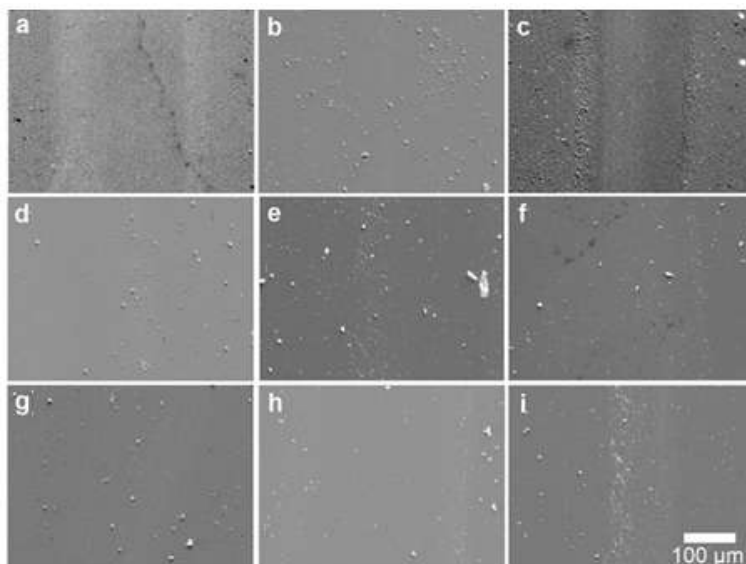
Obr. 3.17. Hodnoty odolnosti proti opotrebeniu (H/E) a plastickej deformácii (H^3/E^2) DLC povlakov

Koeficienty trenia (COF) stanovené oproti oceleovej guľôčke sa vo všetkých prípadoch pohybovali okolo hodnoty 0,1 (Obr. 3.18). Najmä pri povlakoch deponovaných pri vyšších predpätíach bol pozorovaný pokles koeficientu trenia so stúpajúcim prietokom acetylénu, čo je opäť možno vysvetliť zvýšeným podielom väzieb sp^2 , ktoré majú priaznivý vplyv na trecie vlastnosti povlakov.



Obr. 3.1.8 Koeficienty trenia (COF) vzoriek 1 až 9

SEM snímky povrchov po skúške ball-on-disc sú na Obr. 3.19. Na snímkach je možno okrem stopy po guľôčke pozorovať aj makročastice, ktoré sa na povrchu sformovali počas depozície povlakov. Tribologické stopy po guľôčkach sú málo zreteľné a objem opotrebenia (wear volume) bude možno stanoviť po naskenovaní stôp konfokálnym skenovacím mikroskopom a výpočte objemu odobratého materiálu. Opotrebená stopa je najvýraznejšia pri vzorke 3 (Obr. 3.19c)), pričom táto vzorka má aj najnižšiu hodnotu nanotvrdosti ($H_{IT} = 12,2 \pm 2,8$ GPa) a odolnosti proti plastickej deformácii ($H^3/E^2 = 0,064$).



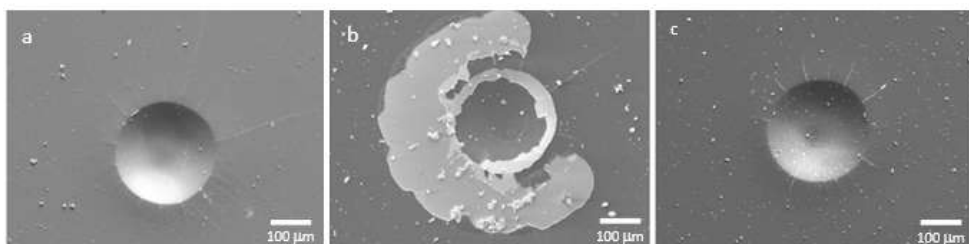
*Obr. 3.19. Stopy ocelevej guľôčky po skúške ball-on-disc
a – vzorka 1, b – vzorka 2, c – vzorka 3, d – vzorka 4, e – vzorka 5, f – vzorka 6, g – vzorka 7,
h – vzorka 8, i – vzorka 9*

Na Obr. 3.20 sú znázornené vtlačky po Mercedes teste vzoriek 1 až 3. Je zrejmé, že pri daných parametroch nemal zvýšený prietok acetylénu výrazný vplyv na adhéziu týchto povlakov. Adhéziu možno hodnotiť pozitívne v rozsahu od HF1 do HF2. Vo všetkých prípadoch boli dokumentované radiálne trhliny, s občasným výskytom nevýrazného odlúpnutia na okraji vtlačku.

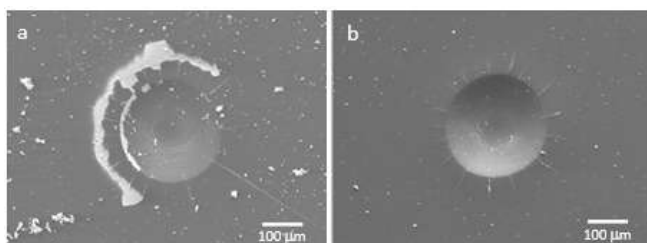


*Obr. 3.20. Vyhodnotenie adhézie povlakov po skúške „Mercedes test“
a – vzorka 1 (HF1), b – vzorka 2 (HF1), c – vzorka 3 (HF1)*

V prípade série vzoriek 4, 5 a 6, kedy sa oproti prvej sérii zvýšilo predpätie na 200 V, možno pozorovať so zvýšením predpätia výraznejšie a dlhšie radiálne trhliny. Pri prietoku acetylénu 33 % došlo v prípade 2. aj 3. série vzoriek (Obr. 3.21b, Obr. 3.22a) k výraznej delaminácii povlaku, hodnotenej stupňami HF 5 a HF 6.



Obr. 3.21. Vyhodnotenie adhézie povlakov po skúške „Mercedes test“
a – vzorka 4 (HF2), b – vzorka 5 (HF6), c – vzorka 6 (HF2)



Obr. 3.22. Vyhodnotenie adhézie povlakov po skúške „Mercedes test“
A – vzorka 8 (HF5), b – vzorka 9 (HF1)

Adhézne správanie povlakov bolo komplexnejšie hodnotené aj metódou Scratch test (Obr. 3.23). V tomto prípade bolo cieľom stanoviť kritické zaťaženia Lc_2 a Lc_3 (Tabuľka 3.6). Lc_2 zodpovedá prvej delaminácii povlaku. Sila Lc_3 súvisí s úplnou delmináciou povlaku. Vo väčšine prípadov bolo možno vyhodnotiť iba silu Lc_3 , pretože s nárastom zaťaženia došlo pri určitých hodnotách priamo k celkovej delaminácii povlakov. Kritické zaťaženia Lc_3 povlakov boli najvyššie pri vzorkách 3, 6 a 9, čo zodpovedá vo všetkých sériách najvyššiemu prietoku acetylénu (67 %).

Tabuľka 3.6. Namerané hodnoty dĺžky Lc_2 a Lc_3 s určením adhézie povlakov

Vzorka	Dĺžka vrypu	Lc_2 (mm)	Lc_2 (N)	Lc_3 (mm)	Lc_3 (N)	Mercedes test
1	10 mm = 100 N	1,75	17,50	3,42	34,20	HF1
2	10 mm = 100 N	2,30	23,00	1,70	17,00	HF1
3	10 mm = 100 N	7,46	74,60	8,35	83,50	HF1
4	10 mm = 100 N	-	-	2,52	25,2	HF2
5	10 mm = 100 N	5,83	58,30	6,26	62,6	HF6
6	10 mm = 100 N	4,73	47,30	7,25	72,5	HF2
7	10 mm = 100 N	5,33	53,30	5,92	59,20	-
8	10 mm = 100 N	5,67	56,70	6,40	64,00	HF5
9	10 mm = 100 N	8,04	80,40	8,58	85,80	HF1



Obr. 3.23. *Výhodnotenie adhézie povlakov po skúške „Scratch test“*
a – vzorka 1, b – vzorka 3, c – vzorka 4, d – vzorka 6, e – vzorka 7, f – vzorka 9

Na SEM snímkach vrypov a vtlačkov (Obr. 3.21, Obr. 3.22 a Obr. 3.23) sú na vzorkách zreteľne viditeľné makročastice, ktoré sú dôsledkom špecifického mechanizmu depozície pri použití laserového odparovania (PLD – pulsed laser deposition) alebo oblúkového výboja (arc deposition). Hlavným dôvodom vzniku makročastíc pri oblúkovom odparovaní grafitovej katódy je pôsobenie elektrického výboja, ktorý emituje vysokoenergetické častice uhlíka. Výboj spôsobuje mikroskopické explózie na povrchu katódy, pri ktorých sa spolu s ionizovaným uhlíkom uvoľňujú aj kvapôčky alebo úlomky pevného materiálu. Tieto častice nemusia byť úplne ionizované a pri dopade na substrát spôsobujú nerovnomernosť povrchu, defekty a zhoršenie vlastností povlaku. Ďalšími dôvodmi môžu byť negatívne javy počas procesu povlakovania. Medzi ne možno zahrnúť nedostatočnú filtráciu plazmy, napr. ak nie je použitý plazmový filter, makročastice sa voľne dostávajú až na substrát. Eliminácia je možná využitím zariadení s tzv. filtered cathodic vacuum arc (FCVA) technológiou, ktorá značne redukuje výskyt makročastíc. Znečistenie alebo poškodenie grafitovej katódy, napr. nehomogenita alebo kontaminácia, zvyšujú pravdepodobnosť nestabilného výboja a tým tvorbu makročastíc. Makročastice zvyšujú drsnosť povrchu, lokálne spôsobujú slabšiu adhéziu, potenciálnu iniciáciu mikrotrhlín alebo opotrebenia a zníženie tribologických vlastností (napr. vyššie trenie).

3.3.3 Zhrnutie

Z analýz tribo-mechanických vlastností je zrejmé, že so stúpajúcim prietokom acetylénu klesá tvrdosť aj Youngov modul pružnosti. V prvej sérii vzoriek, ktoré boli vyrobené pri predpätí -150 V klesla tvrdosť H_{IT} z 26,6 GPa (vzorka 1, prietok C_2H_2 0 %) na 12,2 GPa (vzorka 3, prietok C_2H_2 67%), čo predstavuje pokles tvrdosti o 54,13 %. Modul pružnosti klesol o 59,71 %, z hodnoty 417 GPa (vzorka 1, prietok C_2H_2 0 %) na 168 GPa (vzorka 3, prietok C_2H_2 67 %). V druhej sérii vzoriek, ktoré boli vyrobené pri predpätí -200 V, sa pri meraní tvrdosti nepreukázala jednoznačná závislosť. Modul pružnosti ale vykazuje rovnaké trendy aké boli zaznamenané pri prvej sérii, a teda E_{IT} klesá so stúpajúcim prietokom acetylénu, konkrétne z hodnoty 351 GPa (vzorka 4, prietok C_2H_2 0 %), na 178 GPa (vzorka

6, prietok C_2H_2 67 %), čo je rozdiel o 49,29 %. Pri tretej sérii vzoriek, ktoré boli vyrobené pri predpätí -250 V, bola závislosť medzi prietokom acetylénu a tvrdosťou H_{IT} aj modulom pružnosti E_{IT} podobná ako pri prvej sérii (U_p -150 V). Tvrdosť povlaku klesá so stúpajúcim prietokom acetylénu, v tomto prípade bol pokles medzi vzorkou 7 a vzorkou 9 o 60,49 %.

Modul pružnosti podobne klesal s rastúcim prietokom acetylénu, rozdiel medzi vzorkami 7 a 9 bol o 59,77 %. Najvyšší koeficient trenia bol nameraný v každej sérii vždy pri prietoku acetylénu 0 %, v 1. sérii vzoriek (U_p -150 V) mal hodnotu 0,185 (vzorka 1), v 2. sérii bol COF 0,165 (vzorka 4), a v 3. sérii bola nameraná hodnota 0,145 pre vzorku 7.

Ďalšími sledovanými vlastnosťami boli zmeny súvisiace so zmenou predpätia, ktorého hodnoty boli nastavené na -150 V, -200 V a -250 V. So zvyšujúcim sa predpätím klesal koeficient trenia, čo sa jednoznačne dokázalo bez použitia acetylénu, keď bol pri vzorke 1 nameraný COF 0,185, vzorka 4 mala hodnotu COF 0,165 a vzorka 7 z poslednej série 0,145. Stúpajúca závislosť tvrdosti a modulu pružnosti bola preukázaná len pri hodnote prietoku acetylénu 67 %. Hodnoty tvrdosti sa menili pri jednotlivých predpätiach nasledovne: vzorka 3 mala H_{IT} 12,2 GPa, vzorka 6 mala H_{IT} 14,2 GPa pri vzorke 9 bola nameraná hodnota 17,7 GPa. Modul pružnosti E_{IT} vzoriek stúpал pri rovnakých vzorkách ako tvrdosť, a rozdiel medzi vzorkou 3 (168 GPa) a vzorkou 9 (210 GPa) bol 20 %. Pri ostatných prietokoch acetylénu sa jasne definované závislosti nedokázali, preto bude potrebné merania zopakovať alebo doplniť experiment o ďalšie depozície. To isté platí aj pre pomery H/E a H^3/E^2 .

Materiálové analýzy ako meranie hrúbky povlaku v priečných rezoch, FTIR, Ramanova spektroskopia a XPS, na vzorkách prebiehajú a ich výsledky poskytnú detailnejšie vysvetlenie zmien mechanických vlastností na základe klasifikácie a kvantifikácie medziatomárných väzieb.

Záver

Povrchové úpravy vo forme tenkých povlakov zohrávajú v súčasnosti kľúčovú úlohu v rôznych oblastiach priemyslu. Vzhľadom na rastúce nároky na výkonnosť, životnosť a efektívnosť technických súčiastok je vývoj nových typov povlakov a ich optimalizácia nevyhnutnou súčasťou moderného materiálového inžinierstva. Medzi veľmi perspektívne skupiny patria DLC (Diamond-Like Carbon) povlaky, ktoré v sebe spájajú vysokú tvrdosť, výbornú odolnosť voči opotrebeniu, chemickú inertnosť a nízky koeficient trenia. Vďaka týmto výnimočným vlastnostiam si DLC vrstvy našli uplatnenie v automobilovom a leteckom priemysle, medicíne, mikroelektronike, či pri výrobe rezných a tvárniciach nástrojov.

V teoretickej časti práce boli podrobne opísané jednotlivé technológie povlakovania so zameraním na fyzikálnu a chemickú depozíciu z pár (PVD a CVD), ktoré patria medzi najvyužívanejšie metódy pri príprave DLC vrstiev. Opísané boli aj základné vlastnosti DLC povlakov, ako aj rôzne metódy ich hodnotenia – od stanovenia hrúbky a tvrdosti, cez adhéziu (scratch test, mercedes test), až po analýzu povrchovej štruktúry a chemického zloženia pomocou spektroskopických techník (FTIR, Ramanova spektroskopia, XPS). Významnú pozornosť si vyžadovala aj príprava vzoriek, nakoľko nesprávna príprava môže výrazne ovplyvniť spoľahlivosť výsledkov.

Experimentálna časť bola zameraná na štúdium ta-C (tetrahedral amorphous carbon) povlakov deponovaných pomocou PVD technológie s cieľom zhodnotiť vplyv depozičných parametrov na ich mechanické vlastnosti. Výsledky ukázali, že parametre ako prietok plynu, a predpätie majú vplyv na výslednú tvrdosť, modul pružnosti, ako aj adhézne správanie

povlakov. Prítomnosť makročastíc bola identifikovaná ako jeden z faktorov, ktorý môže negatívne ovplyvniť funkčnosť povlaku, pričom ich redukcia je možná aplikáciou vhodných technologických riešení (napr. použitie FCVA systému). Na základe týchto poznatkov možno lepšie porozumieť mechanizmom, ktoré ovplyvňujú výsledné vlastnosti povlaku, čo prispieva k efektívnejšiemu návrhu technológií pre konkrétne aplikácie.

Získané poznatky podčiarkujú význam precíznej prípravy substrátu, optimalizácie technologických parametrov a komplexnej analýzy vlastností DLC vrstiev. V budúcnosti sa výskum môže zamerať na ďalšie znižovanie zvyškových napätí, zlepšenie adhézie na problematických materiáloch a vývoj hybridných povlakov so špecifickými funkčnými vlastnosťami. DLC povlaky tak aj naďalej predstavujú zaujímavý smer v oblasti tenkovrstvových technológií a funkčných povrchov.

Na základe získaných výsledkov možno odporučiť, aby sa pri návrhu DLC povlakov kládol dôraz na precíznu predprípravu substrátu vrátane finálneho čistenia a aplikácie vhodnej adhézne medzivrstvy (napr. CrN). Výber depozičných parametrov by mal byť prispôbený nielen požadovaným mechanickým vlastnostiam, ale aj konkrétnemu typu substrátu a prevádzkovým podmienkam. Pre priemyselné aplikácie sa ako veľmi prínosné javí sledovanie vývoja technológií ako FCVA či hybridné PVD/CVD procesy, ktoré umožňujú získať kvalitnejšie vrstvy s nižším výskytom defektov.

Zoznam bibliografických odkazov

A Closer Look at the Types of Coating Materials. 2025. TechTech [online] [cit. 2025-02-20]. Dostupné na internete: <https://textechindustries.com/blog/a-closer-look-at-the-types-of-coating-materials/>.

AMIN, S. and PANCHAL, H. 2016. A Review on Thermal Spray Coating Processes. In *International Journal of Current Trends in Engineering & Research* 2 (4), pp. 556-563. ISSN 2455-1392. [online] [cit. 2025-02-20]. Dostupné na internete: <https://poudrafsan.ir/wp-content/uploads/2019/05/A-Review-on-Thermal-Spray-Coating-Processes-1.pdf>.

ASTM G99-23. Standard Test Method for Wear and Friction Testing with a Pin-on-Disk or Ball-on-Disk Apparatus.

BERGER, L. M. 2015. Application of hardmetals as thermal spray coatings. In *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 49, pp. 350-364. ISSN 0263-4368. [online] [cit. 2025-04-20]. Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436814002480>.

BOKOV, M., JALIL, A. T., CHUPRADIT, S., SUKSATAN, W., ANSARI, M., SHEWAEI, I. H., VALIEV, G. H. and KIANFAR, E. 2021. Nanomaterial by Sol-Gel Method: Synthesis and Application. In *Hindawi Advances in Materials Science and Engineering*. ISSN 1687-8442. [online] [cit. 2025-02-20]. Dostupné na internete: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2021/5102014>.

BOUABIBSA, I., LAMRI, S. and SANCHETTE, F. 2018. Structure, Mechanical and Tribological Properties of Me-Doped Diamond-Like Carbon (DLC) (Me = Al, Ti, or Nb) Hydrogenated Amorphous Carbon Coatings. In *Coatings* 8(10), 370. [online] [cit. 2025-02-20]. Dostupné na internete: <https://www.mdpi.com/2079-6412/8/10/370>.

DENG, Y., CHEN, W., LI, L. B., WANG, CH., KUANG, T. and LI, Y. 2020. Physical vapor deposition technology for coated cutting tools: A review. In *Ceramics International* Part B 46 (11). ISSN 0272–8842. [cit. 2025-02-20]. Dostupné na internete: <https://2024.sci-hub.box/8277/b8b7449ba77dad2ab316f5ad3737cfbe/10.1016@j.ceramint.2020.04.168.pdf>

DRBÚL, M. a kol. 2014. Strojárska metrológia a kvalita povrchov vytvorených technológiami obrábania. ŽU v Žiline, Strojnícka fakulta, Katedra obrábania a výrobnéj techniky, Žilina. ISBN 9788089276455.

ERDEMIR, A. and MARTIN, M. J. 2018. Superior wear resistance of diamond and DLC coatings. In *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 22(6), pp. 243-254. ISSN 1359-0286. [online] [cit. 2025-03-20]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2018.11.003>.

FLORES-RENTERIA, A. M., ORTIZ- DOMINGUEZ, M., KEDDAM, M., DAMIÁN-MEJÍA, O., ELIAS-ESPINOSA, M., FLORES-GONZÁLEZ, M. A., MEDINA-MORENO, S. A., CRUZ-AVILÉS, A. and VILLANUEVA-IBÁÑEZ, M. 2015. A Simple Kinetic Model for the Growth of Fe₂B Layers on AISI 1026 Steel During the Powder-pack Boriding. In *High Temperature Materials and Processes* 34(1). ISSN 2191-0324. [online] [cit. 2025-02-20] Dostupné na internete: [doi/10.1515/htmp-2014-0004/ht-1](https://doi.org/10.1515/htmp-2014-0004/ht-1).

GÉRARD, B. 2006. Application of thermal spraying in the automobile industry. In *Surface & Coatings Technology* 201 (2006), pp. 2028-2031. ISSN 0257-8972/\$. [online] [cit. 2025-02-20] Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897206004014>.

HAUBNER, R. 2013. The history of hard CVD coatings for tool applications at the University of Technology Vienna. In *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 41, pp. 22-34. ISSN 0263-4368. [cit. 2025-02-20] Dostupné na internete: file:///C:/Users/qsugarova/Downloads/The_history_of_hard_CVD_coatings_for_tool_application.pdf.

CHA, CH. S. and ERDEMIR, A. 2015. Coating Technology for Vehicle Applications. Springer. ISBN 978-3-319-14771-0. [online] [cit. 2025-02-20] Dostupné na internete: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-14771-0>.

CHATE, R., G., KULKARNI, M., R. and NIKHIL, R. 2023. Ceramic material coatings: emerging future applications. In *Advanced Ceramic Coatings for Emerging Applications* pp. 3-17. [online] [cit. 2025-03-20] Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99624-2.00007-3>.

Chemical Vapor Deposition Physics. 2025. MKS [online] [cit. 2025-03-20] Dostupné na internete: <https://www.mks.com/n/cvd-physics>.

CHHIPA, M. S., SHARMA, S. and BAGHA, A. K. 2024. Recent development in polymer coating to prevent corrosion in metals: A review. In *Materials Today: Proceedings, in press*. ISSN 2214-7853 [online] [cit. 2025-02-20] Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.09.001>.

Introduction the galvanic process. 2025. JTF-Jewelry Technology Forum. [online] [cit. 2025-02-20] Dostupné na internete: <https://jtf.it/en/memories/2019/introduction-the-galvanic-process/>.

d=Cj0KCQjw782_BhDjARIsABTv_JDky4YYtp7_PDaUzGAw5K7FGEeR0mh01gYQ8
MChpV_Bg_9Wd1dH1TcaAj61EALw_wcB.

Osaka Fuji Corporation. THERMAL SPRAYING. [online] [cit. 2025-01-30]. Dostupné na internete https://www.ofic.co.jp/en/r_and_d/thermalspraying/.

Physical vapor deposition (PVD). 2025. ATRIA Innovation. [online] [cit. 2025-02-20] Dostupné na internete: <https://atriainnovation.com/en/blog/physical-vapor-deposition-pvd/>.

PRABAKARAN, S. and RAJAN, M. 2021. Chapter One – Biosynthesis of nanoparticles and their roles in numerous areas. In *Comprehensive Analytical Chemistry* 94(2021), pp. 1-47. ISBN 9780323898812. [online] [cit. 2025-02-20] Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/publication/350434928_Biosynthesis_of_nanoparticles_and_their_roles_in_numerous_areas.

PIETSCHMANN, J. 2023. Coating Defects. In: *Industrial powder coating*. Springer, Wiesbaden. [online] [cit. 2025-01-20] Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-37592-88>.

QUADIR, D., SHARIF, R., NASIR, R., AWAD, A. and MANNAN, H. A. 2023. A review on coatings through thermal spraying. In *Chemical Papers* 78. pp. 71-91. ISSN 2585-7290. [online] [cit. 2025-01-15] Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/publication/374348112_A_review_on_coatings_through_the_rmal_spraying.

RAHMAN, M. 2021. Chapter 2 – Sources of nanomaterials. In *Nanomaterials: Synthesis, Characterization, Hazards and Safety*. [online] [cit. 2025-01-20] Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823823-3.00007-0>.

RAMEZANI, M., RIPIN, M. Z., PASANG, T. and CHO-PEI, J. 2023. Surface Engineering of Metals: Techniques, Characterizations and Applications. In *Metals* 13(7), 1299. ISSN 2075-4701. [cit. 2025-01-20] Dostupné na internete: <https://doi.org/10.3390/met13071299>.

REN, Y., ZHANG, L., XIE, G., LI, Z., CHEN, H., GONG1, H., XU, W., GUO, D. and LUO, J. 2021. A review on tribology of polymer composite coatings. In *Friction* 9, pp. 429–470. ISSN 2223-7704. [online] [cit. 2025-01-15] Dostupné na internete: https://file.sciopen.com/sciopen_public/1435163010512052225.pdf.

Rtec Instruments. Scratch Testing Of Hard Coatings. [online] [cit. 2025-03-30]. Dostupné na internete: <https://rtec-instruments.com/indentation-and-scratch-testers/indentation-and-scratch-tester-applications/scratch-testing-of-hard-coatings/>.

RUPETSOV, V. and MINCHEV, R. 2016. Experimental Calo Tester For The Coating Thickness Measurement. In *International Scientific Conference*, 2016, Smolyan – Bulgaria. pp. 188-191. [online] [cit. 2025-03-30]. Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/publication/357838691_EXPERIMENTAL_CALO_TESTER_FOR_THE_COATING_THICKNESS_MEASUREMENT_EXPERIMENTAL_CALO_TESTER_FOR_THE_COATING_THICKNESS_MEASUREMENT.

SAHIN, M., MISIRLI, C. and ÖZKAN, D. 2015. Characteristic properties of AlTiN and TiN coated HSS materials. In *Industrial Lubrication and Tribology* (2015) 67(2). ISSN: 0036-8792. [online] [cit. 2025-03-30]. Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/publication/276868267_Characteristic_properties_of_AlTiN_and_TiN_coated_HSS_materials.

SHARMA, D., MANJU, R., SHARMA, J., AHUJA, S., CHANDRAT, A., BARMANAL, S., and ARYA, R. K. 2021. Polymer Coatings Technology and Applications: Polymer Coating Methods. ISBN 97-80429-1992-26. [online] [cit. 2025-03-30]. Dostupné na internete:

https://www.researchgate.net/publication/345830203_Polymer_Coatings_Technology_and_Applications_Polymer_Coating_Methods.

Specialized Coating Systems. 2014. Coating Defects – Fault Findings. [online] [cit. 2025-03-13]. Dostupné na internete:

https://www.speccoats.co.za/DataSheets/Refinishing_Problems_Defects_Fault_Finding.pdf.

STAVLID, N. 2006. On the Formation of Low-Friction Tribofilms in Me-DLC – Steel Sliding Contacts. In Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 247, Uppsala Universitet. ISBN 91-554-6743-1. [online] [cit. 2025-03-13]. Dostupné na internete: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:169359/FULLTEXT01.pdf>.

ŠULHÁNEK, P., ĎURIŠKA, D., PALCUT, M., BABINCOVÁ, P., SAHUL, M., ČAPLOVIČ, E., KUSÝ, M., OROVČÍK, E., NAGY, Š., SATRAPINSKY, L. HARŠÁNI, M. and ČERNÍKOVÁ, I. 2023. Influence of Isothermal Annealing on Microstructure, Morphology and Oxidation Behavior of AlTiSiN/TiSiN Nanocomposite Coatings. In *Nanomaterials* 13(3), 474. ISSN 2079-4991. [cit. 2025-03-13]. Dostupné na internete: <file:///C:/Users/qsugarova/Downloads/nanomaterials-13-00474-v2.pdf>.

TIWARI, K. S., RAO, U. A., KHARB, S. A., AVASTHI, D. K., VERMA, P. CH. and CHAWLA, A. K. 2024. The effect of sputtering parameters and doping on the properties of CrN-based coatings. A critical review. In *Surface and Interface Analysis* (2024) 56(7), ISSN 1096-9918. [online] [cit. 2025-03-13]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1002/sia.7306>.

VAHLAS, C., CASSUAT, B., SERP, P. and ANGELOPOULOS, G. N. 2006. Principles and applications of CVD powder technology. In *Materials Science and Engineering* 53(2006), pp. 1-72. ISSN 1879-212X. [online] [cit. 2025-02-13]. Dostupné na internete: <https://core.ac.uk/download/pdf/12039263.pdf>.

WALSH, F., WANG, S. and ZHOU, N. 2020. The electrodeposition of composite coatings: Diversity, applications and challenges. In *Current Opinion in Electrochemistry* 20, pp. 8-19. ISSN 2451-9111. [online] [cit. 2025-02-13]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2020.01.011>.

WANG, T., C., ESCUDEIRO, A., POLCAR, T., ALBANO, C., WOOD, R., GAO, J. K., and Langdon, T. 2013. Indentation and scratch testing of DLC-Zr coatings on ultrafine-grained titanium processed by high-pressure torsion. In *Wear* 306 (1-2), pp. 304-310. ISSN 0043-1648. [online] [cit. 2025-02-13]. Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164812004619?via%3Dihub>.

WEI, H., XIA, J., ZHOU, W., ZHOU, L., HUSSAIN, G. LI, Q. and OSTRIKOV, K. 2020. Adhesion and cohesion of epoxy-based industrial composite coatings. In *Composites Part B: Engineering* 193, pp. 108035. ISSN: 1879-1069. [online] [cit. 2025-02-13]. Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836819369951>.

XU, R., WANG, G., and JIANG, P. 2022. Spray Cooling on Enhanced Surfaces: A Review of the Progress and Mechanisms. In ASME. *Journal Electron. Packag.* 144(1): 010802. ISSN 1528-9044 [online] [cit. 2025-02-13]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1115/1.4050046>.

ZANURIN, A., JOHARI, N. A., ALIAS, J., AYU, H. M., REDZUAN, N. and IZMAN, S. 2022. Research progress of sol-gel ceramic coating: A review. In *Materials Today: Proceedings* 48(6). pp. 1849-1854. ISSN 2214-7853. [online] [cit. 2025-03-17]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.203>.

ZENG, A., NETO, F. V., GRACIO, J. J. and FAN, Q. H. 2014. Diamond-like carbon (DLC) films as electrochemical electrodes. In *Diamond and Related Materials* 43, pp. 12-22, ISSN 0925-9635. [online] [cit. 2025-03-17]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2014.01.003>.

ZIA, W. A., HUSSAIN, A. S., and BAIG, M. M. F. A. 2022. Optimizing diamond-like carbon coatings - From experimental era to artificial intelligence. In *Ceramics International* 48(24), pp. 36000-36011. ISSN 0272-8842. [online] [cit. 2025-04-12]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.10.149>.

ZHANG, L, CHEN, Y. et al. YU-PING, F. CHEN, S., QING-LEI, W. and JI-FEI Z. 2015. Electrochemical characterization of AlTiN, AlCrN and AlCrSiWN coatings. In *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 53, pp. 68-73. ISSN 0263-4368. [online] [cit. 2025-01-12]. Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436815000682>.

ZHENG, X., S. 2019. Principles of Organic Coatings and Finishing. Cambridge Scholars Publishing, London 2019. 454. ISBN 1527542386. [online] [cit. 2025-51-12]. Dostupné na internete: <https://www.cambridgescholars.com/resources/pdfs/978-1-5275-4119-1-sample.pdf>.

PodĎakovanie

Tento príspevok vznikol v rámci projektu: *Implementácia inovatívnych foriem učenia a praktického tréningu do vzdelávania v oblasti výrobných technológií a výrobného manažmentu s cieľom zvýšiť atraktivnosť štúdia a podporiť rozvoj prierezových kompetencií absolventov* (026STU-4/2023), s podporou agentúry KEĎA MŠVVaŠ SR.

4 ALTERNATÍVY ÚPRAV AKTÍVNYCH ČASTÍ TVÁRNIACICH NÁSTROJOV

ŠUGÁROVÁ, J. – BÍLIK, J. – ŠUGÁR, P. – GULA, A.

Úvod

Technológii tvárnenia patrí v priemysle veľmi významné postavenie a zaraďuje sa k procesom, ktoré vďaka rôznorodosti a zložitosti tvarov výtvarkov, ale aj požiadaviek na mechanické alebo fyzikálne vlastnosti výtvarkov, neustále napredujú a vyvíjajú sa. Produkty v automobilovom priemysle, leteckom priemysle, či pre zdravotníctvo, ale aj tie najbežnejšie pomôcky v domácnosti sú vyrábané technológiou tvárnenia.

Pre každý typ výtvarku je nutný špecifický tvárniaci nástroj a práve ich rôznorodosť, a tým aj odlišné pracovné podmienky v jednotlivých aplikáciách významným spôsobom ovplyvňujú výber nástrojového materiálu pre aktívne časti tvárniacich nástrojov. Tento výber výraznou mierou ovplyvňuje samotný proces výroby, čo významne determinuje výslednú kvalitu finálnych výrobkov. Materiál tvárniaceho nástroja teda musí mať optimálne mechanické a fyzikálne vlastnosti, aby bola dosiahnutá dostatočná trvanlivosť a životnosť s cieľom, aby finálne výrobky spĺňali kritéria kvality a výrobný proces bol čo najefektívnejší.

Najčastejšie používané materiály aplikované na aktívne časti nástrojov sú legované alebo uhlíkové nástrojové ocele. V poslednom období sa používajú aj iné typy materiálov, ako napr. technická keramika alebo spekané karbidy, ktoré majú v oblastiach nástrojových materiálov významné zastúpenie. Exploatačné vlastnosti týchto materiálov možno zásadným spôsobom ovplyvniť aj vhodne zvolenou povrchovou úpravou. Práve povrchová úprava môže dodať nástroju vlastnosti na to, aby sa významne zvýšila jeho odolnosť proti opotrebeniu, a tým sa zvýšila jeho životnosť.

Predmetom tejto prípadovej štúdie je hodnotenie vlastností povrchových vrstiev nástrojových materiálov K605 a K100 (STN 41 9614, STN 41 9436) po ich modifikácii technológiou chemicko-teplného spracovania, boridovaním. Proces boridovania bol realizovaný pri rôznych kombináciách teploty a času boridovania. Plán experimentu bol navrhnutý tak, že čas aj teplota bola navrhnutá na 4 úrovniach, s fokusáciou na výber tých kombinácií parametrov, aby boli pri energeticky najvýhodnejších kombináciách dosiahnuté optimálne vlastnosti povrchových vrstiev. Na vzorkách bolo realizované hodnotenie mikroštruktúry, konkrétne meranie hrúbok boridických vrstiev (FeB a Fe₂B) a tiež meranie mikrotvrdosti. Ďalej vzorky boli testované na adhéziu, resp. adhézne priľnavosť boridických vrstiev (Mercedes test).

4.1 Materiály aktívnych častí tvárniacich nástrojov

Na aktívne časti tvárniacich nástrojov, ako sú v plošnom tvárnení strižník, strižnica, ťažník, ťažnica, ohybník, ohybnica, ďalej v objemovom tvárnení razník, raznica, pretlačník, pretlačnica, zápustka a iné, sa používajú nástrojové materiály. Nástrojové materiály možno podľa ich chemického zloženia rozdeliť do štyroch skupín: (Jurči a Ptačinová, 2022)

- *Nástrojové ocele* (uhlíkové ocele, legované ocele a rýchlorezné ocele).
- *Spekané karbidy*.
- *Stelity*.
- *Technická keramika*.
- *Nekovové materiály* (napr. syntetický diamant, tvrdé žiaruvzdorné materiály a iné).

Vyrobiteľnosť a dosiahnutie vhodných úžitkových vlastností sú všeobecné požiadavky na materiály nástrojov. Z hľadiska vyrobiteľnosti by mal byť nástroj vyrobený dosiahnuteľnými technológiami obrábania, tepelného, či chemicko-tepelného spracovania a pod. Z hľadiska úžitkových (exploatačných) vlastností by malo použitie nástroja brať do úvahy prevládajúce mechanizmy degradácie. Medzi všeobecne platné úžitkové vlastnosti možno zaradiť: (Jurči a Ptačinová, 2022)

- **Pevnosť** – schopnosť materiálu odolávať zmenám tvaru a rozmerov, t. j. plastickej deformácii.
- **Tvrdosť** – odolnosť materiálu proti vnikaniu cudzích telies. Pri nástrojových oceliach je daná tvrdosťou popustenej martenzitickej matrice, tvrdosťou prítomných karbidických fáz a ich vytvrdzovacím účinkom. Tvrdosť uhlíkových nástrojových ocelí závisí od obsahu C a dosahuje približne 67 HRC. Pri legovaných nástrojových oceliach možno dosiahnuť ešte o niečo vyššiu tvrdosť, a to predovšetkým v dôsledku nahradenia cementitu špeciálnymi karbidmi. Požadovaná tvrdosť pri vyšších teplotách sa dosahuje prídavkom karbidotvorných prvkov, hlavne Cr, V, W a Mo.
- **Húževnatosť** – od húževnatosti závisí životnosť nástrojov pri dynamickom namáhaní. Je ovplyvňovaná hlavne chemickým zložením a tepelným spracovaním. Vysoká húževnatosť nástrojových ocelí sa dosahuje pri nižšom obsahu C a jemnejšom austenitickom zrne. Priaznivo húževnatosť nástrojových ocelí ovplyvňuje aj prísada Ni.
- **Odolnosť proti opotrebeniu** – je dôležitá hlavne pri tvárniacich nástrojoch, pretože ovplyvňuje ich životnosť. Odolnosť proti opotrebeniu úzko súvisí s tvrdosťou nástroja, ale je predovšetkým ovplyvnená množstvom, druhom, tvarom a rozložením karbidov. Závisí teda od obsahu C a obsahu karbidotvorných prvkov. Najúčinnnejšie sú V, ale aj Mo, W a Cr.
- **Odolnosť proti popúšťaniu, tepelná stabilita** – schopnosť nástroja zachovať svoje vlastnosti aj pri zvýšených teplotách. Táto vlastnosť je dôležitá najmä pre nástroje, pracujúce pri teplotách nad 150 až 200 °C. Ide napr. o nástroje na trieskové obrábanie kovov, nástroje na tvárnenie ocelí za tepla, ale aj formy na odlievanie kovov a pod. Uhlíkové nástrojové ocele s rastúcou teplotou popúšťania rýchlo „mäknú“. Zvýšenú odolnosť proti popúšťaniu možno dosiahnuť legovaním prvkami, ktoré posúvajú jednotlivé deje, prebiehajúce pri popúšťaní zakalených ocelí k vyšším teplotám.
- **Prekaliteľnosť** – v prípade napr. rezných nástrojov nie je prekaliteľnosť rozhodujúca, vzhľadom na ich prierezy, avšak pri celej rade ostatných nástrojov (napr. tvárniacich, akými sú veľké zápustky) je niekedy výhodné, ak má pracovný povrch vysokú povrchovú tvrdosť, kým jadro zostáva húževnaté. Dobrú prekaliteľnosť majú uhlíkové nástrojové ocele.
- **Rozmerová stálosť** – ide o požiadavku, ktorá je významná hlavne pre tvarovo presné obrábacie nástroje a meradlá, ale aj pri tvárniacich nástrojoch presných výtvarkov. Príčinou rozmerovej nestability nástrojov sú zostatkové napätia, ktoré vyvolávajú deformácie ako dôsledok štruktúrnych zmien (štruktúrne zostatkové napätia) a rozdielov teplôt medzi povrchom a jadrom nástroja pri tepelnom spracovaní (tepelné zostatkové napätia). Štruktúrne zostatkové napätia sú spojené so zväčšením objemu pri transformácii austenitu na martenzit alebo sú spojené so zmenšením objemu pri precipitácii karbidov. Sú úmerné obsahu C v oceli a možno ich ovplyvňovať legujúcimi prvkami, ktoré zväčšenie objemu znižujú (napr. Si, Mo) alebo aspoň nezväčšujú (Mn). Teplotné zostatkové napätia možno obmedziť rôznymi opatreniami, ako sú tvarové riešenia nástroja, spôsob jeho uloženia pri ohreve, postup pri ohreve a kalení.

- **Technologické vlastnosti** – pri tvarovo zložitých nástrojoch je dôležitou požiadavkou dobrá obrábateľnosť materiálu. Pri nástrojoch (napr. formách, zápustkách, razníkoch a razidlách) na lisovanie plastov je okrem toho uplatňovaná aj požiadavka na ich dobrú leštiteľnosť.
- **Rezná schopnosť** – schopnosť nástroja obrábať (oddeľovať) materiál (napr. rezné alebo strižné nástroje).
- **Špeciálne požiadavky** – sú špecifické pre jednotlivé druhy nástrojov. Ide napr. o koróznú odolnosť, t. j. schopnosť materiálu odolávať chemickým reakciám so spracovávaným materiálom a aj vonkajším prostredím (napr. nástroje na lisovanie), veľkú tepelnú vodivosť a malú tepelnú rozťažnosť (napr. zápustky). Čoraz častejšie sa kladú požiadavky aj na kvalitu aktívnych plôch nástrojov, preto sa na ne nanášajú špeciálne vrstvy alebo povlaky, čím sa dosahuje zvýšenie ich trvanlivosti a životnosti.

Zvýšenie trvanlivosti a životnosti aktívnych častí nástrojov sa dosahuje napr. kalením, povrchovým kalením (laserom alebo elektrónovým lúčom), chemicko-tepelným spracovaním (najčastejšie nitridovaním, boridovaním, difúznym chrómovaním), povlakovaním, t. j. vytváraním tenkých povrchových vrstiev typu TiN a jeho modifikácií a tiež špeciálnymi postupmi, ako sú naváranie, plazmové nástreky prídavných materiálov a galvanické tvrdé chrómovanie (povlaky sú vytvorené elektrolyticky) alebo aj fosfátovanie.

4.1.1 Nástrojové ocele

Nástrojové ocele možno zaradiť do triedy uhlíkových alebo legovaných ocelí, ktoré majú primárne využitie pri výrobe nástrojov vrátane rezných nástrojov, lisovník a lisovníkov, ale aj ručných nástrojov, nožov a ďalších. Existuje viacero druhov nástrojových ocelí, pričom ich použitie závisí od typu aplikácie. Väčšinový podiel týchto materiálov tvoria ocele, ktoré sú vhodné na tepelné spracovanie s cieľom získať vysokú tvrdosť s koncentráciou C viac ako 0,5 %. Chemickým zložením sa nástrojové ocele podobajú bežnejším oceliam s tým rozdielom, že majú vyšší podiel karbidotvorných prvkov. Špecifické vlastnosti týchto ocelí potom určuje použitie širokej škály legujúcich prvkov. Medzi tieto vlastnosti možno zaradiť odolnosť proti opotrebeniu, tvrdosť, pevnosť a húževnatosť. Nástrojové ocele sa vo vysokej miere využívajú pri výrobe produktov, vďaka čomu sú v oblasti výrobných technológií považované za veľmi dôležité. Medzi typické mechanické vlastnosti nástrojových ocelí určených na prácu za studena, ako napr. strihanie, možno zaradiť vysokú tvrdosť (50 až 66 HRC), vysokú odolnosť proti opotrebeniu (úbytok menej ako 20 mg.min⁻¹), nízku rázovú húževnatosť a vysokú pevnosť v tlaku. (Essam a kol., 2023; Zambrano a Jiang, 2023)

Nástrojové ocele sa delia podľa viacerých hľadísk, a to podľa: (Brezinová a kol., 2020)

- A) *Pracovnej teploty.*
- B) *Množstva legujúcich prvkov.*
- C) *Spôsobu výroby.*
- D) *Podľa účelu použitia.*

Podľa **pracovnej teploty** a **množstva legujúcich prvkov** sa delia na:

- do 200 °C – nelegované ocele (množstvo legujúcich prvkov do 5 hm. %),
- od 250 do 300 °C – nízkolegované ocele (množstvo legujúcich prvkov od 5 do 10 hm. %),

- od 400 do 600 °C – vysokolegované ocele (množstvo legujúcich prvkov nad 10 hm. %),
- nad 600 °C – rýchlorezné ocele.

V Tabuľke 4.1 je uvedené rozdelenie nástrojových ocelí podľa chemického zloženia.

Tabuľka 4.1. Rozdelenie nástrojových ocelí podľa chemického zloženia (STN EN 10020)

Nástrojové ocele nelegované	Nástrojové ocele nelegované
C35U (STN 41 9065)	nízkouhlíkové (od 0,3 do 0,6 hm. % C)
C105U (STN 41 9191)	stredneuhlíkové (od 0,5 do 1,1 hm. % C)
C125U (STN 41 9255) ...	vysokouhlíkové (od 1,0 do 1,5 hm. % C)
Nástrojové ocele legované	Nástrojové ocele legované
90MnV8 (STN 41 9312)	nízkoalegované (do 5 hm. % legúr)
35CrMo8 (STN 41 9520)	strednealegované (od 5 do 10 hm. % legúr)
X210Cr12 (STN 41 9436) ...	vysokoalegované (nad 10 hm. % legúr)
Rýchlorezné ocele	Rýchlorezné ocele
HS 3-2-2 (STN 41 9820)	oceľ na bežné použitie
HS 6-5-2 (STN 41 9830)	výkonné ocele
HS 10-5-3-10 (STN 41 9861) ...	vysoko výkonné ocele (+ Co)

Podľa *spôsobu výroby* sú nástrojové ocele:

- vyrábané tvárnením,
- vyrábané odlieváním,
- vyrábané práškovou metalurgiou.

Podľa *účelu použitia* sú nástrojové ocele:

A – ocele na rezné nástroje: (1 – na obrábanie, 2 – na rezanie, krájanie, sekanie).

B – ocele na strižné nástroje: (S – za studena, T – za tepla).

C – ocele pre nástroje na tvárnenie:

S – za studena:

- 1 – na tvarovacie lisovadlá,
- 2 – na ťažné a pretahovacie nástroje,
- 3 – na razidlá a zápustky,
- 4 – na pretlačovadlá,
- 5 – na tlačné nástroje,
- 6 – na valce.

T – za tepla:

- 1 – na kovadlá,
- 2 – na kovadlá na rotačné kovanie,
- 3 – na valce,
- 4 – na zápustky a kovací tŕne,
- 5 – na pretahovacie tŕne,
- 6 – na pretlačovadlá.

D – ocele na formy: (1 – pre tlakové liatie kovov, 2 – na lisovanie kovových a nekovových práškov, 3 – na spracovanie plastov, 4 – na tvárnenie gumy, 5 – na sklo, porcelán a keramický materiál).

E – ocele na nástroje na drvenie a mletie.

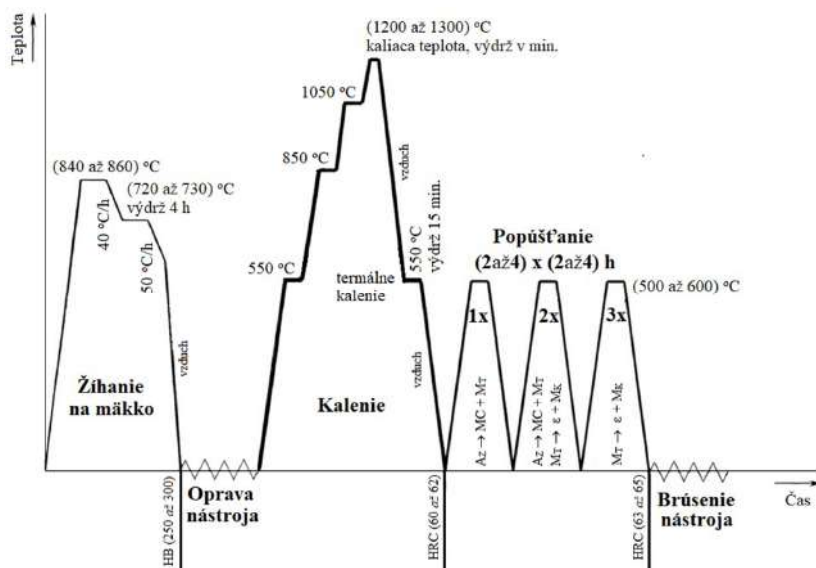
F – ocele na ručné nástroje a náradie: (1 – na obrábanie, 2 – na rezanie, krájanie a sekanie, 3 – na strihanie, 4 – na tvárnenie, 5 – na montážne náradie, 6 – na ihly atď., 7 – na iné druhy ručných nástrojov).

G – ocele na meradlá.

H – ocele na upínacie náradie.

Veľmi dôležité pri výrobe nástrojov z nástrojových ocelí je ich **tepelné spracovanie** (Obr. 4.1). Jeho cieľom je dosiahnuť čo najlepšie vlastnosti a najvhodnejšie mechanické vlastnosti nástroja. Do tepelného spracovania nástrojových ocelí patrí:

1. Žihanie na mätko.
2. Žihanie na zníženie vnútorných napätí.
3. Kalenie.
4. Popúšťanie zakalenej ocele.



Obr. 4.1. Postup tepelného spracovania nástrojových ocelí pri výrobe nástrojov (Brezinová a kol., 2020)

1. **Žihanie na mätko** – používa sa na zlepšenie obrábateľnosti. Najjednoduchší spôsob žihania na mätko spočíva v pomalom ohreve ocele na teplotu približne 850 °C (podľa typu ocele je táto teplota daná v materiálových listoch) s výdržou (4 až 8) h a nasledujúcim pomalým ochladzovaním v peci do teploty (600 až 500) °C a ďalším pozvoľným chladnutím.
2. **Žihanie na zníženie vnútorných napätí** – slúži na zníženie napätí vzniknutých pri obrábaní pred tepelným spracovaním. Spočíva v pomalom ohreve na teplotu (600 až 650) °C s výdržou (1 až 2) h na teplote a pomalom chladnutí v peci. V takomto stave má oceľ perliticko-ledeburitickú štruktúru.
3. **Kalenie** – možno realizovať ochladzovaním na vzduchu alebo v oleji. Niektoré nástrojové ocele, napr. rezné sú samokaliteľné (vďaka vysokému obsahu legúr) a nie je pri nich potrebné používať intenzívne chladiace prostredia. Cieľom kalenia je rozpustenie väčšiny karbidov a dosiahnutie ich nového, jemnejšieho vylúčenia a tiež optimálnych mechanických vlastností.

Nástroje z nástrojových ocelí sa zohrievajú na kaliacu teplotu stupňovito, pretože veľká rýchlosť ohrevu spôsobuje ich praskanie. Kaliaca teplota je vyššia ako pri bežných

konštrukčných oceliach, pohybuje sa v intervale (1200 až 1300) °C. Prvý stupeň ohrevu sa realizuje na vzduchu, ďalšie už v soľnom kúpeli prípadne vo vákuovej peci. Postup ohrevu, napr. rýchloreznej nástrojovej ocele, ktorá sa používa aj na strižníky a strižnice, je tento:

- 1. stupeň ohrevu je na teplotu v intervale (350 až 550) °C, s výdržou (1 až 2) h. Teplota 550 °C je kritickou teplotou, pri ktorej nedochádza k oduhličeniu povrchu nástrojov, preto ho možno vykonať na vzduchu. Cieľom výdrže na teplote je vyrovnať teplotu jadra a povrchu nástroja, a tým zmenšiť tepelné pnutia.
- 2. stupeň ohrevu je na teplotu v intervale (820 až 850) °C, s výdržou (1 až 2) h. Ide o ohrev nad teplotu A_1 , čo umožňuje vyrovnanie štruktúrnych pnutí, ktoré vznikajú zmenou mriežky, teda prekryštalizáciou. Uskutočňuje sa v soľnom kúpeli alebo vo vákuu.
- 3. stupeň ohrevu je na teplotu 1050 °C v soľnom kúpeli. Pri tejto teplote sa karbid $M_{23}C_6$ rozkladá na zložky, ktoré sa rozpúšťajú v austenite a uskutoční sa homogenizácia austenitu. Tento stupeň skracuje dobu zotrvania na kaliacej teplote, a teda znižuje aj nebezpečenstvo zhrubnutia zrna.
- 4. stupeň ohrevu je na teplotu v intervale od 1200 do 1300 °C, s výdržou menej ako 5 min., aby nezhrublo zrno a nenatavili sa tenké rezné hrany nástrojov na obrábanie alebo strižné hrany na strižníkoch a strižniciach. Dĺžka zotrvania na teplote kalenia je závislá od jej výšky. S vyššou kaliacou teplotou sa skracuje čas výdrže. Voľba kaliacej teploty v predpísanom rozmedzí sa riadi predovšetkým tvarom a spôsobom namáhania nástroja pri používaní. Kaliaca teplota pri spodnej hranici kaliaceho intervalu dáva nástroju vyššiu húževnatosť, oteruvzdornosť, odolnosť proti tepelnej únave a menšie rozmerové zmeny. Je teda vhodná pre menšie a tvarovo komplikovanejšie nástroje. Kaliaca teplota pri hornej hranici kaliaceho intervalu zvyšuje prekaliteľnosť, odolnosť proti popúšťaniu a tvrdosť pri zvýšených teplotách, a tým zvyšuje aj životnosť nástrojov. Takáto teplota je vhodná pre väčšie nástroje a nástroje jednoduchých tvarov s minimálnymi rozdielmi v priereze. Po zakalení je štruktúra ocele tvorená nerozpustenými karbidmi M_6C a MC (v množstve asi (5 až 10) %), vysokolegovaným zvyškovým austenitom (v množstve asi (40 až 70) %) a vysokolegovaným martenzitom (zvyšok do 100 %).

Štruktúra po kalení sa skladá z nepopusteného martenzitu a približne 30 % zvyškového austenitu. Po kalení majú tieto štruktúrne zložky vysokú úroveň vnútorných napätí, ktoré sa musia uvoľniť, inak sa nástroj poruší. Rýchlorezné a vysokolegované nástrojové ocele majú dobrú odolnosť voči popúšťaniu, preto sa popúšťajú pri vysokých teplotách.

4. Popúšťanie zakalenej ocele – spôsobí premenu zvyškového austenitu (A_z) na martenzit, premenu tetragonálneho martenzitu (M_T) na martenzit skoro kubický (M_K) a vylúčenie karbidov (MC) disperzne vytvrdzujúcich ocel'. Vysokolegovaný zvyškový austenit je stabilný a počas popúšťania z neho precipitujú karbidy, čím sa zmenší jeho stabilita a časť z neho sa premení na martenzit. Preto treba popúšťať viackrát za sebou: (Jurčí a Ptačinová, 2022)

- po 1. popúšťaní – dochádza k popusteniu martenzitu, časť zvyškového austenitu sa premení na *martenzit I*, zostáva *zvyškový austenit I*, dochádza k precipitácii karbidov z popusteného martenzitu a zvyškového austenitu.

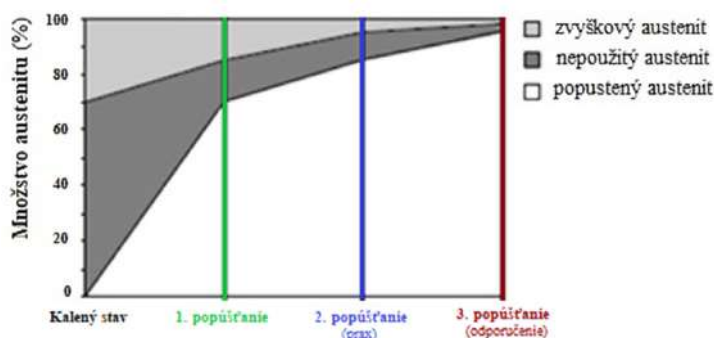
- po 2. popúšťaní – dochádza k popusteniu *martenzitu1*, časť *zvyškového austenitu1* sa premení na *martenzit2*, zostáva *zvyškový austenit2*, dochádza k precipitácii karbidov z popusteného *martenzitu1* a *zvyškového austenitu1*.
- po 3. popúšťaní – dochádza k popusteniu *martenzitu2*, časť *zvyškového austenitu2* sa premení na *martenzit3*, zostáva *zvyškový austenit3*, dochádza k precipitácii karbidov z popusteného *martenzitu2* a *zvyškového austenitu2*.

V Tabuľke 4.2 sú uvedené druhy karbidov, vyskytujúcich sa v nástrojových oceliach.

Tabuľka 4.2. Druhy karbidov, vyskytujúcich sa v nástrojových oceliach (Pluhař a kol., 1989)

Karbid	Tvrdosť (HV)	Prvky	Poznámka
M_3C	950	Fe, Cr	Karbid cementitického typu, je relatívne mäkký.
$M_{23}C_6$	1000 až 1100	Cr	Pri ohreve na kaliaču teplotu sa úplne rozpustí, Cr prechádza do tuhého roztoku a zvyšuje prekaliteľnosť ocele.
M_6C	1200 až 1300	W	Pri ohreve na kaliaču teplotu sa čiastočne rozpúšťa v austenite, z časti zostáva zachovaný a obmedzuje rast austenitického zrna.
M_7C_3	1600 až 1800	Cr	
M_2C	1700 až 1900	W, Mo	Precipituje v štruktúre pri popúšťaní pri (500 až 600) °C.
MC (M_4C_3)	2200 až 3000	V	Jemné veľmi tvrdé karbidy, ktoré sa pri austenitizácii len čiastočne rozpustia a zabraňujú zhrubnutiu austenitického zrna. Precipituje v štruktúre pri popúšťaní pri (500 až 600) °C.

Na Obr. 4.2 je zobrazený vplyv viacnásobného popúšťania nástrojových ocelí na podiel austenitu, zostatkového (zvyškového) austenitu a popusteného austenitu, vo výslednej mikroštruktúre.



Obr. 4.2. Vplyv viacnásobného popúšťania rýchloreznej ocele na podiel austenitu, zostatkového (zvyškového) austenitu a popusteného austenitu vo výslednej mikroštruktúre (Brezinová a kol., 2020)

Popúšťanie nástrojov musí nasledovať v čo najkratšom čase po ich zakalení, lebo základom štruktúry sú nerovnovážne fázy (martenzit + zvyškový austenit), ktoré sa vyznačujú vysokou hustotou dislokácií a bodových porúch.

Dochádza k rozdielom v merných objemoch, ktoré sú spôsobené veľkými vnútornými napätiami, ktoré sú spôsobené pri popúšťaní prebiehajúcimi štruktúrnymi zmenami, pri ktorých sa sústava blíži k rovnovážnemu stavu (mení sa štruktúra, fyzikálne a mechanické vlastnosti). Po treťom, maximálne štvrtom popúšťaní je premenený takmer celý zvyškový austenit, ktorý by sa mohol premieňať pri pracovnej teplote nástroja, aj keď nejaké percento zvyškového austenitu zostáva. Nástroj je rozmerovo stabilný a pripravený na použitie. Čas výdrže na popúšťacej teplote je asi 1 h na každých 25 mm hrúbky, minimálne však 30 min. Rozpad zvyškového austenitu prebieha počas ochladzovania z popúšťacej teploty. Je nutné po každom popúšťaní nástroj ochladiť na teplotu okolia.

Štruktúra nástrojových ocelí je: (Brezinová a kol., 2020)

- **Martenzit** – je to žiaduca štruktúra (tvrdý, pevný, krehký).
- **Zvyškový austenit** – je to nežiaduca štruktúra (mäkký). Jeho množstvo závisí od obsahu C a legujúcich prvkov rozpustených v austenite po výdrži na kaliacej teplote (Cr, Mn, Ni, Co znižujú teplotu Ms a Mf).
- **Karbidy** – je to žiaduca štruktúra. Karbidy vyskytujúce sa v matrici nástrojových ocelí sú tvrdšie ako základná matrica (Tabuľka 4.2), takže zvyšujú odolnosť proti opotrebeniu. Ich vplyv je tým väčší, čím je vyššia ich tvrdosť a plocha povrchu.

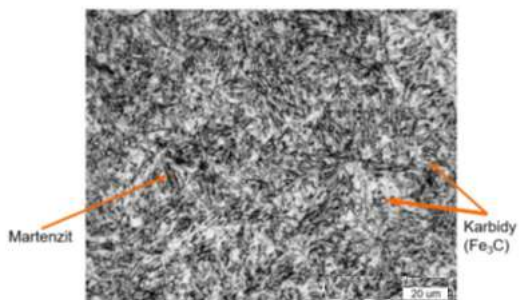
Príklady mikroštruktúr nástrojových ocelí sú uvedené na Obr. 4.3.

Liata nástrojová oceľ 170WV6M3



Nelegovaná oceľ C105U (STN 41 9191)

850 °C / voda / 200 °C

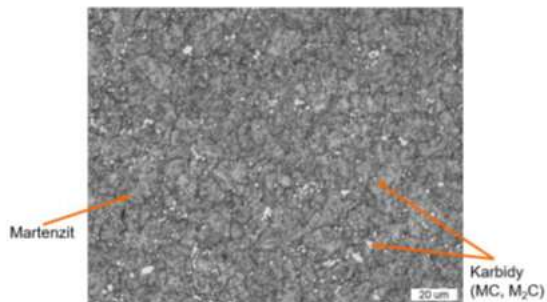


Nástrojová oceľ Vanadis 23 vyrobená metódou práškovej metalurgie



Rýchlorezná oceľ HS 6-5-2 (STN 41 9830)

1200 °C / olej / 550 °C



Obr. 4.3. Príklady mikroštruktúr nástrojových ocelí (Brezinová a kol., 2020)

4.1.1.1 Nástrojové uhlíkové ocele

Nástrojové uhlíkové ocele sa vyrábajú s obsahom uhlíka od 0,3 do približne 1,5 hm. % C. Prítomnosť C v oceli výraznou mierou ovplyvňuje jeho mechanické vlastnosti, vrátane pevnosti, tvrdosti alebo ťažnosti. Zvýšenie obsahu C zvyšuje mechanickú pevnosť a tvrdosť, ale znižuje ťažnosť a zvárateľnosť. Ocele s nižším a stredným obsahom C (podeutektoidné) sa využívajú pri výrobe nástrojov, ktoré nevyžadujú špeciálne požiadavky na tvrdosť. Eutektoidné uhlíkové ocele majú tiež využitie ako ručné náradie pri aplikáciách opracovania dreva, na kladivá, pilníky a niektoré druhy klieští. Nadeutektoidné uhlíkové ocele majú lepšie mechanické vlastnosti a môžu sa použiť napr. na výrobu strižných nástrojov. Majú nízky obsah Mn, pretože zvyšuje podiel zvyškového austenitu, a tým znižuje ich tvrdosť. Kalením sa dosiahne vysoká tvrdosť v povrchových vrstvách, v jadre je nástroj nezakalený. Povrchová vrstva má teda martenzitickú štruktúru, jadro má jemnú perlitickú štruktúru. Húževnaté jadro je výhodné z hľadiska odolnosti nástroja voči rázom. Nelegované nástrojové ocele strácajú pri teplote 150 °C tvrdosť, preto za nemôžu použiť na nástroje pre prácu za tepla.

Uhlíkové nástrojové ocele, ktoré sú vhodné pre nástroje na tvárnenie možno zaradiť napr. ocele STN 41 9132, STN 41 9152, STN 41 9191 a STN 41 9221 a iné, ktoré sa aplikujú nielen v procesoch tvárnenia za studena (strihanie, ťahanie, tlačenie, ohýbanie), ale aj pri tvárnení za tepla (voľné kovanie, zápustkové, valcovanie a iné). (Jurči a Ptačinová, 2022; Šugárová, 2016)

4.1.1.2 Nástrojové legované ocele

Uhlíkové ocele, do ktorých boli zámerne pridané malé percentá legujúcich prvkov ako je napr. Cr alebo V a iné, sa nazývajú legované ocele. Pridanie legovacích prvkov do ocele výraznou mierou modifikuje vlastnosti ocelí a sú vhodnejšie pre špecifickejšie aplikácie ako u uhlíkových ocelí. Medzi najbežnejšie prvky, ktoré sa pridávajú do legovaných ocelí sú Cr, Mo, Ni, Mn, Si, B alebo V. Existujú 3 typy legovaných ocelí: (Brezinová a kol., 2020)

- nízkolegované,
- strednelegované,
- vysokolegované.

Nízkolegovaná oceľ – obsah C je nižší ako 0,25 hm. % a často nižší ako 0,15 hm. % pre špeciálne aplikácie zvarovania. Obsah legúr je do 5 hm. %. Medzi najbežnejšie legovacie prvky patria Cr, Ni, Mo, Si, Mn, V a B. Medzi menej bežné možno zaradiť Cu, Ti, W, Al, Co, Sn alebo Zr. Na zvýšenie prekaliteľnosti a zvýšenie odolnosti proti korózii sa často využíva práve nízkolegovaná oceľ. **Strednelegovaná oceľ** – obsahuje od 5 do 10 hm. % rôznych legujúcich prvkov a **vysokolegovaná oceľ** – obsahuje viac ako 10 hm. % legúr. Vlastnosti takejto ocele významne ovplyvňuje množstvo a typ legujúcich prvkov.

Legované ocele majú vyššiu prekaliteľnosť, vyššiu tvrdosť (60 až 64 HRC) a nižší pokles tvrdosti s nárastom teploty. Legúry zvyšujú stabilitu karbidickej fázy, obmedzujú pokles tvrdosti pri popúšťaní a zvyšujú tvrdosť a odolnosť nástrojov proti opotrebeniu. Legované nástrojové ocele sa kalia do oleja, pričom kaliace teploty sú vyššie ako u nelegovaných ocelí. Výsledná tvrdosť závisí od teploty popúšťania, ktorá je zvyčajne 180 °C.

K nízko a strednelegovaným nástrojovým oceliam, ktoré sú vhodné pre nástroje na tvárnenie možno zaradiť napr. ocele STN 41 9312, STN 41 9314, STN 41 9315,

STN 41 9420, STN 41 9423, STN 41 9426, STN 41 9474, STN 41 9550 a iné. Rovnako k vysokolegovaným nástrojovým oceliam, ktoré sú vhodné pre nástroje na tvárnenie možno zaradiť napr. ocele STN 41 9436, STN 41 9437, STN 41 9438, STN 41 9572, STN 41 9573, STN 41 9574, STN 41 9813, STN 41 9820, STN 41 9829, STN 41 9830, STN 41 9851 a iné, ktoré sa aplikujú nielen v procesoch tvárnenia za studena (strihanie, ťahanie, tlačenie, ohýbanie), ale aj pri tvárnení za tepla (voľné kovanie, zápustkové, valcovanie a iné). (Jurčí a Ptačinová, 2022; Šugárová, 2016)

4.1.1.3 Rýchlorezné nástrojové ocele

Rýchlorezné ocele patria do špeciálnej kategórie nástrojových ocelí, ktoré sa v súčasnosti používajú na rôzne druhy aplikácií v priemyselnej praxi. Štruktúra rýchlorezných ocelí je typicky charakterizovaná značným množstvom karbidických prvkov (až do 50 % celkového objemu), distribuovaných v martenzitickej matrici, vďaka čomu majú rýchlorezné nástrojové ocele výnimočnú povrchovú tvrdosť, odolnosť proti opotrebeniu a odolnosť voči tvoreniu trhlín únavovými zaťažzeniami pri normálnych, ale aj zvýšených teplotách. Rýchlorezné ocele sa vo veľkej miere používajú na súčiastky, ktoré by mali mať vysokú odolnosť voči opotrebeniu ako sú strižné nástroje, rezné nástroje, prípadne nástroje na valcovanie. (Wang a kol., 2023)

Rýchlorezné ocele taktiež patria do skupiny ledeburitických ocelí. Okrem C (0,75 až 2) hm. %, sú legované Cr, W, Mo, V. Vysokovýkonné rýchlorezné ocele obsahujú aj Co a ďalšími legovacími prvkami, ktoré sú známe svojou schopnosťou vytvárať karbidy. Vlastnosti rýchlorezných ocelí závisia od typu, množstva a veľkosti týchto karbidov, pričom celkové množstvo legujúcich prvkov pri týchto oceliach je v rozmedzí (15 až 30) hm. %. (Liu a kol., 2022; Jurčí a Ptačinová, 2022)

Do rýchlorezných nástrojových ocelí, ktoré sú vhodné pre nástroje na tvárnenie, možno zaradiť napr. ocele STN 41 9802, STN 41 9810, STN 41 9813, STN 41 9820, STN 41 9829, STN 41 9830, STN 41 9851 a iné, ktoré sa aplikujú v procesoch tvárnenia za studena, konkrétne strihanie, ťahanie, ale aj pretláčanie, razenie a valcovanie. (BÖHLER Slovakia, 2025b)

4.1.2 Spekané karbidy

Spekané karbidy sa vyznačujú výbornou tvrdosťou, ktorých vlastnosti sa menia minimálne pri teplotách až do 900 °C a tiež výbornou odolnosťou proti opotrebeniu. Spoločnou nevýhodou spekaných karbidov je ich nižšia húževnatosť (napr. v porovnaní s rýchloreznými ocelami). Húževnatosť však možno čiastočne zlepšiť použitím tzv. nanopráškov (vtedy je húževnatosť podobná ako pri rýchlorezných oceliach s obsahom Co), alebo môže byť ovplyvnená obsahom karbidov a spojív (krehkosť sa zvyšuje so zvyšujúcim sa podielom karbidov).

Spekané karbidy sa skladajú z dvoch hlavných zložiek – tvrdých karbidov a spojiva. Najčastejšie používané karbidy sú WC, ale vo vybraných prípadoch sa vyrábajú aj TiC, TaC, Cr₃C₂, príp. zmesi karbidov. Celkové množstvo tvrdých karbidov presahuje 80 obj. %. Ako spojivo (do 20 obj. %) sa používa najčastejšie Co, ďalej koróziivzdorná oceľ alebo Ni.

Spekané karbidy sa vyrábajú práškovou metalurgiou. Tento proces zahŕňa výrobu prášku, prípravu zmesí karbidov a spojív, lisovanie a spekanie v prítomnosti kvapalnej fázy (spojivo

sa roztaví). Typické teploty spekania sú od 1400 do 1700 °C. Alternatívnou možnosťou k tomuto výrobnému procesu je izostatické lisovanie práškových zmesí za tepla.

Aplikácia spekaných karbidov zahŕňa priemyselné odvetvia ako obrábanie (rezné platničky), ale aj technológiu tvárnenia (napr. aktívne časti strižných nástrojov). (Jurči a Ptačinová, 2022)

4.1.3 Stelity

Stelity sú zliatiny na báze Co s prísadami karbidotvorných prvkov ako Cr, W, V, Mo. Obsah Fe nepresahuje 10 hm. %. Hlavnou tvrdou zložkou sú karbidy M_7C_3 , ktoré sú stabilné až do teploty 1000 °C. Tieto karbidy robia zliatinu odolnou proti opotrebeniu a zaisťujú jej reznú (strižnú) schopnosť. Spoločnou nevýhodou stelitov je ich vysoká krehkosť. (Yao a kol., 2018)

V porovnaní s inými nástrojovými materiálmi majú stelity vyššiu tvrdosť ako väčšina známych rýchlorezných ocelí (okrem ocelí s vyšším obsahom V), ale sú krehkejšie. Ich použitie je obmedzené a aplikuje sa v procese navárania, na opravu, napr. strižných, či rezných nástrojov pre prácu za studena, ale aj za tepla, kde sa na nástroje nanáša plazmovým nástrekom stelitový prášok. (Jurči a Ptačinová, 2022)

4.1.4 Technická keramika

Technickú keramiku možno zaradiť medzi skupinu kryštalických materiálov na báze anorganických zlúčenín, ktoré majú nekovový charakter. Keramické materiály sú tvrdé a majú nízku húževnatosť a sú chemicky nereaktívne. Medzi ďalšie vlastnosti možno zaradiť napr. vysokú odolnosť proti opotrebeniu, vynikajúcu tepelnú stabilitu, chemickú inertnosť a rozmerovú stálosť, ktorú si zachováva pri teplotách od 1200 do 1600 °C. Medzi nevýhody patrí veľká krehkosť a malá tepelná vodivosť. Základným materiálom je umelo vyrobený korund (Al_2O_3), ktorý sa zaraďuje k najtrvrdším materiálom, ďalšie východiskové materiály sú oxidy Y_2O_3 , ZrO_2 , karbid TiC a nitrídy TiN a Si_3N_4 . (Kurian a Thankachan, 2023)

Vďaka svojim charakteristickým vlastnostiam majú keramické materiály široké využitie v priemyselnej praxi, a to napr. pri tepelných aplikáciách, kde sa vyžaduje odolnosť voči vysokým teplotám, pri mechanických aplikáciách, kde sa uplatňuje vysoká odolnosť proti opotrebeniu a vysoká tvrdosť, ďalej pri fyzikálnych a chemických aplikáciách, kde je výhodou chemická inertnosť keramiky.

Klasifikácia reznej keramiky je: (Jurči a Ptačinová 2020)

1) Oxidová keramika:

- čistá (Al_2O_3 (99,5 %)),
- polozmesová ($Al_2O_3 + ZrO_2$; $Al_2O_3 + ZrO_2 + CoO$),
- zmiešaná ($Al_2O_3 + TiC$; $Al_2O_3 + ZrO_2 + TiC$; $Al_2O_3 + TiC + TiN$).

2) Nitridová keramika:

- (Si_3N_4 ; $Si_3N_4 + Y_2O_3$; $Si_3N_4 + TiN$; ...).

Ich použitie je rovnako obmedzené ako pri stelitoch, ale nachádza uplatnenie nielen v obrábaní (rezné platničky), ale aj tvárnení, napr. na výrobu tlačných nástrojov v procesoch inkrementálneho tvárnenia – tlačenia. (Jurči a Ptačinová, 2022; Šugárová, 2016)

4.2 Úpravy povrchových vrstiev aktívnych častí tváriacich nástrojov

V nasledujúcej kapitole prípadovej štúdie sú uvedené informácie, týkajúce sa opotrebenia tváriacich nástrojov a jeho vplyvu na ich trvanlivosť a výslednú životnosť. A tiež sú uvedené metódy hodnotenia tribologických vlastností a rôzne typy povrchových úprav, ktoré sa aplikujú na aktívne časti tváriacich nástrojov s cieľom zníženia ich opotrebenia a zlepšenia mechanických, ale aj fyzikálnych vlastností.

4.2.1 Opotrebenie nástrojov na tvárnenie

Pojem opotrebenie možno označiť ako trvalú nežiaducu zmenu povrchu, rozmerov alebo tvaru pevných telies, ktorá sa šíri postupne. Spôsobuje ju interakcia funkčného povrchu s prostredím, ktoré spôsobuje opotrebenie, poprípade ju môže spôsobovať samotné spolupôsobenie dvoch alebo viacerých funkčných povrchov. Mechanické odstraňovanie alebo redistribúcia častíc z opotrebovaného povrchu sú hlavné prejavy opotrebenia. Opotrebenie sa hodnotí úbytkom materiálu, prípadne zmenou kvality a tvaru funkčného povrchu nástroja.

Tvárnenie kovových materiálov je charakteristické relatívnym pohybom medzi nástrojom a výtvarkom pri veľmi vysokých kontaktných tlakoch, t. j. trením, čo môže viesť k silnému opotrebovaniu nástroja, čím je ohrozená stabilita výrobného procesu a tým kvalita finálneho produktu. Pri nástrojoch na tvárnenie je koniec životnosti nástroja často spojený so zvýšením drsnosti výtvarku a s prenosom materiálu z tohto produktu na povrch nástroja. (Tavares a kol., 2021)

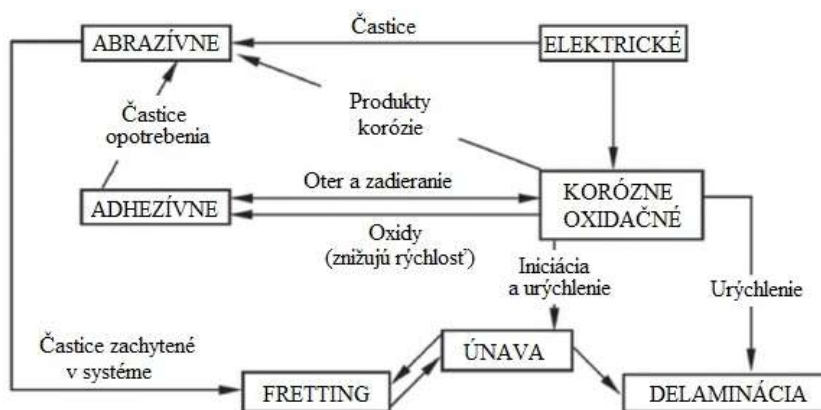
Celkovú životnosť tváriaceho nástroja možno významne ovplyvniť aplikáciou maziva, technologickými parametrami, geometriou nástroja alebo povrchovou úpravou, či údržbou nástroja, ale aj samotným procesom výroby nástrojového materiálu. Všetky parametre, ktoré ovplyvňujú životnosť tváriaceho nástroja sú uvedené na Obr. 4.4.



Obr. 4.4. Parametre, ovplyvňujúce životnosť tváriaceho nástroja (Zdravecká, Tkáčová a Tkáč, 2009)

Existuje viacero pojmov používaných na opis opotrebenia, zahŕňajúce abráziu, adhéziu, oder, oter, pitting, jamkovú koróziu, odlupovanie, mierne opotrebenie, extrémne opotrebenie, eróziu, náraz, oxidačné opotrebenie, fretting, oddelenie materiálu, odlupovanie,

praskanie, delamináciu atď. Niektoré z týchto javov a pojmov opotrebenia sú podobné, čo môže spôsobiť problémy pri pochopení mechanizmov opotrebenia. Na dosiahnutie väčšej jasnosti mechanizmov opotrebenia, sú na Obr. 4.5 zhrnuté vzájomné vzťahy medzi pojmami opotrebenia na základe typov kontaktov, deformačných stavov a princípov odstraňovania materiálu. Všeobecne sa predpokladá, že identifikácia mechanizmu opotrebenia je jedným z najdôležitejších faktorov pri výbere povlaku alebo povrchovej úpravy. Vo väčšine prípadov je však opotrebenie povrchu spojené s niekoľkými mechanizmami opotrebenia, transformujúcimi sa počas procesu trenia jeden na druhý a niekedy dokonca sa vyskytujúci súčasne. (Zdravecká, Tkáčová a Tkáč, 2009)



Obr. 4.5. Interakcie mechanizmov opotrebenia (Zdravecká, Tkáčová a Tkáč, 2009)

Základné druhy opotrebenia, podľa STN 01 5050, možno rozdeliť na:

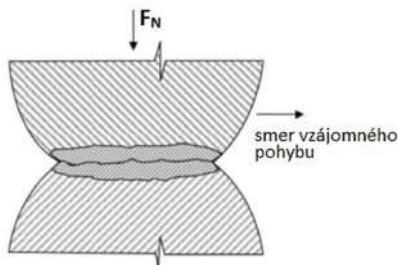
- A) Adhézne opotrebenie.
- B) Abrázívne opotrebenie.
- C) Vibračné opotrebenie (fretting).
- D) Erozívne opotrebenie.
- E) Kavitáciu.
- F) Únavu.

V procesoch tvárnenia sa najčastejšie vyskytujú adhézne opotrebenie a abrazívne opotrebenie, prípadne ich kombinácia, ale aj kontaktná únava.

4.2.1.1 Adhézne opotrebenie

Adhézne opotrebenie je výsledkom mikrospojov, ktoré sú spôsobené spojením protiahlych trecích povrchov, ktoré sú v kontakte. Ku kontaktu týchto plôch však nedochádza celoplošne, ale len vo veľkom počte kontaktných bodov. Tieto miesta sú plasticky deformované (Obr. 4.6) a vznikajú studené mikrospoje. Tieto mikrospoje sa počas relatívneho pohybu kontaktných plôch porušujú. Plastická deformácia vrcholov nerovností spôsobuje ich spevnenie a preto porušenie nie je v mieste pôvodných kontaktných plôch, ale na rozhraní spevneného a nespevneného materiálu. V dôsledku toho sa môžu vytvoriť samostatné častice, ktoré sa môžu správať tromi rôznymi spôsobmi, a to:

- priľnú späť k pôvodnému povrchu,
- zostávajú priľnuté k povrchu druhého materiálu,
- pôsobia ako voľné častice medzi funkčnými povrchmi, ktoré môžu zvýšiť opotrebenie.

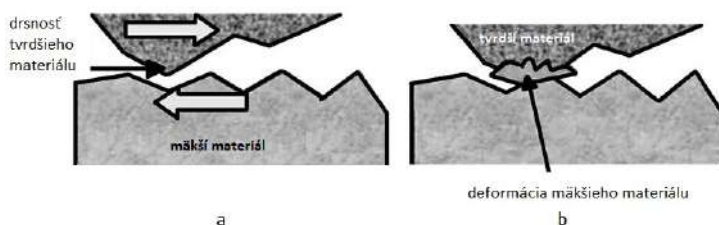


Obr. 4.6. Schéma adhézneho opotrebenia (Jurči a Ptačinová, 2022)

V priemyselnej praxi možno rozsah adhézneho opotrebenia redukovať aplikáciou mazív. Ak použitie mazív nie je možné, adhézne opotrebenie možno eliminovať zvýšením tvrdosti materiálov kontaktnej dvojice, alebo použitím nástrojových ocelí, ktoré majú vyšší obsah karbidov. Samotný rozsah tohto opotrebenia potom závisí od výberu dvojice materiálov a je priamo úmerný klzným podmienkam a zaťaženiu a nepriamo úmerný tvrdosti materiálu.

4.2.1.2 Abrazívne opotrebenie

Abrazívne opotrebenie patrí medzi najčastejšie sa vyskytujúce mechanizmy opotrebovania v priemyselnej praxi (Obr. 4.7). Môže byť spôsobené prítomnosťou tvrdých častíc medzi dvomi vzájomnými trecími povrchmi, ktoré odstraňujú materiál z oboch povrchov alebo sa tieto tvrdé častice môžu usadiť v mäkkom povrchu a odstraňovať materiál z protiahlého telesa. Tento druh abrazívneho opotrebovania sa nazýva trojtelesové abrazívne opotrebovanie. Abrazívne opotrebenie, pri ktorom sa nerovnosti tvrdého povrchu zarývajú do mäkkšieho povrchu protikusu a vytvárajú častice úlomkov sa nazýva dvojtelesové abrazívne opotrebenie. V reálnych podmienkach praxe je najčastejšie pozorovanou formou opotrebovania kombinácia opotrebovania dvomi a tromi telesami.



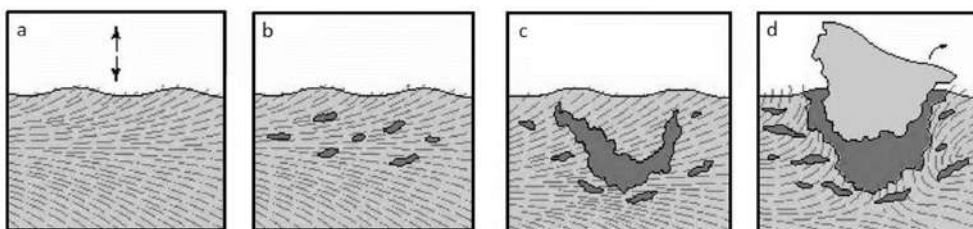
Obr. 4.7. Schéma abrazívneho opotrebenia (Jurči a Ptačinová, 2022)
a – dvojtelesový mechanizmus opotrebenia, b – trojtelesový mechanizmus opotrebenia

V priemyselnej praxi nie je možno abrazívne opotrebenie úplne eliminovať. Existuje však veľa rôznych metód, ktorými sa dá toto opotrebenie redukovať. Jednou z možností je použitie rôznych tesnení, ktoré môžu znížiť vstup cudzích častíc a prachu do konštrukčného

celku. Ďalšou alternatívou môže byť výroba tvrdších povrchov materiálov pomocou kalenia, boridovania, nitridovania, nauhličovania, prípadne fyzikálnymi technikami naparovania.

4.2.1.3 Kontaktná únava

Kontaktná únava je druh opotrebenia, ktorý je spôsobený cyklickým kontaktným namáhaním, a tým vyvolaným napätím v povrchových vrstvách materiálu v dôsledku únavového procesu. V mieste kontaktu (Obr. 4.8) pôsobí medzi stykovými plochami okrem normálového napätia aj sklzové napätie. Je to spôsobené trením, ktoré sa vyskytuje medzi povrchmi v kontaktnej dvojici. V dôsledku cyklického zaťažovania dochádza v oblasti povrchu k plastickej deformácii. Po vyčerpaní plasticity materiálu je iniciovaná tvorba mikrotrhlín v podpovrchovej vrstve materiálu a mikrotrhliny sa v tejto tenkej mikrooblasti šíria (Obr. 4.8b). Potom sa trhliny navzájom spoja (Obr. 4.8c) a materiál sa začne na styčných plochách oddeľovať v dôsledku čoho vznikajú jamky (pitting) (Obr. 4.8d). Vznik poškodenia kontaktnou únavou podporujú materiálové defekty ako inklúzie, pórovitosť, mikrotrhliny a iné. Preto sú pri nástrojových oceliach vysoké požiadavky na kvalitu materiálu (metalurgickú čistotu). Prítomnosť mäkkých mikroštruktúr, ako je zvyškový austenit alebo ferit, taktiež znižuje únavové opotrebovanie komponentov.



Obr. 4.8. Schéma kontaktného únavového opotrebenia (Jurči a Ptačinová, 2022)

4.2.2 Možnosti povrchových úprav aktívnych častí nástrojov

V súčasnosti existuje mnoho rôznych technologických alternatív, pomocou ktorých možno doceliť spevnenie povrchových vrstiev, či už zvýšením ich pevnosti, tvrdosti alebo odolnosti proti opotrebeniu, napr. povrchovým alebo objemovým kalením, tvárnením za studena, vytvrdzovaním, chemicko-teplným spracovaním, tepelno-mechanickým spracovaním, aplikáciou termických nástrekov, práškovou metalurgiou alebo výrobou kompozitných materiálov, čo patrí do skupiny metód, ktorými možno takéto spevnenie a zlepšenie mechanických vlastností dosiahnuť. (Hazlinger, Moravčík a Jurči, 2022)

4.2.2.1 Povrchové kalenie

Povrchové kalenie je proces úpravy povrchov, ktorého cieľom je vytvorenie homogénnej štruktúry zŕn, ktorá má tendenciu zvyšovať ich fyzikálno-chemické a mechanické vlastnosti. Ide hlavne o zvyšovanie tvrdosti, odolnosti proti opotrebeniu, zlepšovanie mikroštruktúrnych vlastností, a tým zvyšovanie životnosti materiálu.

Techniky povrchového kalenia využívajú rýchle povrchové ohrievanie dielu, takže jadro zostáva v podstate chladné. Preto je vstup energie na povrch materiálu vyšší ako prechod tepla do jadra materiálu, a to z dôvodu obmedzenej tepelnej vodivosti všetkých technicky

dôležitých zliatin železa. Taktiež platí, že čím vyššia je hustota energie zdroja tepla, tým menšia je hĺbka zakalenej vrstvy. V priemysle existuje niekoľko metód povrchového kalenia kovov a zliatin. Najrozšírenejšie sú *indukčné kalenie*, *kalenie laserom* a *kalenie elektrónovým lúčom*.

Indukčné kalenie je bezkontaktný proces. Využíva základný princíp elektromagnetickej indukcie na výrobu tepla vo vnútri povrchovej vrstvy materiálu. Teplo vzniká v dôsledku strát v materiáli po umiestnení produktu do silného striedavého magnetického poľa, ktoré je generované elektrickým prúdom. Rýchlosti ohrevu pri indukčnom kalení sa pohybujú v stovkách °C za sekundu. Čím vyššia je frekvencia a výkon, tým je vyššia rýchlosť ohrevu, čo vytvára menšiu kalenú hĺbku. V tejto vrstve sa potom ochladením zahriatej vrstvy vo vhodnom kaliacom médiu vytvorí martenzitická mikroštruktúra.

Laserové kalenie patrí medzi základné techniky bezkontaktného povrchového spracovania materiálu. Medzi vlastnosti lasera, ktoré sa využívajú pri povrchovom tepelnom spracovaní, je vysoká monochromatickosť, koherencia, veľký rozsah kolísania výstupného výkonu, možnosť zaostrenia zväzku na malú plochu, a tým dosiahnutie vysokého výkonu. Hustota energie dosahuje až $1017 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$. Vysoká hustota energie lasera umožňuje veľmi rýchly ohrev kalenej oblasti nad austenitickú teplotu. Potom nastáva samokalenie v dôsledku prenosu tepla z povrchu do jadra materiálu. Tepelná energia absorbovaná povrchovou vrstvou je rýchlo distribuovaná do celého produktu. Táto difúzia tepla má za následok veľmi rýchly pokles teploty v kalenej oblasti. Vysoký gradient chladenia má za následok jemnú martenzitickú štruktúru s vysokou tvrdosťou. Ďalšími hlavnými výhodami v porovnaní s konvenčným kalením sú absencia kaliacich médií a jednoduchá automatizácia. Kalená plocha je obmedzená na povrchovú vrstvu max. do hrúbky 2 mm. Z technologického hľadiska má laserové povrchové kalenie niekoľko výhod, a to:

- vytvorenie tvrdého povrchu odolného proti opotrebeniu na húževnatom jadre,
- možnosť selektívneho povrchového tepelného spracovania zložitých tvarov,
- malý tepelný vplyv na súčiastky a min. deformácie,
- vhodnosť pre konvenčne tepelne spracované materiály ako „doplňkový“ proces,
- proces je rýchly, čistý a ľahko ovládateľný.

Pri **kalení elektrónovým lúčom** je zdrojom tepla prúd urýchlených elektrónov. Bombardovanie povrchu materiálu elektrónovým zväzkom generuje teplo, ktoré sa zvyšuje, kým materiál alebo povrch materiálu nedosiahne austenitizačnú teplotu. Ostatné charakteristiky ovplyvnených vrstiev sú veľmi podobné tým, ktoré boli pripravené tepelným spracovaním laserom. V porovnaní s laserovým kalením má však tepelné spracovanie elektrónovým lúčom jednu nevýhodu, a to potrebu vákuu.

Medzi najvýznamnejšie výhody povrchového kalenia elektrónovým lúčom možno zaradiť: (Hazlinger, Moravčík a Jurči, 2022)

- nižšia energetická náročnosť,
- zmenšenie náchylnosti produktov na deformácie,
- vznik jemnozrnnej mikroštruktúry vrstiev,
- čistejšie pracovné prostredie,
- ekologickejšia prevádzka.

Z kategórie najviac používaných ocelí, na ktoré sa aplikujú metódy povrchového kalenia, patria medzi najviac spoľahlivé predovšetkým uhlíkové ocele, pri ktorých nevznikajú trhliny spôsobené ohrevom a ochladzovaním materiálu. Sú to hlavne ocele s koncentráciou C od 0,4 do 0,5 hm. %. Ďalej legované kalené ocele majú využitie pri aplikáciách, ktoré vyžadujú vysokú húževnatosť a pevnosť, sú to predovšetkým ocele legované prvkami Ni, V, Mo alebo Cr. (Gábrišová a Brusilová, 2019)

Po kalení súčiastok je nasledujúcou operáciou popúšťanie. Hlavným zmyslom procesu popúšťania je dosiahnutie finálnych vlastností súčiastok ako sú húževnatosť, pevnosť a tvrdosť. Z hľadiska použitej teploty možno popúšťanie klasifikovať na: (Jurči a Ptačinová, 2022)

1. **Nízkoteplotné popúšťanie** (do 200 °C) – využitie má najmä pre nauhličené a potom kalené ocele, uhlíkové nástrojové ocele alebo nízkolegované ocele.
2. **Strednoteplotné popúšťanie** (od 300 do 350 °C) – oproti nízkoteplotnému popúšťaniu výraznejšou mierou klesá tvrdosť, využitie má najmä pri strednelegovaných oceliach.
3. **Vysokoteplotné popúšťanie** (od 400 do 650 °C) – pri vysokoteplotnom popúšťaní sa zvyšuje húževnatosť a klesá tvrdosť ocelí, tento typ popúšťania sa zvyčajne používa na ocele, ktoré majú stredný obsah C, a to od 0,3 do 0,5 hm. %.
4. **Popúšťanie na sekundárnu tvrdosť** – zmyslom tohto typu popúšťania je dosiahnutie sekundárnej tvrdosti ocele, vo veľa prípadoch je táto tvrdosť vyššia ako tvrdosť po kalení.

4.2.2.2 Chemicko-tepelné spracovanie materiálov

Proces chemicko-tepelného spracovania materiálov je metóda, pomocou ktorej možno dosiahnuť zmenu chemického zloženia povrchu kovových materiálov. Cieľom chemicko-tepelného spracovania je predovšetkým získanie lepších chemických, fyzikálnych a mechanických vlastností spracovávaného materiálu. Toto spracovanie sa najčastejšie používa na zvýšenie odolnosti proti opotrebeniu a zvýšenie tvrdosti materiálu. (Hazlinger, Moravčík a Jurči, 2022)

Do skupiny chemicko-tepelného spracovania materiálov patria:

- A) *Nauhličovanie.*
- B) *Nitridovanie.*
- C) *Karbonitridovanie.*
- D) *Boridovanie.*

Nauhličovanie alebo cementáciu možno zaradiť medzi najbežnejšiu chemicko-tepelnú úpravu materiálu. Zahŕňa zohrievanie nízkouhlíkovej ocele v prostredí bohatého na C. Uhlík je difúzne sytený na povrch ocele, takže materiál získa povrchovú vrstvu s vysokým obsahom C, ktorá má vyššie hodnoty tvrdosti ako jadro s nižším obsahom C. Tvrdosť tejto vrstvy je od 58 do 62 HRC, pričom povrch zostáva húževnatý a tvárny, takže materiál odoláva značnému únavovému namáhaniu. (Groover, 2010) (Edenhofer a kol., 2015)

Pre proces nauhličovania sú vhodné ocele s nízkym obsahom C do 0,2 hm. %. Teplota nauhličovania je v oblasti austenitu. Najčastejšie sa realizuje v teplotnom intervale 900 až 930 °C. Pri vyššej použitej teplote by veľmi zhrublo zrno (bežne používané ocele majú prah hrubnutia zrna pri teplote 950 °C). Hĺbka nauhličenej vrstvy je zvyčajne v intervale od 0,5 do 1,3 mm.

Proces **nitridovania** možno zaradiť medzi chemicko-tepelné metódy spracovania, pri ktorom je povrch ocele difúzne obohacovaný N. Hlavným cieľom nitridácie je získanie vysokej tvrdosti povrchu a húževnatého jadra materiálu. Medzi vlastnosti, ktoré možno nitridovaním dosiahnuť sú: (Hazlinger, Moravčík a Jurči, 2022)

- zvýšenie povrchovej tvrdosti,
- ochrana súčiastok voči korózii a kavitácii,
- dosiahnutie značnej odolnosti proti mechanickému opotrebeniu,
- pri oceliach možnosť dosiahnutia vysokej medze únavy,
- zvýšenie odolnosti proti zadieraniu,
- zníženie negatívneho účinku vrubov.

Veľmi vhodné ocele na nitridovanie sú vysokolegované nástrojové ocele, predovšetkým chromové ledeburitické nástrojové ocele. (Jurči a Ptačinová 2022)

Karbonitridovanie je proces, pri ktorom sa povrch ocele nasycuje C a N. Výsledkom je vrstva hrúbky zvyčajne od 0,07 do 0,5 mm, pričom tvrdosť tejto vrstvy je porovnateľná s vrstvami, ktoré sa tvoria pri procese nitridovania a nauhličovania. (Groover, 2010)

Do bežnej nauhličovacej atmosféry sa pridáva plynné médium obsahujúce N (amoniak vo väčšine prípadov do 7 až 10 obj. %). Hlavným cieľom pridávania amoniaku je zníženie teploty spracovania. Dusík je silný stabilizátor austenitu a okrem toho podporuje difúziu uhlíka, a tým zvyšuje rýchlosť rastu povrchovo spevnených vrstiev. Typické teploty spracovania sú v rozsahu od 840 do 870 °C (t. j. o 70 až 100 °C nižšie, v porovnaní s nauhličovaním) a typická hĺbka vrstvy by nemala presiahnuť 0,4 mm, aby sa predišlo príliš vysokým podielom zvyškového austenitu. Karbonitrizáciou sa dosahuje:

- a) zníženie koeficientu trenia, a tým zlepšenie odolnosti proti opotrebeniu a zlepšenie klzných vlastností,
- b) zlepšenie odolnosti proti korózii,
- c) zvýšenie tvrdosti povrchu.

Boridovanie je proces chemicko-tepelného spracovania, ktorý sa používa na vytvorenie veľmi tvrdej boridickej vrstvy. Proces sa realizuje v intervale teplôt od 800 do 1050 °C. Vďaka tvrdosti a dosiahnutému nízkemu koeficientu trenia je táto vrstva mimoriadne odolná voči abrazívnemu opotrebeniu a má aj žiaruvzdorné vlastnosti. Boridovanie možno aplikovať na väčšinu materiálov na báze Fe, ale tiež aj na neželezné materiály alebo cermety. Pri boridovaní sa atómy B difundujú do povrchovej vrstvy materiálu, a tým vzniká boridická vrstva. (Winter, Kalucki a Koshel, 2015)

Hrúbky boridovaných vrstiev sú zvyčajne v rozsahu od 0,1 do 0,3 mm a čas boridovania 3 až 6 hodín. Množstvo uhlíka a legujúcich prvkov spomaľuje rast vrstvy boridov. Boridované vrstvy majú až dvojnásobne vyššiu tvrdosť ako vrstvy získané po procese nauhličovania a kalenia. Mikrotvrdosť boridu FeB dosahuje hodnoty 1900 až 2100 HV. Legujúce prvky W, Mo, Mn, Cr tvrdosť mierne zvyšujú. Borid Fe₂B má mikrotvrdosť približne 1650 HV, legujúce prvky tvrdosť Fe₂B neovplyvňujú. Pri ohreve je borid FeB stabilný až do teploty 800 °C a borid Fe₂B až do teploty 1000 °C.

Boridovanie možno použiť pre nelegované aj legované ocele, kde sa vyžadujú nástroje s tvrdým povrchom a s väčšou pevnosťou v tlaku a ohybe. Pri nelegovaných a nízkelegovaných oceliach sa pri boridovaní tvorí nerovná vrstva, ktorá vytvorí pevnejšie spojenie so základným materiálom. V prípade, že sa požaduje odolnosť nástrojov proti

abrazívnemu opotrebeniu, odporúča sa, aby boridovaná vrstva mala hrúbku od 300 do 500 μm , pri adhéznom opotrebení postačuje hrúbka 20 až 120 μm , pričom na hranách by mala byť max. 50 μm .

K aplikáciám boridovania v priemyselnej praxi patria: tvárniace nástroje, nástroje na vytlačovanie, prievlaky na objemové ťahanie (napr. drôtov, tyčí, ...), súčiastky pracujúce v abrazívnom prostredí a iné.

4.2.2.3 Powlakovanie

Povlak možno definovať ako časť materiálu, ktorá je nanosená na povrch základného materiálu (substrátu), odlišujúca sa od základného materiálu chemickým a často aj fázovým zložením so zreteľne oddeleným (bezdifúznym) rozhraním. V praxi existuje množstvo technológií nanášania povlakov, však najvýznamnejšie miesto majú procesy tvorenia tenkých vrstiev z plynnej fázy, a to:

A) *Fyzikálne spôsoby tvorby povlakov vo vákuu (PVD).*

B) *Chemické spôsoby tvorby povlakov (CVD).*

Fyzikálne nanášanie povlakov je nanášanie tenkých vrstiev, ktoré sa premieňajú na plynnú fázu vo vákuovej komore a potom kondenzujú na povrch substrátu ako veľmi tenká vrstva. PVD nanášaním možno aplikovať širokú škálu povlakových materiálov – kovy, zliatiny, keramika a iné anorganické zlúčeniny a dokonca aj niektoré polyméry. (Groover, 2010)

Nástroje v procesoch tvárnenia sú vystavené cyklickému rázovému zaťaženiu. Povlaky s fyzikálnym naparovaním môžu potenciálne zlepšiť životnosť takýchto nástrojov. Aplikácie tenkých tvrdých povlakov na tvárniace nástroje sa používajú aj na zníženie výskytu zadierania, a to zvýšením odolnosti proti opotrebovaniu, reguláciou trenia počas tvárnenia. Pri nástrojoch na tvárnenie sa používa široká škála PVD povlakov a to najmä: povlaky na báze TiN, CrN, TiC, TiAlN, TiCAl a povlaky na báze DLC (Diamond Like Carbon). (Tavares a kol., 2021) (Bobzin, Kalscheuer a Tayyab, 2023)

Pri **chemických spôsoboch tvorby povlakov** je substrát (nástroj) vystavený účinkom jedného popri prípade viacerých plynných prekurzorov, ktoré medzi sebou reagujú alebo sa rozkladajú za vzniku požadovaného materiálu povlaku. Medzi najväčšiu výhodu tejto technológie nanášania povlakov patrí porovnateľná hrúbka povlakov pri všetkých povlakovaných povrchoch, takže povlaky nanášané práve touto technológiou môžu byť aplikované aj na tvarovo komplikovanejšie súčiastky. Medzi ďalšiu výhodu možno zaradiť nanášanie povlakov s vysokou čistotou a taktiež vyššie rýchlosti depozície. (Hazlinger, Moravčík a Jurčí, 2022)

Medzi bežne používané CVD povlaky patria:

- CVD povlak na báze TiC – hlavnou prednosťou tohto povlaku je najmä jeho vysoká tvrdosť (okolo 3700 HV) a dobrá priľnavosť. Využíva sa hlavne pri tlačných a ťažných tvárniacich nástrojoch.
- CVD povlak na báze TiC/TiN – hlavná prednosť je vysoká húževnatosť a využitie má pri nástrojoch na strižné (dierovacie) nástroje alebo rezné platničky na obrábanie.
- CVD povlak na báze TiN/TiC – jeho tvrdosť sa pohybuje okolo 3000 HV. Využitie má najmä pri ťažných a strižných nástrojoch.

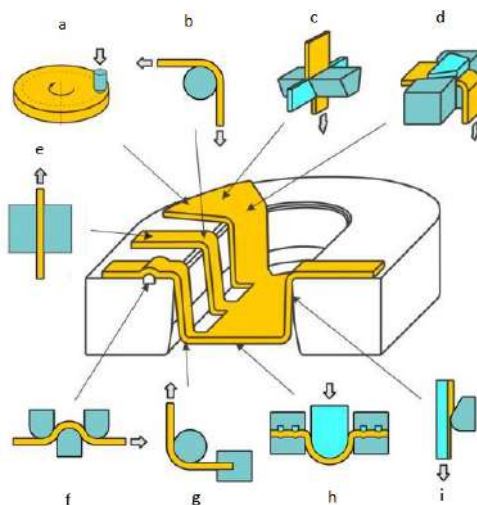
4.2.3 Metódy hodnotenia tribologických vlastností

Tribológia je odbor, ktorý sa zaoberá javmi ako sú trenie, opotrebenie a mazanie. V náväznosti na tribológiu vznikla tribotechnika, ktorú možno špecifikovať ako aplikáciu tribologických poznatkov v priemyselnej praxi. Tribotechnika sa zaoberá postupmi, ktoré redukujú alebo optimalizujú trenie a následné opotrebenie, či nástroja alebo vyrábanej súčiastky. Tribológia predstavuje jednu zo zásadných úloh pri tvárnení materiálov a následnej kvalite výtvarkov. Vlastnosti ako sú drsnosť povrchu tvárnených materiálov alebo tvárniacich nástrojov, ich následná modifikácia pomocou povrchových úprav, ďalej typ mazania patria medzi zásadné parametre finálneho tribologického výkonu. (Trzepieciniski a Lemu, 2019)

V procesoch plošného tvárnenia je veľmi dôležité vyrábať produkty tej najvyššej kvality, t. j. bez defektov ako sú napr. trhliny, zvlnenie, a iné. Preto je veľmi dôležité poznať trecie podmienky nakoľko trecia sila ovplyvňuje rozloženie napätia a následnú tvárnosť materiálu. Údaje o opotrebení možno získať realizáciou tribologických skúšok, ktoré sa delia do troch skupín: (Zdravecká a Ondáč, 2012) (Trzepieciński a Lemu, 2019)

- **Modelové skúšky**, ktoré sa vykonávajú na laboratórnych zariadeniach pracujúcich v režime, ktorý je presne určený.
- **Simulačné skúšky** (Obr. 4.9) na simulačných zariadeniach.
- **Prevádzkové skúšky**, ktoré vykazujú najpreukázanejšie výsledky, ale sú nevýhodné z hľadiska časovej a finančnej náročnosti.

Medzi plechom a lisovnicou sa vyskytujú v procesoch tvárnenia za studena rôzne typy kontaktov. Na Obr. 4.9 sú uvedené príklady simulačných skúšok, ktoré reprezentujú podmienky trenia v oblasti tvárnenia plechov, konkrétne pri ťahaní, ako napr. ťahovanie cez polomer, ťahanie pri ohybe, rovinné ťahanie, ťahanie s redukciou hrúbky a iné.



Obr. 4.9. Tribologické testy pri podmienkach trenia v procese ťahania (Trzepieciński a Lemu, 2019)
a – čap na rovinnom disku (pin on disc) , b – skúška ťaženia cez polomer, c – ťahanie pri tangenciálnom stlačení, d – ťahanie pri ohybe, e – rovinné ťahanie (strip-drawing test), f – ťahanie cez obrubu (raw-bead test), g – ťahanie cez polomer (strip-tension test), h – hemisférické ťahanie, i – ťahanie s redukciou hrúbky (strip-reduction test)

4.3 Experimentálna analýza vlastností boridovaných povrchových vrstiev – prípadová štúdia

Nasledujúca časť prípadovej štúdie sa bude venovať chemicko-tepelnému spracovaniu, konkrétne difúznemu boridovaniu nástrojových ocelí s označením K605 (STN 41 9614) a K100 (STN 41 9436). Proces boridovania bol realizovaný pri rôznych teplotách a časoch boridovania (Tabuľka 4.4) a ďalším hodnotením vlastností povrchovej vrstvy, ako sú hrúbka boridickej vrstvy, mikrotvrdosť boridickej vrstvy a taktiež z hľadiska jej adhézneho kvality metódou (Mercedes test).

Materiál K605 je nástrojová oceľ na prácu za studena s veľmi dobrou prekaliteľnosťou a húževnatosťou. Využitie má predovšetkým pri nástrojoch na plošné a objemové tvárnenie za studena. Materiál K100 je ledeburitická chrómová nástrojová oceľ, ktorá veľmi dobre odoláva rozmerovým zmenám, vyznačuje sa vysokou odolnosťou proti abrazívnemu opotrebeniu a má dobrú húževnatosť. Má využitie pri nástrojoch na plošné a objemové tvárnenie za studena. Chemické zloženie nástrojových ocelí je uvedené v Tabuľke 4.3. Pri oceli K605 je najviac zastúpený Ni, ktorý sa pridáva do ocelí s cieľom zvýšenia ich húževnatosti. Pri oceli K100 je najviac zastúpený Cr, ktorý sa pridáva na zvýšenie tvrdosti, odolnosti proti opotrebeniu a zlepšuje odolnosť ocelí voči korózii. (BÖHLER Slovakia, 2025a)

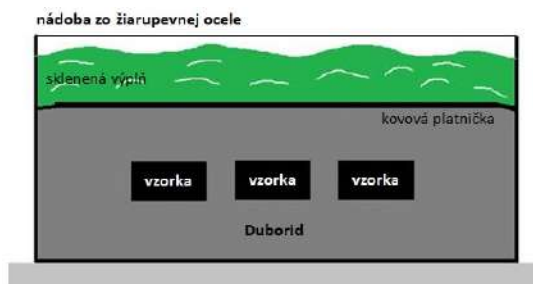
Tabuľka 4.3. Chemické zloženie materiálu K605 a K100 (BÖHLER Slovakia, 2025a)

	C (hm. %)	Mn (hm. %)	Cr (hm. %)	Mo (hm. %)	Ni (hm. %)	Si (hm. %)
K605	0,55	0,40	1,00	0,25	3.00	0.30
K100	2.00	0.35	11.5	–	–	0,25

Z uvedených materiálov boli na obrábacom centre DMG HSC105 vyrobené vzorky rozmerov 15 x 15 x 10 mm, ktoré boli brúsené na parameter drsnosti Ra 0,8 μm . Na takto pripravených vzorkách bolo realizované boridovanie.

4.3.1 Boridovanie

Proces difúzneho boridovania bol realizovaný v tuhom prostredí, v komorovej elektrickej peci MLM, na ktorej je možný ohrev na teplotu max. 1200 °C. Medzi najväčšie výhody difúzneho boridovania možno zaradiť predovšetkým nenáročnosť celého procesu z hľadiska nákladov, prípadne na iné doplnkové vybavenie. Ako tuhé prostredie bol použitý boridovací prášok Durborid, ktorým boli odmastené vzorky zasypané v nádobe zo žiaruvzdornej ocele a oddelené od pecnej atmosféry kovovou platničkou a sklenenou výplňou (drvené sklo sa počas stúpajúcej teploty v peci roztaví, a tak hermeticky uzatvorí nádobu). Ilustračné znázornenie procesu difúzneho boridovania je uvedené na Obr. 4.10.



Obr. 4.10. Schéma difúzneho boridovania v tuhom prostredí (Gula, 2024)

Prášková zmes Durborid je tvorená zo 60 % ferrobóru, prípadne karbidu bóru, ďalších približne 37 % zmesi je mletý šamot a okolo 3 % tvorí NH_4Cl . Na základe zvoleného typu prostredia boridovania, pre ktoré sú typické teploty boridovania od 800 do 1100 °C, boli na experiment navrhnuté 4 teploty boridovania (900, 950, 1000 a 1050 °C) s časmi boridovania (4, 6, 8 a 10 h) s výberom tých kombinácií, ktoré možno definovať za ekonomicky a environmentálne optimálne.

Obidva typy materiálu boli boridované pri rovnakých kombináciách parametrov (Tabuľka 4.4) (8 vzoriek z materiálu K605₍₆₎ a 8 vzoriek z materiálu K100₍₁₎ (jedna kombinácia parametrov je však spoločná, t. j. na experiment sa použilo 14 vzoriek). Cieľom takto zvolených vstupných parametrov boridovania bolo porovnanie výsledných vlastností vzoriek na jednej strane z hľadiska stúpajúceho času boridovania pri najnižšej teplote boridovania a na druhej strane stúpajúcej teploty boridovania pri najkratšom čase boridovania. Tieto vzorky boli potom porovnané so vzorkami získanými boridovaním pri maximálnej teplote s maximálnym časom boridovania (vzorka K644 (K605) a vzorka K144 (K100) – 10 h, 1050 °C), čo bolo celkovo 16 experimentálnych vzoriek.

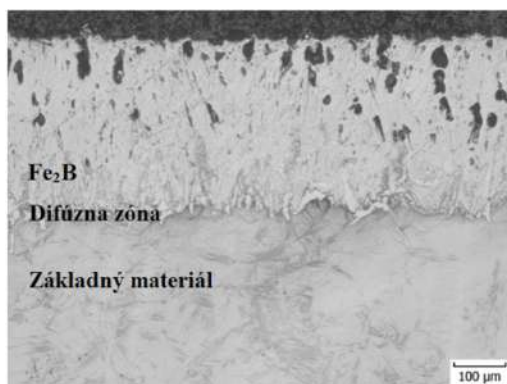
Tabuľka 4.4. Parametre boridovania a označenie vzoriek materiálov K605₍₆₎ a K100₍₁₎

Čas boridovania (h)	Teplota boridovania (°C)			
	900 ₍₁₎	950 ₍₂₎	1000 ₍₃₎	1050 ₍₄₎
4 ₍₁₎	K611 K111	K612 K112	K613 K113	K614 K114
6 ₍₂₎	K621 K121	–	–	–
8 ₍₃₎	K631 K131	–	–	–
10 ₍₄₎	K641 K141	–	–	K644 K144

4.3.2 Mikroštruktúrna analýza vzoriek po boridovaní

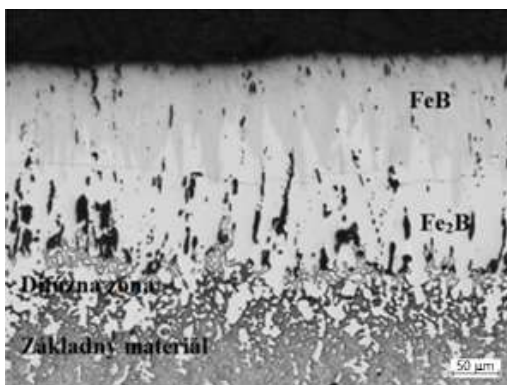
Pred mikroštruktúrnou analýzou sa vzorky pripravili (zalisovali) pomocou automatického lisu Buehler Simplimet 1000 s použitím práškovej zmesi z tvrdej živice Buehler EpoMet a následne sa hodnotené plochy pripravili brúsením a leštením za mokra na zariadení Buehler EcoMet 300. Brúsenie sa realizovalo na kotúčoch so zrnitosťou P80 a potom na jemnejších o zrnitosti P280, P600 a P1200. Na každom brúsnom kotúči sa vzorky brúsili 10 min. Následne boli leptané 5 % Nitalom počas 5 s.

Na všetkých vzorkách z materiálu K605 sa boridická vrstva vytvorila len vo forme Fe_2B a tvrdšia súvislá boridická vrstva FeB pozorovaná nebola na žiadnej vzorke tohto materiálu. Príčinou absencie tvrdšej vrstvy môže byť chemické zloženie danej ocele, ktorá významnou mierou ovplyvňuje tvorbu tejto vrstvy. Na niektorých vzorkách sa však vyskytovali malé ostrovčeky FeB vo vrstve Fe_2B . Na Obr. 4.11 je možno pozorovať jednotlivé vrstvy na vzorke K644, ktorá sa difúzne boridovala 10 h pri teplote 1050°C , a kde sú pozorované boridická vrstva Fe_2B , difúzna zóna, ktorá sa nachádza tesne pod boridickou vrstvou a základný materiál.



Obr. 4.11. Mikroštruktúra vzorky K644 po boridovaní (10 h, 1050°C)

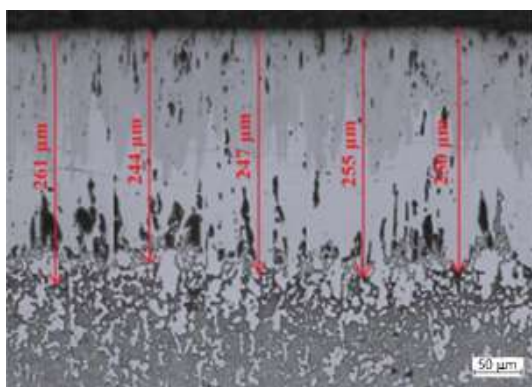
Na vzorkách z materiálu K100 bola na mikroštruktúre pozorovaná aj tvrdšia vrstva FeB a to pri teplotách 950°C , 1000°C a 1050°C . Pri teplote 900°C sa v mikroštruktúre vyskytovala len vrstva Fe_2B , na základe čoho možno konštatovať, že pri tomto materiáli má teplota boridovania významný vplyv na tvorbu súvislej tvrdšej vrstvy FeB . Mikroštruktúra vzorky K144, ktorá sa boridovala 10 h pri teplote 1050°C je uvedená na Obr. 4.12. Pri tejto vzorke okrem vrstvy Fe_2B možno pozorovať aj súvislú vrstvu FeB .



Obr. 4.12. Mikroštruktúra vzorky K114 po boridovaní (4 h, 1050°C) (Gula, 2024)

4.3.3 Hodnotenie hrúbky boridickej vrstvy

Hrúbka boridickej vrstvy bola hodnotená na snímkach, vyhotovených na optickom mikroskope ZEISS JENA NEOPHOT 32, kde sa pomocou mierky a programu ImageJ na jednotlivých boridovaných vzorkách merala dosiahnutá hrúbka boridickej vrstvy. Meranie každej vrstvy sa realizovalo 5-krát (Obr. 4.13), z ktorých sa potom počítala stredná aritmetická hodnota. V Tabuľke 4.5 sú uvedené priemerné hodnoty hrúbky boridickej vrstvy a odchýlka merania pri všetkých vzorkách z materiálu K605 pri a meniacej sa teplote a konštantnom čase boridovania 4 h. Posledný riadok v tabuľke predstavuje porovnávaciu vzorku, ktorá sa boridovala pri najvyšších parametroch (t. j. K644, 1050 °C, 10 h).

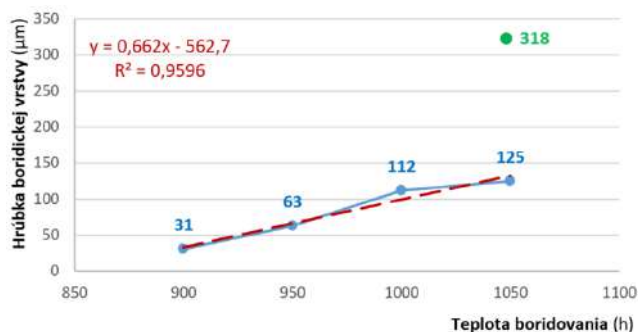


Obr. 4.13. Meranie hrúbky boridickej vrstvy na vzorke K144 (10 h, 1050 °C) (Gula, 2024)

Tabuľka 4.5. Priemerná hrúbka boridickej vrstvy, pri meniacej sa teplote a konštantnom čase boridovania 4 h z materiálu K605

Vzorka	Hrúbka boridickej vrstvy (μm)	Odchýlka merania
K611	31,5	± 2,4
K612	63,7	± 5,8
K613	112,4	± 17,8
K614	125,3	± 16,9
K644	318,6	± 11,0

Na Obr. 4.14 je graf, zobrazujúci trend rastu hrúbky boridickej vrstvy pre materiál K605, pri konštantnom čase boridovania 4 h.



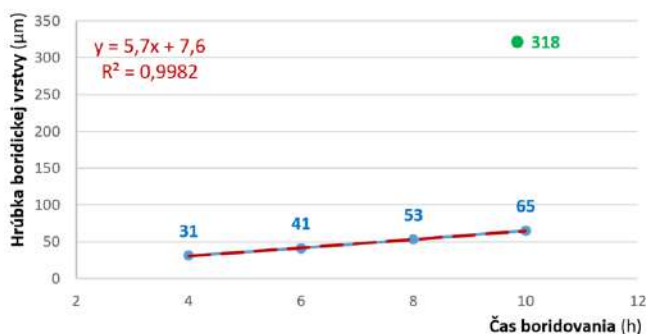
Obr. 4.14. Trend rastu hrúbky boridickej vrstvy materiálu K605 pri meniacей sa teplote a konštantnom čase boridovania (4 h)

V Tabuľke 4.6 sú uvedené priemerné hodnoty hrúbky boridickej vrstvy a odchýlka merania pri všetkých vzorkách z materiálu K605, pri meniacom sa čase a konštantnej teplote boridovania (900 °C). Posledný riadok v tabuľke predstavuje porovnávaciu vzorku, ktorá sa boridovala pri najvyšších parametroch (t. j. K644, 1050 °C, 10 h).

Tabuľka 4.6. Priemerná hrúbka boridickej vrstvy, pri meniacom sa čase a konštantnej teplote boridovania (900 °C). z materiálu K605

Vzorka	Hrúbka boridickej vrstvy (µm)	Odchýlka merania
K611	31,5	± 2,4
K621	41,4	± 3,0
K631	53,2	± 5,0
K641	65,1	± 6,5
K644	318,6	± 11,0

Na Obr. 4.15 je graf, zobrazujúci trend rastu hrúbky boridickej vrstvy pre materiál K605, pri konštantnej teplote boridovania 900 °C.



Obr. 4.15. Trend rastu hrúbky boridickej vrstvy materiálu K605 pri meniacom sa čase a konštantnej teplote boridovania (900 °C)

Z grafov na Obr. 4.14 a Obr. 4.15 vyplýva, že pri materiáli K605 sa hrúbka boridickej vrstvy mierne zvyšuje s narastajúcim časom boridovania pri konštantnej teplote boridovania,

ale výraznejšie s narastajúcou teplotou boridovania pri konštantnom čase boridovania. Väčšie namerané hodnoty hrúbky boridickej vrstvy teda mali vzorky, pri ktorých sa postupne zvyšovala teplota boridovania, kde sa hrúbka boridickej vrstvy pohybovala od 31 do 125 μm . Hodnoty hrúbky boridickej vrstvy vzoriek, pri ktorých sa postupne zvyšoval čas boridovania, sa hrúbka boridickej vrstvy pohybovala od 31 do 65 μm . V oboch prípadoch boli dosiahnuté hrúbky boridickej vrstvy, vhodné pre procesy s adhézny opotrebením, ktoré je typické v procesoch tvárnenia.

Matematický vzťah na výpočet hrúbky boridickej vrstvy materiálu K605 pre konštantný čas boridovania 4 h ($h_{B_4}^{K605}$) opisuje vzťah (4.1):

$$h_{B_4}^{K605} = 0,662T_B - 562,7 \quad (4.1)$$

kde $h_{B_4}^{K605}$ je hrúbka boridickej vrstvy pre konštantný čas boridovania 4 h v μm ,
 T_B – teplota boridovania v $^{\circ}\text{C}$.

Matematický vzťah na výpočet hrúbky boridickej vrstvy materiálu K605 pre konštantnú teplotu boridovania 900 $^{\circ}\text{C}$ ($h_{B_{900}}^{K605}$) opisuje vzťah (4.2):

$$h_{B_{900}}^{K605} = 5,7t_B + 7,6 \quad (4.2)$$

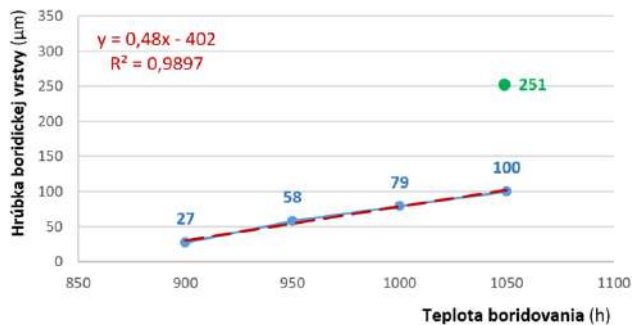
kde $h_{B_{900}}^{K605}$ je hrúbka boridickej vrstvy pre konštantnú teplotu boridovania 900 $^{\circ}\text{C}$ v μm ,
 t_B – čas boridovania v h.

V Tabuľke 4.7 sú uvedené priemerné hodnoty hrúbky boridickej vrstvy a odchýlka merania pri všetkých vzorkách z materiálu K100 pri a meniacej sa teplote a konštantnom čase boridovania 4 h. Posledný riadok v tabuľke predstavuje porovnávaci vzorku, ktorá sa boridovala pri najvyšších parametroch (t. j. K144, 1050 $^{\circ}\text{C}$, 10 h).

Tabuľka 4.7. Priemerná hrúbka boridickej vrstvy, pri meniacej sa teplote a konštantnom čase boridovania 4 h z materiálu K100

Vzorka	Hrúbka boridickej vrstvy (μm)	Odchýlka merania
K111	27,4	$\pm 4,1$
K112	58,1	$\pm 14,0$
K113	79,6	$\pm 11,7$
K114	100,2	$\pm 6,8$
K144	251,9	$\pm 6,8$

Na Obr. 4.16 je graf, zobrazujúci trend rastu hrúbky boridickej vrstvy pre materiál K100, pri konštantnom čase boridovania 4 h.



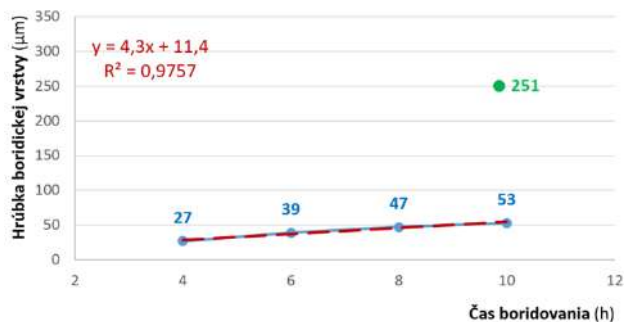
Obr. 4.16. Trend rastu hrúbky boridickej vrstvy materiálu K100 pri meniacей sa teplote a konštantnom čase boridovania (4 h)

V Tabuľke 4.8 sú uvedené priemerné hodnoty hrúbky boridickej vrstvy a odchýlka merania pri všetkých vzorkách z materiálu K100, pri meniacom sa čase a konštantnej teplote boridovania (900 °C). Posledný riadok v tabuľke predstavuje porovnávaciu vzorku, ktorá sa boridovala pri najvyšších parametroch (t. j. K144, 1050 °C, 10 h).

Tabuľka 4.8. Priemerná hrúbka boridickej vrstvy, pri meniacom sa čase a konštantnej teplote boridovania (900 °C). z materiálu K100

Vzorka	Hrúbka boridickej vrstvy (µm)	Odchýlka merania
K111	27,4	± 4,1
K121	39,3	± 4,0
K131	47,7	± 1,8
K141	53,5	± 3,0
K144	251,9	± 6,8

Na Obr. 4.17 je graf, zobrazujúci trend rastu hrúbky boridickej vrstvy pre materiál K100, pri konštantnej teplote boridovania 900 °C.



Obr. 4.17. Trend rastu hrúbky boridickej vrstvy materiálu K100 pri meniacom sa čase a konštantnej teplote boridovania (900 °C)

Z grafov na Obr. 4.16 a Obr. 4.17 tak, ako pri materiáli K605 vyplýva, že pri materiáli K100 hrúbka boridickej vrstvy sa mierne zvyšuje s narastajúcim časom boridovania pri

konštantnej teplote boridovania, ale výraznejšie s narastajúcou teplotou boridovania pri konštantnom čase boridovania. Väčšie namerané hodnoty hrúbky boridickej vrstvy teda mali vzorky, pri ktorých sa postupne zvyšovala teplota boridovania, kde sa hrúbka boridickej vrstvy pohybovala od 27 do 100 μm . Hodnoty hrúbky boridickej vrstvy vzoriek, pri ktorých sa postupne zvyšoval čas boridovania, sa hrúbka boridickej vrstvy pohybovala od 27 do 53 μm . V obidvoch prípadoch boli dosiahnuté hrúbky boridickej vrstvy, vhodné pre procesy s adhéznym opotrebením, ktoré je typické v procesoch tvárnenia.

Matematický vzťah na výpočet hrúbky boridickej vrstvy ($h_{B_4}^{K100}$) materiálu K100 pre konštantný čas boridovania 4 h opisuje vzťah (4.3):

$$h_{B_4}^{K100} = 0,48T_B - 402 \quad (4.3)$$

kde $h_{B_4}^{K100}$ je hrúbka boridickej vrstvy pre konštantný čas boridovania 4 h v μm ,
 T_B – teplota boridovania v $^{\circ}\text{C}$.

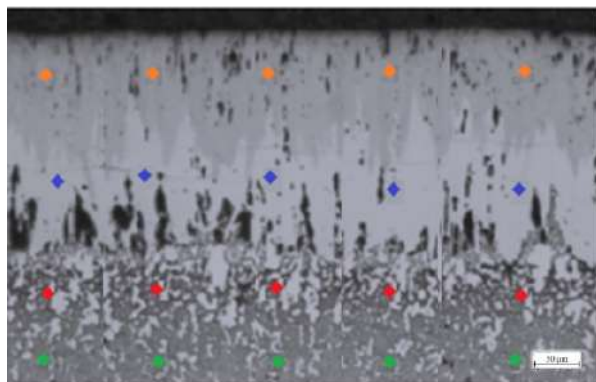
Matematický vzťah na výpočet hrúbky boridickej vrstvy ($h_{B_{900}}^{K100}$) materiálu K100 pre konštantnú teplotu boridovania 900 $^{\circ}\text{C}$ opisuje vzťah (4.4):

$$h_{B_{900}}^{K100} = 4,3t_B + 11,4 \quad (4.4)$$

kde $h_{B_{900}}^{K100}$ je hrúbka boridickej vrstvy pre konštantnú teplotu boridovania 900 $^{\circ}\text{C}$ v μm ,
 t_B – čas boridovania v h.

4.3.4 Hodnotenie mikrotvrdosti boridickej vrstvy

Hodnotenie mikrotvrdosti boridickej vrstvy sa realizovalo podľa Vickersa so zaťažením 1 N (HV0,1) na mikrotvrdometri ZEISS JENA NEOPHOT 21. Na každej hodnotenej vzorke bolo v jednotlivých oblastiach vykonaných 5 meraní (Obr. 4.18), z ktorých sa potom počítala stredná aritmetická hodnota, a to v oblasti intermediárnych fáz FeB (pri materiáli K100 a pri vyšších teplotách) (oranžové vtlačky), v oblasti Fe_2B (modré vtlačky), difúznej zóny (červené vtlačky) a v základnom materiáli (zelené vtlačky).



Obr. 4.18. Príklad merania mikrotvrdosti na vzorke K144 (10 h, 1050 $^{\circ}\text{C}$) (Gula, 2024)

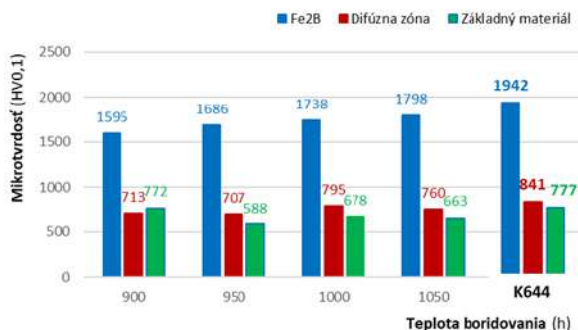
V Tabuľke 4.9 sú uvedené priemerné hodnoty mikrotvrdości boridickej vrstvy a odchýlka merania pri všetkých vzorkách z materiálu K605 pri meniackej sa teplote a konštantnom čase boridovania 4 h. Posledný riadok v tabuľke predstavuje porovnávaciu vzorku, ktorá sa boridovala pri najvyšších parametroch (t. j. K644, 1050 °C, 10 h). V prípade vzoriek z materiálu K605 boli pozorované len oblasti Fe₂B, difúzna zóna a základný materiál. Oblasť FeB pozorovaná nebola, avšak namerané hodnoty, s prihliadnutím aj na hodnoty odchýlok merania, predikujú prítomnosť lokálnych ložísk tejto tvrdšej fázy, ktorá podľa literatúry môže dosahovať hodnotu okolo 2000 HV_{0,1} a vrstva Fe₂B okolo 1600 HV_{0,1}.

Tabuľka 4.9. Priemerná mikrotvrdosť boridickej vrstvy, pri meniackej sa teplote a konštantnom čase boridovania 4 h z materiálu K605

Vzorka	Oblasť merania		
	Fe ₂ B (HV _{0,1})	Difúzna zóna (HV _{0,1})	Základný materiál (HV _{0,1})
K611	1595 ± 24,7	713 ± 26,5	772 ± 16,1
K612	1686 ± 71,1	707 ± 51,8	588 ± 60,0
K613	1738 ± 42,8	795 ± 75,9	678 ± 25,0
K614	1798 ± 92,9	760 ± 34,8	663 ± 9,9
K644	1942 ± 87,6	841 ± 38,7	777 ± 78,9

Na Obr. 4.19 je graf s priemernými hodnotami mikrotvrdości vzoriek z materiálu K605, pri meniackej sa teplote a konštantnom čase boridovania (4 h) (stĺpce s teplotou 900, 950, 1000 a 1050 °C), pričom posledný trojstĺpec uvádza hodnoty namerané na porovnávacej vzorke K644.

Z grafu vyplýva, že so zvyšujúcou teplotou sa mikrotvrdosť v oblasti Fe₂B zvyšovala, pričom sa mikrotvrdosťou 1798 HV_{0,1} najviac k porovnávacej vzorke priblížila vzorka K614 (4 h, 1050 °C). Ďalej na vzorke K613 (4 h, 1000 °C) bola nameraná mikrotvrdosť 1738 HV_{0,1}. V oboch prípadoch bol zaznamenaný min. rozdiel v hodnotách mikrotvrdości (144 HV_{0,1} a 204 HV_{0,1}). Je však nutné upriamiť pozornosť aj na hodnotu mikrotvrdości vzorky K612 (1686 HV_{0,1}), ktorá je postačujúca pre aplikácie v procesoch tvárnenia, a preto možno z ekonomického hľadiska konštatovať, že nielen zvyšovanie času boridovania nie je nutné, ale je postačujúce aj boridovanie na teplote 950 °C.



Obr. 4.19. Mikrotvrdosť boridickej vrstvy materiálu K605 pri meniackej sa teplote a konštantnom čase boridovania (4 h)

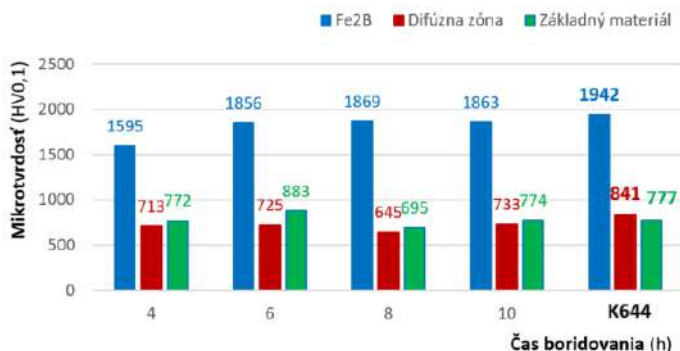
V Tabuľke 4.10 sú uvedené priemerné hodnoty mikrotvrdości boridickej vrstvy a odchýlka merania pri všetkých vzorkách z materiálu K605 pri a meniacom sa čase a konštantnej teplote boridovania 900 °C. Posledný riadok v tabuľke predstavuje porovnávaciu vzorku, ktorá sa boridovala pri najvyšších parametroch (t. j. K644, 1050 °C, 10 h). Rovnako aj v tomto prípade na vzorkách z materiálu K605 boli pozorované iba oblasti Fe₂B, difúzna zóna a základný materiál. Oblasť FeB pozorovaná nebola, avšak namerané hodnoty, s prihliadnutím aj na hodnoty odchýlok merania, predikujú prítomnosť lokálnych ložísk tejto tvrdšej fázy.

Tabuľka 4.10. Priemerná mikrotvrdość boridickej vrstvy, pri meniacom sa čase a konštantnej teplote boridovania 900 °C z materiálu K605

Vzorka	Oblasť merania		
	Fe ₂ B (HV0,1)	Difúzna zóna (HV0,1)	Základný materiál (HV0,1)
K611	1595 ± 24,7	713 ± 6,5	772 ± 16,1
K621	1865 ± 70,9	725 ± 9,1	883 ± 31,9
K631	1869 ± 55,1	645 ± 59,0	695 ± 45,8
K641	1863 ± 70,6	733 ± 17,5	774 ± 49,0
K644	1942 ± 87,6	841 ± 38,7	777 ± 78,9

Na Obr. 4.20 je graf s priemernými hodnotami mikrotvrdości vzoriek z materiálu K605, pri meniacom sa čase a konštantnej teplote boridovania (900 °C) (stĺpce s časom 4, 5, 8 a 10 h), pričom posledný trojstĺpec uvádza hodnoty namerané na porovnávacíej vzorke K644.

Z grafu možno usúdiť, že najväčší rozdiel nameraných mikrotvrdości bol medzi 4 h a 8 h boridovaním (274 HV0,1), pričom pri ďalšom zvyšovaní času boridovania mikrotvrdość kolísala v približne rovnakých hodnotách. Najvyššia mikrotvrdość bola dosiahnutá na vzorke K631 (8 h, 900 °C) 1869 HV0,1, čo v porovnaní s referenčnou vzorkou K644 je rozdiel 73 HV0,1. Rovnako min. rozdiel v mikrotvrdości bol zistený aj so vzorkou K621 (6 h, 900 °C) 1865 HV0,1, čo je rozdiel 77 HV0,1, a preto možno z ekonomického hľadiska konštatovať, že ďalšie zvyšovanie času boridovania je nevýhodné a je postačujúce boridovanie s časom 6 h.



Obr. 4.20. Mikrotvrdość boridickej vrstvy materiálu K605 pri meniacom sa čase a konštantnej teplote boridovania (900 °C)

V Tabuľke 4.11 sú uvedené priemerné hodnoty mikrotvrdości boridickej vrstvy a odchýlka merania pri všetkých vzorkách z materiálu K100 pri meniacíej sa teplote

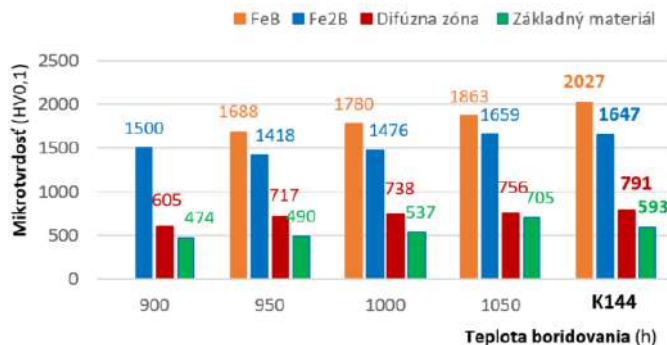
a konštantnom čase boridovania 4 h. Posledný riadok v tabuľke predstavuje referenčnú vzorku, ktorá sa boridovala pri najvyšších parametroch (t. j. K144, 1050 °C, 10 h). V prípade vzoriek z materiálu K100 boli pozorované oblasti Fe₂B, difúzna zóna, základný materiál a aj najtvrdšia oblasť FeB. Súvislá vrstva FeB sa však vytvorila len na vzorkách K112, K113 a K114 (950, 1000 a 1050 °C).

Tabuľka 4.11. Priemerná mikrotvrdosť boridickej vrstvy, pri meniacej sa teplote a konštantnom čase boridovania 4 h z materiálu K100

Vzorka	Oblasť merania			
	FeB (HV0,1)	Fe ₂ B (HV0,1)	Difúzna zóna (HV0,1)	Základný materiál (HV0,1)
K111	–	1500 ± 51,3	605 ± 13,0	474 ± 18,5
K112	1688 ± 52,0	1418 ± 47,5	717 ± 23,3	490 ± 15,3
K113	1780 ± 66,0	1476 ± 50,8	738 ± 32,4	537 ± 22,5
K114	1863 ± 70,7	1659 ± 38,9	756 ± 43,1	705 ± 29,7
K144	2027 ± 96,5	1647 ± 94,2	791 ± 30,6	593 ± 17,5

Na Obr. 4.21 je graf s priemernými hodnotami mikrotvrdości vzoriek z materiálu K100, pri meniacej sa teplote a konštantnom čase boridovania (4 h) (stĺpce s teplotou 900, 950, 1000 a 1050 °C), pričom posledný trojstĺpec uvádza hodnoty namerané na porovnávacej vzorke K144.

Z grafu vyplýva, že so zvyšujúcou teplotou sa mikrotvrdosť v oblasti FeB zvyšovala, pričom sa mikrotvrdosťou 1863 HV0,1 najviac k referenčnej vzorke priblížila vzorka K114 (10 h, 1050 °C), ďalej možno konštatovať, že sa mikrotvrdosť v oblasti Fe₂B mierne zvyšovala, pričom sa mikrotvrdosťou 1659 HV0,1 najviac k referenčnej vzorke priblížila vzorka K114 (10 h, 1050 °C). Na vzorke K113 (4 h, 1000 °C) bola nameraná mikrotvrdosť 1780 HV0,1, čo je v oboch prípadoch rozdiel v hodnotách mikrotvrdości (164 HV0,1 a 247 HV0,1), preto možno z ekonomického hľadiska konštatovať, že nielen zvyšovanie času boridovania nie je nutné, ale je postačujúce boridovanie aj na teplote 1000 °C. Zaujímavým faktom je aj to, že pri kombinácii s najnižšími parametrami boridovania (vzorka K111) sa vrstva FeB nevytvorila.



Obr. 4.21. Mikrotvrdosť boridickej vrstvy materiálu K100 pri meniacej sa teplote a konštantnom čase boridovania (4 h)

V Tabuľke 4.12 sú uvedené priemerné hodnoty mikrotvrdości boridickej vrstvy a odchýlka merania pri všetkých vzorkách z materiálu K100 pri a meniacom sa čase

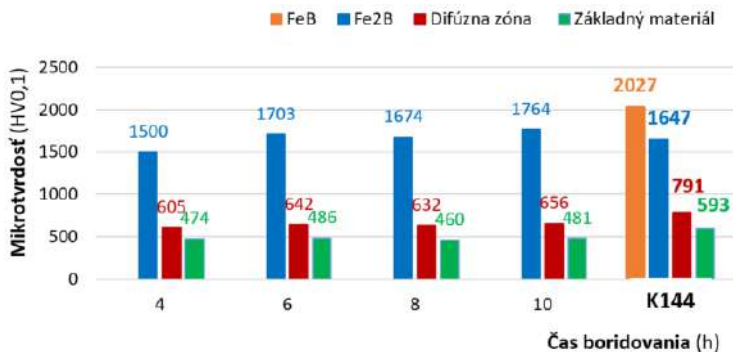
a konštantnej teplote boridovania 900 °C. Posledný riadok v tabuľke predstavuje porovnávaciu vzorku, ktorá sa boridovala pri najvyšších parametroch (t. j. K144, 1050 °C, 10 h). Aj v tomto prípade na vzorkách z materiálu K100 boli pozorované iba oblasti Fe₂B, difúzna zóna a základný materiál. Nakoľko oblasť FeB pozorovaná nebola, možno konštatovať, že pre tento typ nástrojového materiálu je na boridovanie nevhodná teplota 900 °C, v prípade potreby tejto vrstvy. Namerané hodnoty mikrotvrdości v oblasti Fe₂B, aj s prihliadnutím na hodnoty odchýlok merania, sú postačujúce pre procesy tvárnenia s adhéznym opotrebením.

Tabuľka 4.12. Priemerná mikrotvrdosť boridickej vrstvy, pri meniacom sa čase a konštantnej teplote boridovania 900 °C z materiálu K100

Vzorka	Oblasť merania			
	FeB (HV0,1)	Fe ₂ B (HV0,1)	Difúzna zóna (HV0,1)	Základný materiál (HV0,1)
K111	–	1500 ± 51,3	605 ± 13,0	474 ± 18,5
K121	–	1703 ± 61,8	642 ± 19,7	486 ± 21,9
K131	–	1674 ± 61,2	632 ± 21,9	460 ± 17,3
K141	–	1764 ± 55,5	656 ± 14,7	481 ± 16,7
K144	2027 ± 96,5	1647 ± 94,2	791 ± 30,6	593 ± 17,5

Na Obr. 4.22 je graf s priemernými hodnotami mikrotvrdości vzoriek z materiálu K100, pri meniacom sa čase a konštantnej teplote boridovania (900 °C) (stĺpce s časom 4, 5, 8 a 10 h), pričom posledný trojstĺpec uvádza hodnoty namerané na porovnávacej vzorke K644.

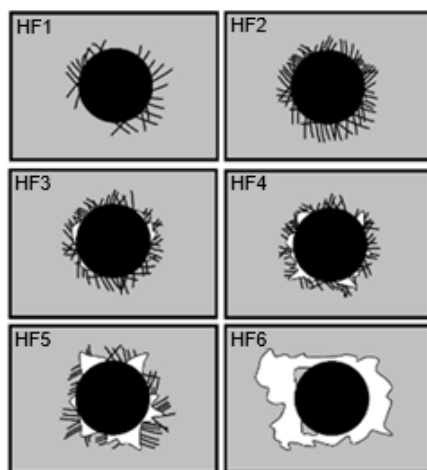
Z grafu možno usúdiť, že najväčší rozdiel nameraných mikrotvrdości v oblasti Fe₂B bol medzi 4 h a 10 h boridovaním (264 HV0,1), pričom pri ďalšom zvyšovaní času boridovania mikrotvrdosť kolísala v približne rovnakých hodnotách. Najvyššia mikrotvrdosť bola dosiahnutá na vzorke K141 (10 h, 1050 °C) 1764 HV0,1, čo v porovnaní s referenčnou vzorkou K144, bola vyššia o 117 HV0,1. Min. rozdiely v mikrotvrdości boli zistené aj pri ostatných vzorkách, a to pri vzorke K121 (6 h, 900 °C) a vzorke K131 (8 h, 900 °C)), čo je rozdiel 56 HV0,1 a 27 HV0,1 (v oboch prípadoch s mikrotvrdoťou vyššou, ako referenčná vzorka), a preto možno z ekonomického hľadiska konštatovať, že ďalšie zvyšovanie času boridovania je nevýhodné a je postačujúce boridovanie s časom 6 h. Zaujímavým faktom je aj to, že pri všetkých vzorkách sa vrstva FeB nevytvorila.



Obr. 4.22. Mikrotvrdosť boridickej vrstvy materiálu K100 pri meniacom sa čase a konštantnej teplote boridovania (900 °C)

4.3.5 Hodnotenie adhéznei príľnavosti

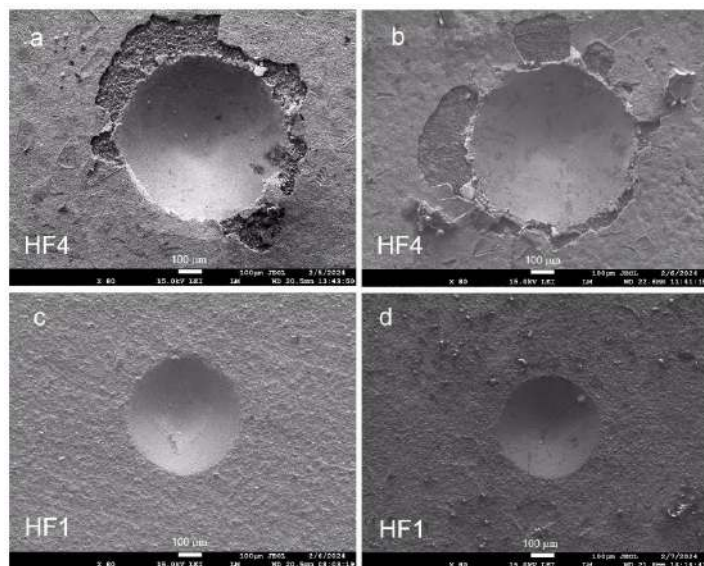
Hodnotenie adhéznei príľnavosti boridovaných vzoriek bolo realizované vnikacou skúškou, tzv. Mercedes testom (podľa VDI 3198). Princíp tejto skúšky spočíva v skúmaní vzniknutých trhlín a celkového adhézneho poškodenia okolo vtlačku. Má kvalitatívny charakter a poskytuje vizuálne hodnotenie adhézie a nie kvantitatívne parametre. Vtlačky do boridovanej vrstvy vzoriek boli realizované Rockwelovým indentorom (HRC) silou 1500 N. Vzorky s vtlačkami boli potom pozorované rastrovacím elektrónovým mikroskopom JEOL JSM-7600F vo vákuovom prostredí. Ďalej sa zhotovené snímky porovnávali a zatriedovali na základe adhézných kategórií (Obr. 4.23), kde jednotlivé kategórie zodpovedajú stupňu adhézneho opotrebenia. Kategória HF1 zodpovedá najlepšej adhéznei príľnavosti, a teda najmenšiemu adhéznemu poškodeniu a kategória HF6 zodpovedá najhoršej adhéznei príľnavosti, a teda najväčšiemu adhéznemu poškodeniu. (Guo a kol., 2022)



Obr. 4.23. Adhézne triedy poškodenia podľa VDI 3198 (Guo a kol., 2022)

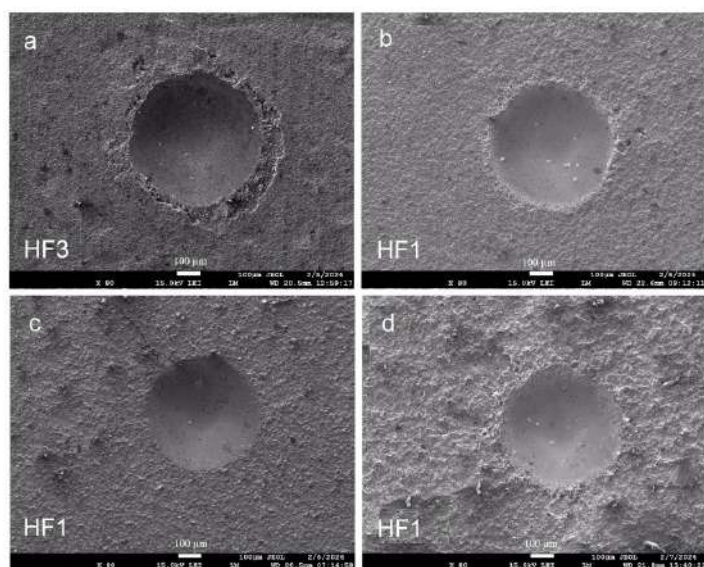
Z dôvodu technickej a časovej náročnosti celého procesu vákuovania elektrónového mikroskopu pri vyhotovovaní jednotlivých snímok, sa Mercedes test realizoval na 8 vzorkách (4 vzorky z materiálu K605 a 4 vzorky z materiálu K100). Z každého nástrojového materiálu sa vybrali vzorky s hraničnými parametrami boridovania (Tabuľka 4.4), t. j. 2 vzorky, ktoré sa boridovali 4 h, pričom 1 vzorka pri 900 °C a druhá vzorka pri 1050 °C (K611, K614 a K111, K114) a ďalšie 2 vzorky, ktoré sa boridovali 10 h, pričom 1 vzorka pri 900 °C a jedna pri 1050 °C (K641, K644 a K141, K144).

Na Obr. 4.24 sú uvedené SEM snímky vtlačkov materiálu K100 s priradením adhéznei kategórie. Z tohto testu vyplýva, že výrazné zlepšenie odolnosti materiálu voči adhéznemu opotrebeniu sa dosiahlo hlavne zvýšením teploty boridovania z 900 °C na 1050 °C, kde obidva povrchy, získané pri 4 a 10 h, boli zaradené do kategórie HF1 (veľmi dobrá odolnosť voči adhéznemu opotrebeniu). Predĺženie času boridovania pri tomto materiáli neprinieslo výrazné zlepšenie odolnosti proti adhéznemu opotrebeniu.



Obr. 4.24. Mercedes test vzoriek K100 boridovaných pri (Gula, 2024)
 a – 4h, 900 °C, b – 10 h, 900 °C, c – 4 h, 1050 °C, d – 10 h, 1050 °C

Na Obr. 4.25 sú uvedené SEM snímky vtláčkov materiálu K605 s priradením adhézneho kategórie. Z tohto testu vyplýva, že jedinou odlišnosť možno pozorovať pri vzorke, ktorá sa boridovala pri najnižších parametroch (4 h, 900 °C) a kde sa v okolí vtláčku vyskytla odlúpená časť. Táto vzorka spadá do kategórie HF3 (priemerná odolnosť voči adhéznemu opotrebeniu), pričom ostatné vzorky boli zaradené do kategórie HF1 (veľmi dobrá odolnosť voči adhéznemu opotrebeniu).



Obr. 4.25. Mercedes test vzoriek K605 boridovaných pri (Gula, 2024)
 a – 4h, 900 °C, b – 10 h, 900 °C, c – 4 h, 1050 °C, d – 10 h, 1050 °C

Na záver možno konštatovať, že na základe celkového porovnania vzoriek jednotlivých materiálov testovaných Mercedes testom, z hľadiska odolnosti voči adhézemu opotrebeniu je lepší variant materiál K605, kde nižší stupeň odolnosti (HF3) bol zaznamenaný len pri vzorke K611 (4 h, 900 °C). Pri vzorkách z materiálu K100 mali vyhovujúcu odolnosť voči adhézemu opotrebeniu (HF1) len vzorky K114 a K144, ktoré sa boridovali pri teplote 1050 °C, 4 h a 10 h. Vzorky, ktoré sa boridovali pri teplote 900 °C mali priemernú odolnosť voči adhézemu opotrebeniu (HF4), t. j. z hľadiska aplikácie nevyhovujúcu. Tento rozdiel medzi jednotlivými materiálmi možno vysvetliť chemickým zložením a množstvom legujúcich prvkov, nakoľko s narastajúcim podielom legujúcich prvkov ako napr. Cr, ktorého materiál K100 obsahuje 11,50 hm. % a materiál K605 len 1,00 hm. %, výrazne negatívne ovplyvňuje tvorbu jednotlivých boridických vrstiev, znižuje ich hrúbku. Taktiež možno predpokladať, že lepšie výsledky adhézneho priľnavosti pri materiáli K605 mohla spôsobiť aj absencia veľmi tvrdej, ale zároveň krehkej súvislej boridickej vrstvy FeB.

4.3.6 Optimálne parametre boridovania

Z hľadiska posúdenia vlastností po boridovaní nástrojových ocelí K605 (STN 41 19614) a K100 (STN 41 19436), bolo realizované difúzne boridovanie vzoriek s postupným zvyšovaním teploty boridovania (900, 950, 1000 a 1050 °C) pri konštantnom čase boridovania 4 h (1. experiment) a potom pri postupnom zvyšovaní času boridovania (4, 6, 8, a 10 h) pri konštantnej teplote boridovania 900 °C (2. experiment), ktoré boli porovnávané s referenčnými vzorkami, boridovanými pri najvyššej teplote a najdlhšom čase (1050 °C, 10 h).

Na základe vyhodnotených parametrov možno stanoviť optimálne parametre boridovania, a to z hľadiska exploatačných vlastností a aj z pohľadu ekonomicky a environmentálne najvýhodnejšieho postupu. V Tabuľke 4.13 je uvedený prehľad týchto, a to z pohľadu dosiahnutia optimálnej hrúbky, mikrotvrdości a adhézneho priľnavosti. Aplikácia týchto technologických parametrov predurčuje takto boridované nástrojové materiály na širokú škálu aplikácií, ktoré budú odolávať adhézemu, ale aj abrazívnemu opotrebeniu, ktoré sú typické pre procesy tvárnenia za studena, ako sú strihanie, ťahanie, ohýbanie, tlačenie, ale aj vysoko namáhané nástroje na razenie, pretláčanie, rotačné kovanie, objemové ťahanie, či radiálne lisovanie.

Tabuľka 4.13. Z hľadiska exploatačných vlastností a aj ekonomicky optimálne parametre difúzneho boridovania ocelí K605 a K100

Materiál	Optimálna hrúbka boridickej vrstvy	Optimálna mikrotvrdosť boridickej vrstvy	Optimálna adhézna priľnavosť boridickej vrstvy
K605	4 h, 1050 °C (125 µm)	4 h, 1050 °C (1798 HV0,1)	4 h, 1050 °C (veľmi dobrá: HF1)
K100	4 h, 1050 °C (100 µm)	4 h, 1050 °C (1863 HV0,1)	4 h, 1050 °C (veľmi dobrá: HF1)

Záver

Čoraz viac sa v modernej priemyselnej praxi kladie dôraz na predlžovanie životnosti a trvanlivosti všetkých súčastí, a to vrátane nástrojov v procesoch plošného a objemového tvárnenia. Výber vhodného materiálu nástroja a povrchovej úpravy zvyšuje nielen

výkonnosť celého výrobného procesu, ale predlžuje aj intervaly výmeny týchto nástrojov, čím sa znižujú celkové náklady podniku.

Úvodné časti prípadovej štúdie boli fokusované na stručnú klasifikáciu nástrojových materiálov, používaných v procesoch tvárnenia, spolu s definovaním spôsobov opotrebenia týchto nástrojov, metódam hodnotenia tribologických vlastností týchto materiálov a možnostiam povrchových úprav nástrojov s cieľom zvýšenia ich životnosti.

Boridovanie je jedna z metód povrchových úprav funkčných častí tvárniacich nástrojov, čo bolo predmetom experimentálnej časti prípadovej štúdie, kde sa realizovalo boridovanie 2 nástrojových materiálov K605 (STN 41 9614) a K100 (STN 41 9436) pri rôznych kombináciách technologických parametrov (teplota boridovania, čas boridovania). Na povrchových vrstvách vzoriek bola pozorovaná ich mikroštruktúra, vyhodnocovala sa hrúbka dosiahnutej boridickej vrstvy, mikrotvrdosť a potom sa vzorky podrobili testom adhézneho priľnavosti.

Hlavným prínosom tejto štúdie je podrobná experimentálna analýza dvoch nástrojových ocelí po difúznom boridovaní a definovanie ekonomicky, environmentálne a aplikačne najvhodnejších technologických parametrov na dosiahnutie optimálnych hodnôt hrúbky, mikrotvrdosti a adhézneho priľnavosti boridickej vrstvy.

Zoznam bibliografických odkazov

BOBZIN, K., KALSCHEUER, C. and TAYYAB, M. 2023. Effect of crain coating properties on impact fatigue of tool steel. *Surface and coatings technology*. 2023 (471). pp. 1-12. ISSN 0257-8972 [online] [cit. 2025-01-08]. Dostupné na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897223006448#s0040>.

BÖHLER Slovakia. 2025a. Ocele pre prácu za studena. [online] [cit. 2025-01-08]. Dostupné na: <https://www.bohler.sk/sk/product-category/ocele-pre-pracu-za-studena/>.

BÖHLER Slovakia. 2025b. Rychlorezné ocele. [online] [cit. 2025-01-08]. Dostupné na: <https://www.bohler.sk/sk/product-category/rychlorezne-ocel/>.

BREZINOVÁ, J., VIŇÁŠ, J., DRAGANOVSKÁ, D. a GUZANOVÁ, A. 2020. Základy materiálového inžinierstva. Košice. TU Košice, 2020. s. 289. ISBN: 978-80-553-3745-6. [online] [cit. 2024-10-09] Dostupné na internete: https://www.sjf.tuke.sk/kav/images/skript_stud_mat/Zaklady_materialoveho_inzinierstva.pdf.

EDENHOFER, B., JORITZ, D., RINK, M. and VOGES, K. 2015. Carburizing of steels. *Thermochemical surface engineering of steels*. pp. 485-553. ISBN 978-08-570-9592-3. [online] [cit. 2024-10-09] Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857095923500136#s0200>.

ESSAM, M. A., SHASH, A. Y., EL-FAWAKHRY, M. K., EL-KASHIF, E. and MEGAHED, H. 2023. Influence of micro-alloying elements and deep cryogenic treatment on microstructure and mechanical properties of S5 cold work shock resisting tool steel. *Results in Materials* (17), ISSN 2590-048X. [online] [cit. 2023-10-09] Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590048X23000122>.

GÁBRIŠOVÁ, Z. a BRUSILOVÁ, A. 2019. Tepelné spracovanie – Návod na cvičenia. Bratislava. Spektrum, 2019. s. 134. ISBN 978-80-227-4894-0 [online] [cit. 2023-10-09] Dostupné na internete:

https://www.sjf.stuba.sk/buxus/docs/docs/edicne/el_publ/Gabrisova__Brusilova_Tepelne_spracovanie_Navody_na_cvicenia_na_CD_1.pdf.

GROOVER, M. P. 2010. Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and system. 4th edition, Wiley, 2010. pp. 1014. ISBN 978-0470-467002. [online] [cit. 2025-01-08] Dostupné na internete: <https://tusharaneyrao.wordpress.com/wp-content/uploads/2019/12/fundamentals-of-modern-manufacturing-materials-processes-and-systems.pdf>.

GULA, A. 2024. Úpravy aktívnych častí tvárniacich nástrojov. (Diplomová práca). Vedúci diplomovej práce: doc. Ing. Jana Šugárová, PhD. Trnava, MTF STU, 2024, s. 74.

GUO, Z., WANG, R., YANG, H., CHEN, J., LIN, R. and WEI, S. LI, B. 2022 Preparation and Performance Study of Si-DLC Based on Ion Deposition of Different Multiple Gradient Transition Layers. *Coatings*. 2022. (12), 882. pp. 1-12. ISSN 2079-6412 [online] [cit. 2025-07-05]. Dostupné na: <file:///C:/Users/qsugarova/Downloads/coatings-12-00882-v2.pdf>.

HAZLINGER, M., MORAVČÍK, R., a JURČI, P. 2022 Inžinierstvo povrchov. Trnava. Alumnipress, 2022. s. 247. ISBN 978-80-8096-293-7.

JURČI, P. a PTAČINOVÁ, J. 2022. *Nauka o materiáloch II.*, Bratislava, Alumnipress. 2022. s. 204. ISBN 978-80-8096-295-1.

KURIAN, M. and THANKACHAN, S. 2023. Introduction: Ceramics classification and applications. *Ceramic catalysts*, pp. 1-17. ISBN 9780323857468. [online] [cit. 2025-01-08] Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780323857468000096>.

LIU, W., ZHANG, J., SUN, M., XU, B., CAO, Y, and LI, D. 2022. A hot-compression bonding method for manufacturing large high-speed homogeneous steels. *Journal of Materials Research and Technology*, pp. 507-520. ISSN 2238-7854. [online] [cit. 2025-01-24] Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785422000436>.

PLUHAŘ, J. a kol. 1989. *Nauka o materiálech*. Bratislava. SNTL, 1989. s. 549.

ŠUGÁROVÁ, J. 2016. *CNC metal spinning: Study of properties of spun parts*. Plzeň: Vydavatelství Aleš Čeněk. s. 106. ISBN 978-80-7380-616-3.

TAVARES, A. F., LOPES, A. P. O., MESQUITA, E. A., ALMEIDA, D. T., SOUZA, J. H. C. and COSTA, H. L. 2021. Effect of transfer layers on friction and wear mechanisms in strip drawing tests of commercially coated forming tool. In *Wear*, 2021. ISSN 0043-1648. [online] [cit. 2024-10-08] Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164821001228>.

TRZEPIECIŃSKI, T. and LEMU, H. G. 2019. Recent Developments and Trends in the Friction Testing for Conventional Sheet Metal Forming and Incremental Sheet Forming. *Metals*, 2020. 10 (1). ISSN 2075-4701 [online] [cit. 2024-03-28] Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/publication/338166344_Recent_Developments_and_Trends_in_the_Friction_Testing_for_Conventional_Sheet_Metal_Forming_and_Incremental_Sheet_Forming.

ZAMBRANO, O. A. and JIANG, J. 2023. The effect of VC content on the scouring erosion resistance of tool steels. In *Wear*, 520-521, pp. 1-9. ISSN 0043-1648. [online] [cit. 2025-01-20]. Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164823000522#bib1>.

WANG, Y., MAO, B., CHU, S., CHEN, S., XING, H., ZHAO, H., WANG, S., WANG, Y., ZHANG, J. and SUN, B. 2023. Advanced manufacturing of high-speed steels: A critical review of the process design, microstructural evolution, and engineering performance. *Journal of Materials Research and Technology*, 24. pp. 8198-8240. ISSN 2238-7854. [online] [cit. 2025-01-24]. Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S223878542300964X>.

WINTER, K. M., KALUCKI, J. and KOSHEL, D. 2015. Process technologies for thermochemical surface engineering. *Thermochemical surface engineering of steels*, 2015. pp. 141-206. ISBN 978-08-570-9592-3. [online] [cit. 2024-10-09] Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857095923500033#s0225>.

YAO, J., DING, Y., LIU, R., ZHANG, Q. and WANG, L. 2018. Wear and corrosion performance of laser-clad low-carbon high-molybdenum Stellite alloys. *Optics & Laser Technology*, 107. pp. 32-45. ISSN 0030-3992. [online] [cit. 2025-01-08]. Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399218302251#b0005>.

ZDRAVECKÁ, E., TKÁČOVÁ, J. a TKÁČ, J. 2009. Tribologické povlaky pre tvárniace stroje. *Strojárstvo*, 2009. [online] [cit. 2024-11-20] Dostupné na internete: <https://www.engineering.sk/strojarstvo-extra/2162-tribologicke-povlaky-pre-tvarniace-stroje>.

ZDRAVECKÁ, E. a ONDÁČ, M. 2012. Tribológia povrchových vrstiev. TU Košice, 2012. s. 120. ISBN 978-80-553-0885-2.

PodĎakovanie

Tento príspevok vznikol v rámci projektu: *Implementácia inovatívnych foriem učenia a praktického tréningu do vzdelávania v oblasti výrobných technológií a výrobného manažmentu s cieľom zvýšiť atraktivnosť štúdia a podporiť rozvoj prierezových kompetencií absolventov* (026STU-4/2023), s podporou agentúry KEGA MŠVVaŠ SR.

PodĎakovanie patrí tiež doc. Ing. Márii Hudákovovej, PhD., Ing. Jane Ptačinovej, PhD., Ing. Milanovi Haršánymu a Ing. Matejovi Pašákovi, PhD. z Ústavu materiálov MTF STU so sídlom v Trnave za pomoc pri realizovaní experimentálnych prác.

5 MIKROGEOMETRIA A ZMÁČAVOST LASEROM MODIFIKOVANÉHO POVRCHU

ŠUGÁR, P. – ANTALA, R. – ŠUGÁROVÁ, J.

Úvod

Pojem integrita povrchu vyjadruje fyzikálny, chemický a mechanický stav povrchu po výrobnom procese, vplývajúci na jeho funkčnosť v konkrétnych prevádzkových podmienkach. Zvláštny význam nadobúda pri výrobe súčiastok určených na rôzne použitie v oblasti energetiky, automobilového a leteckého priemyslu, ale tiež v oblasti výroby biomedicínskych komponentov alebo súčiastok pre chemický a potravinársky priemysel (Ulutan a Ozel, 2011; Jawahir a kol., 2011).

Medzi kľúčové parametre integrity povrchu patria jeho makrogeometrické (napr. vlnitosť povrchu) a mikrogeometrické charakteristiky (drsnosť povrchu) (Liao a kol., 2021; Gao a Zhang, 2013; Jawahir a kol., 2011). Práve drsnosť povrchu má zásadný vplyv na únavovú životnosť, odolnosť voči opotrebeniu, optické vlastnosti, ale tiež na adhéziu povlaku alebo, v prípade biomedicínskych implantátov, na schopnosť interagovať s okolitým živým tkanivom.

Vplyv na trecie vlastnosti povrchu, únavovú odolnosť, odolnosť voči opotrebeniu, ale tiež schopnosť prenášať zaťaženie majú tiež mechanické vlastnosti povrchovej vrstvy. Tie sú v procese spracovania materiálu, napr. pri obrábaní, ovplyvňované lokálnou pružne-plastickou deformáciou a tepelným efektom trenia nástroja o obrobok. Ak procesné teploty neprekročia teplotu rekryštalizácie materiálu, dochádza k javu spevnenia povrchovej vrstvy, čo sa prejaví zvýšením jej pevnosti a tvrdosti. Súčasne dochádza k vzniku zostatkových napätí, ktoré môžu byť ťahové alebo tlakové (Gao a Zhang, 2013; Jawahir a kol., 2011; Liao a kol., 2021; Ulutan a Ozel, 2011).

Mechanické a tepelné účinky v procese výroby súčiastky môžu byť tiež príčinou mikroštruktúrnych zmien povrchovej vrstvy materiálu (zmena chemického a fázového zloženia, zmena veľkosti a tvaru zŕn, vznik štruktúrnych chýb), ktoré tiež zásadným spôsobom ovplyvňujú funkčnosť povrchu (Jawahir a kol., 2011; Liao a kol., 2021).

Cielené zmeny integrity povrchu možno dosiahnuť použitím širokého spektra aditívnych, t.j. materiál pridávajúcich, alebo substraktívnych, t. j. materiál odoberajúcich povrchových úprav, ktoré dokážu ovplyvniť vlastnosti povrchovej štruktúry na mikro a nanometrickej úrovni (Jawahir a kol., 2011). Na zmiernenie nepriaznivých stavov povrchovej vrstvy po realizovaných technologických operáciách sa najčastejšie používajú procesy zamerané na zvýšenie povrchovej pevnosti a tvrdosti a zníženie zostatkových napätí, ktorými sú napr. valčekovanie, guľôčkovanie, balotínovanie. Používa sa tiež modifikácia povrchovej mikrogeometrie a mikroštruktúry chemickým a elektrochemickým obrábaním, laserovým mikroobrábaním, plazmovým leštením, elektrónovolúčovým obrábaním, elektroerozívnym obrábaním, iónovou implantáciou alebo povlakovaním metódami PVD alebo CVD.

5.1 Drsnosť povrchu a jej hodnotenie

Na hodnotenie mikrogeometrie povrchu, ktorá je charakterizovaná sériou priehlbín a výstupkov rozličného tvaru, výšky, hĺbky a rozostupu, možno použiť parametre 2D (profilovej, resp. líniovej) drsnosti alebo parametre 3D (plošnej) drsnosti.

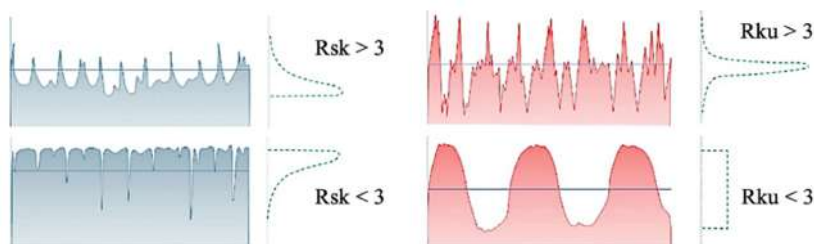
5.1.1 Parametre profilovej drsnosti

Metodika analýzy profilovej drsnosti je obsiahnutá v medzinárodnej technickej norme ISO 21920:2021. Parametre profilovej drsnosti, definované v druhej časti normy s názvom

“Terms, definitions and surface texture parameters” (ISO 21920-2), sú odvodzované od dĺžky úseku, na ktorom sú rozpoznané nerovnosti charakterizujúce vyhodnocovaný profil povrchu (tzv. základná dĺžka merania alebo tiež dĺžka sekcie l_{sc} (staršie označenie l_r) alebo od vyhodnocovanej dĺžky l_e (staršie označenie l_n), ktorá je 5-násobkom základnej dĺžky merania a predstavuje vzdialenosť použitú pri vyhodnocovaní profilu.

K základným parametrom profilovej drsnosti povrchu patria:

- **Priemerná aritmetická výška profilu drsnosti (Ra)** – vyjadruje priemernú hodnotu výšok profilu v rozsahu vyhodnocovanej dĺžky. Tento parameter však neposkytuje žiadne informácie o nerovnostiach alebo tvare povrchu, takže dva profily s rovnakou hodnotou Ra , môžu mať rozdielne vlastnosti.
- **Priemerná kvadratická výška profilu drsnosti (Rq)** – predstavuje druhú odmocninu z priemernej hodnoty štvorcov výšok profilu v rozsahu vyhodnocovanej dĺžky. Z tohto dôvodu je parameter citlivejší na výskyt priehlbín a výstupkov, čo je dôležité pri posudzovaní jemných obrobených plôch (Havlík, 2012; Metelková, 2014).
- **Koeficient šikmosti profilu (Rsk)** (Obr. 5.1) – opisuje mieru asymetrie hustoty rozdelenia odchýlok profilu. Hodnota $Rsk > 0$ vyjadruje prevahu členitejších výstupkov nad priehlbínami profilu, pričom prevaha priehlbín nad výstupkami je vyjadrená zápornou hodnotou $Rsk < 0$. Prevaha výstupkov je spájaná s lepšou adhéznou schopnosťou povrchu voči náterom alebo povlakom, zatiaľ čo prevaha priehlbín sa spája s lepšou zmáčavosťou a predstavuje vhodnejšiu nosnú plochu z hľadiska prvotného opotrebenia súčiastky (Havlík, 2012; Metelková, 2014).
- **Koeficient špicatosti profilu (Rku)** (Obr. 5.1) – vyjadruje mieru špicatosti hustoty rozdelenia odchýlok profilu. Kým hodnota $Rku > 3$ vyjadruje existenciu členitého, špicatého povrchu s množstvom hlbokých priehlbín a vysokých vrcholov, hodnota $Rku < 3$ zodpovedá povrchu s nízkou členitosťou a špicatosťou. Parametre Rsk a Rku umožňujú spoľahlivo rozlíšiť povrchy s rovnakou hodnotou Ra na základe geometrickej rozdielnosti, pričom pre normálne rozdelenie povrchu sa optimálne Rsk rovná nule a Rku rovná 3 (Hansson a Hansson, 2011; Havlík, 2012; Metelková, 2014).



Obr. 5.1. Porovnanie topografie povrchu v závislosti od výškových parametrov Rsk a Rku (Wongsue a kol., 2023)

- **Priemerná výška výstupku (Rp)** – zohľadňuje priemernú hodnotu najväčších výšok výstupkov nameraných v rozsahu jednotlivých základných dĺžok. Rp má význam napr. pri odhade nosných charakteristík povrchu, pričom nízka hodnota Rp detekuje nízke začiatkové opotrebenie vyrobenej plochy. Vysoká hodnota Rp naopak charakterizuje povrch vhodný na aplikáciu povlakov.
- **Priemerná hĺbka priehlbiny (Rv)** – definuje hodnotu priemernej hĺbky priehlbiny, vypočítanú ako priemerná hodnota najväčších hlbokých priehlbín nameraných v rozsahu

jednotlivých základných dĺžok. Parameter dobre zohľadňuje množstvo kvapaliny, ktoré dokáže plocha zadržiavať, pričom vysoké hodnoty R_v signalizujú prítomnosť hlbokých priehlbín, ktoré pôsobia ako koncentrátoři napätia.

- **Najväčšia výška výstupku (R_{pt})** – vyjadruje najvyšší výstupok profilu povrchu v rozsahu základnej dĺžky.
- **Najväčšia hĺbka priehlbiny (R_{vt})** – vyjadruje hĺbku najhlbšej priehlbiny v rozsahu základnej dĺžky.
- **Maximálna výška profilu (R_z)** – vyjadruje strednú hodnotu najväčších výšok profilu a najväčších hĺbok priehlbín zistených v rozsahu základných dĺžok.
- **Celková výška profilu drsnosti (R_t)** – súčet hĺbky najhlbšej priehlbiny a výšky najvyššieho výstupku v rozsahu vyhodnocovanej dĺžky.
- **Priemerný rozostup profilových prvkov (R_{sm})** – predstavuje priemernú hodnotu rozostupov jednotlivých profilových prvkov v rozsahu vyhodnocovanej dĺžky.
- **Priemerná výška profilových prvkov (R_c)** – predstavuje priemernú hodnotu výšok profilových prvkov v rozsahu vyhodnocovanej dĺžky.
- **Parametre krivky materiálového podielu (R_{pk} , R_k a R_{vk})** – sú charakteristiky krivky materiálového podielu (Abbot-Firestonova krivka), ktorá umožňuje posúdiť podiel materiálom vyplnených alebo voľných priestorov v profile povrchu. Parametre **R_{pk} (redukovaná výška výstupku)**, **R_k (hĺbka jadra)** a **R_{vk} (redukovaná hĺbka priehlbiny)** poskytujú informácie o materiálovom rozložení na vyhodnocovanej dĺžke, konkrétne z hľadiska prvého opotrebenia, dlhodobého vývoja opotrebenia a schopnosti zadržiavať kvapalnú látku. Hĺbka jadra definuje množstvo materiálu, ktoré je možné efektívne opotrebiť, pričom vysoká tvarová a rozmerová presnosť je spájaná s nízkou hodnotou R_{vk} . Všeobecne sú preferované krivky materiálového podielu s plnším profilom, ktoré charakterizujú povrchy odolnejšie voči opotrebeniu (Havlík, 2012; Metelková, 2014; Wang a Chung, 2013).

5.1.2 Parametre plošnej drsnosti

Spôsob hodnotenia plošnej drsnosti povrchu definuje medzinárodná technická norma ISO 25178:2021. Parametre plošnej drsnosti povrchu uvádza druhá časť normy s názvom „Terms, definitions and surface texture parameters“ (ISO 25178-2).

Základne parametre plošnej drsnosti sú:

- **Priemerná aritmetická výška (S_a)** – definuje aritmetický priemer absolútnych hodnôt výšok každého bodu povrchu v rozsahu hodnotenej plochy.
- **Stredná kvadratická výška (S_q)** – zodpovedá druhej odmocnine aritmetického priemeru štvorcov výšok každého bodu povrchu v rozsahu hodnotenej plochy.
- **Šikmosť (S_{sk})** – reprezentuje symetriu rozloženia výšok každého bodu profilu, resp. stupeň sklonu tvaru drsnosti. Dobré zadržiavanie maziva, zlepšený kontakt drsných povrchov, podobne ako znížené trenie sú typické pre zápornú hodnotu S_{sk} .
- **Špicatosť (S_{ku})** – udáva špicatosť rozloženia výšok každého bodu povrchu, resp. je mierou ostrosti profilu drsnosti. Podobne ako parameter S_{sk} aj S_{ku} charakterizuje tvar rozloženia topografických útvarov a oba majú rovnaký význam ako parametre šikmosti a špicatosti pri hodnotení profilovej drsnosti.
- **Najväčšia výška výstupku (S_p)** – definuje maximálnu výšku výstupku v rozsahu hodnotenej plochy. Tento parameter je mierou objemu dutín v textúre na povrchu.

- **Najväčšia hĺbka priehlbiny (S_v)** – definuje maximálnu hĺbku priehlbiny v rozsahu hodnotenej plochy. Tento parameter približuje voľné priestory v objeme materiálu.
- **Najväčšia výška (S_z)** – predstavuje vzdialenosť medzi najvyšším a najnižším bodom hodnoteného povrchu. Na bližšiu charakterizáciu rozloženia topografických útvarov textúry na povrchu sa používa pomer S_p/S_z .

Uvedené parametre plošnej drsnosti povrchu sú kľúčovými ukazovateľmi pre technickú kontrolu, nakoľko ich hodnoty dostatočne presne korešpondujú s tribologickými vlastnosťami povrchu a jeho odolnosťou voči opotrebovávaniu (Pawlus, Reizer a Wieczorowski, 2021; KEY drsnosť, 2018; KEY intro, 2018).

5.2 Zmäčavosť povrchu a jej hodnotenie

Zmäčavosť predstavuje vlastnosť povrchu, ktorá vyjadruje jeho schopnosť ovplyvniť šírenie kvapaliny, ktorá je s ním v kontakte, resp. znamená schopnosť povrchu znížiť povrchové napätie kvapaliny tak, že sa na povrchu rozprestrie a tým ho zmáča. Povrchová zmáčavosť sa vyjadruje veľkosťou kontaktného uhla θ , ktorý zvierá rovina povrchu pevnej látky s dotyčnicou rozhrania kvapalina – okolité plynné prostredie (Obr. 5.2). Zmäčavosť je daná trojicou medzifázových napätí: (BS Biomed, 2025; Yang a kol., 2016)

- povrchovým napätím pevnej látky, t. j. povrchovou voľnou energiou γ_{sg} ,
- povrchovým napätím kvapaliny γ_{lg} ,
- medzifázovým napätím medzi pevnou látkou a kvapalinou γ_{sl} .

Pomer veľkostí napätí na rozhraniach pevná látka – plynné prostredie γ_{sg} , pevná látka – kvapalina γ_{sl} a kvapalina – plynné prostredie γ_{lg} , určuje veľkosť kontaktného uhla θ (Obr. 5.2), pričom môžu nastať tieto stavy: (Samanta a kol., 2020; Yang a kol., 2016)

- θ blízke 0° – superhydrofilný povrch (povrch maximalizujúci kontakt s kvapalinou),
- $\theta < 90^\circ$ – hydrofilný (dobré zmáčateľný) povrch,
- $\theta > 90^\circ$ – hydrofóbny (nezmäčateľný) povrch,
- $\theta > 150^\circ$ superhydrofóbny povrch (povrch minimalizujúci kontakt s kvapalinou).

Na predikciu zmáčavosti povrchu existujú viaceré modely:

- Youngov model, použiteľný pre ideálne hladké, chemicky homogénne povrchy s hodnotou uhla zmáčavosti do 120° (Obr. 5.2a,c). Jeho podstatu vyjadruje rovnica (5.1), opisujúca rovnováhu medzifázových napätí:

$$\gamma_{sg} = \gamma_{sl} + \gamma_{lg} \cdot \cos\theta \quad (5.1)$$

- Wenzelov model, ktorý zohľadňuje drsnosť povrchu a predpokladá, že zmáčavosť je ovplyvnená prenikaním kvapaliny do povrchových mikronerovností (Obr. 5.2b), čo zohľadňuje rovnica (5.2):

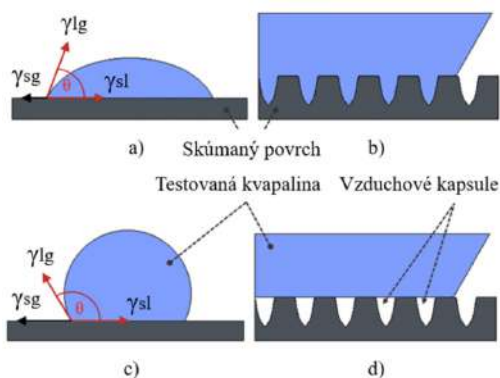
$$\theta_v = r \cdot \theta \quad (5.2)$$

kde θ_v je výsledný kontaktný uhol v $^\circ$,

θ – Youngov kontaktný uhol pre ideálny (hladký) povrch v $^\circ$,

r – koeficient drsnosti povrchu ($r = 0$ pre hladký povrch; $r > 1$ pre drsný povrch).

- Cassieho-Baxterov model, ktorý predpokladá, že prítomnosť povrchových mikronerovností zvyšuje uhol zmáčavosti v dôsledku vytvorenia vzduchových kapsúl v priehlbínach mikroprofilu povrchu (Obr. 5.2d).



Obr. 5.2. Rozdielne modely predikcie zmáčavosti povrchu (Samanta a kol., 2020)

a – Youngov model (hydrofilný povrch), b – Wenzelov model, c – Youngov model (hydrofóbny povrch), d – Cassieho-Baxterov model

Z Wenzelovej teórie vyplýva, že zvýšenie drsnosti chemicky hydrofóbného povrchu spôsobí vyššiu hydrofóbnosť, pričom zvýšenie drsnosti chemicky hydrofilného povrchu zapríčiní zlepšenie jeho hydrofilných schopností.

5.2.1 Metódy merania kontaktného uhla

Kontaktné uhly sa v praxi posudzujú ako *statické* alebo *dynamické*.

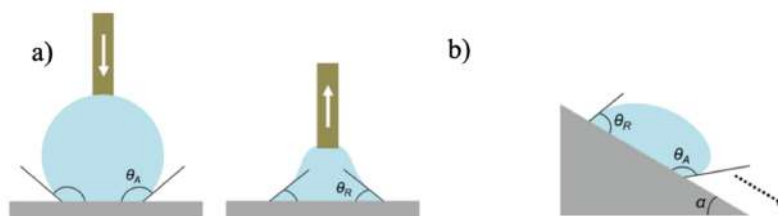
Statický kontaktný uhol je jednoduchým, rýchlym a priamym ukazovateľom zmáčavosti predovšetkým hladkých, homogénnych povrchov. Jeho stanovenie sa realizuje nanosením presne definovaného objemu (kvapky) kvapaliny známych vlastností na povrch meranej vzorky. Tvar kvapky sa opticky zosníma a z profilu kvapky sa stanoví hodnota kontaktného uhla. Tento spôsob merania statického kontaktného uhla sa nazýva metóda sediacej kvapky (BS adhesion, 2025; BS CA, 2025).

V prípade *dynamického posudzovania*, je zmáčavosť povrchu vyhodnocovaná na základe pohybujúcej sa kontaktnej línie vzostupného (najvyššieho možného θ) a zostupného (najnižšieho možného θ) kontaktného uhla. Rozdiel medzi hodnotami týchto dvoch uhlov sa označuje ako hysterezia kontaktného uhla, ktorá v prípade reálnych povrchov môže nadobúdať hodnotu až 50° a vzniká v dôsledku topografickej a chemickej heterogenity meraného povrchu. Medzi najbežnejšie metódy dynamického skúmania kontaktného uhla patria:

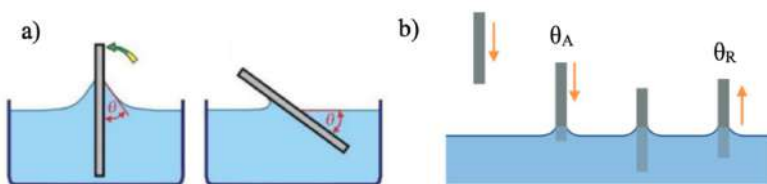
- *meranie ihlou* (Obr. 5.3a) – metóda spočíva v ponáraní hrotu ihly do kvapky umiestnenej na podložke. Pri hlbšom ponorení ihly do kvapaliny možno pozorovať vývoj vzostupného

kontaktného uhla θ_A . Naopak, pri pohybe ihly smerom od povrchu možno odmerať hodnotu zostupného kontaktného uhla θ_R .

- *meranie naklonením kvapky* (Obr. 5.3b) – podstatou merania je určenie tzv. uhla sklúznutia kvapky na naklonenej rovine v momente začiatku pohybu kvapky. Zaznamenáva sa vzostupný (na prednom okraji kvapky) aj zostupný uhol (na zadnom okraji kvapky).
- *meranie naklonenou doskou* (Obr. 5.4a) – pri meraní sa do známej kvapaliny ponára doska z pevného materiálu, ktorá je postupne nakláňaná jedným smerom, pokiaľ na jednej strane dosky povrch kvapaliny nie je rovný. Uhol, ktorý zvierajú povrch kvapaliny s naklonenou doskou je kontaktný uhol θ (Krásný, 2010).
- *meranie Wilhelmyho doskou* (Obr. 5.4b) – metóda funguje na princípe merania hmotnosti ponorenej dosky v okamihu keď dôjde k jej kontaktu s kvapalinou, ktorá priľne k povrchu dosky na oboch stranách, pričom sa hodnota kontaktného uhla odčítava pri pohybe dosky smerom do kvapaliny. Vzostupný kontaktný uhol kvapaliny θ_A je vtedy maximálny. Naopak, zostupný uhol θ_R sa meria počas pohybu dosky smerom von z kvapaliny (BS CA, 2025).
- *meranie zvislou doskou* – táto metóda meria výšku h , do ktorej vystúpi kvapalina na zvislej doske, pričom na určenie kontaktného uhla je potrebné poznať hodnotu povrchového napätia. Výška h sa zisťuje pomocou katetometra. Po vytiahnutí vzorky z kvapaliny sa vytvorí tzv. meniskus, kde sa opticky zmeria kontaktný uhol. Namierané uhly nemožno priamo porovnávať so statickými ani dynamickými uhlami a metóda neumožňuje meranie uhlov väčších ako 90° . Metóda sa často využíva pri meraní teplotnej závislosti kontaktného uhla (BS CA, 2025; Krásný, 2010).



Obr. 5.3. Dynamické meranie (Kung a kol, 2019)
a – ihlovou metódou, b – naklonením kvapky



Obr. 5.4. Dynamické meranie
a – naklonenou doskou (Krásny 2010), b – Wilhelmyho doskou (Kung a kol., 2019)

5.2.2 Metódy merania povrchového napätia

Povrchové napätie kvapalín vyjadruje správanie kvapalín v dôsledku fyzikálnych väzieb spôsobených príťažlivými medzimolekulárnymi väzbami. Najbežnejšie používané metódy merania rovnovážneho povrchového napätia sú **Du Noüyho prstenec** alebo **Wilhelmyho**

doska (merania s použitím silomerov) a **metóda visiacej kvapky** (meranie optickým tenzometrom). „Visiaca“ kvapka kvapaliny sa dávkuje na hrot ihly, pričom softvér automaticky aproximuje krivku a vypočíta hodnotu povrchového napätia. Naopak, Du Noüyho metóda meria povrchové napätie na základe maximálnej sily potrebnej na odtrhnutie menisku, t. j. vztlínajúceho stĺpca kvapaliny od platinového prstenca. Metóda Wilhelmyho dosky meria povrchové napätie na základe sily pôsobiacej pri úplnom zmáčaní povrchu drsnej platinovej dosky. Spomenuté metódy je možno použiť v statickom aj dynamickom režime a tiež na vyhodnocovanie medzifázového napätia (BS adhesion, 2025; BS interface, 2025).

5.2.3 Metódy merania voľnej povrchovej energie

Povrchová energia odzrkadľuje chemickú povahu povrchu. Kvantifikuje množstvo práce potrebnej na vytvorenie povrchu s jednotkovou plochou. Povrchová energia vzniká v dôsledku van der Waalsových síl (najmä disperznej zložky), vodíkových a kovových väzieb. Podobne, ako povrchové napätie, je v jednotkách mN.m^{-1} alebo dyn.cm^{-1} (BS methods, 2025; BS sfe, 2025). Vysokou hodnotou voľnej povrchovej energie sa vyznačujú polárne materiály, ako sú kovy, textil, papier, drevo, sklo a keramika, naopak nízkou hodnotou sa vyznačujú „nepolárne“ materiály, ako sú polyméry alebo vosk. Na dosiahnutie dobrej zmáčavosti je kľúčové, aby hodnota povrchového napätia kvapaliny bola nižšia, ako je voľná povrchová energia podložky (BS adhesion, 2025).

Celková hodnota povrchovej energie má dve zložky. Jedna zložka je nedisperzná (polárna), daná interakciou vodíkových väzieb a druhá zložka je disperzá, daná van der Waalsovými silami a Londonovou disperznou interakciou. Na meranie voľnej povrchovej energie pevných látok sa používa mikroskopia atomárnych síl (AFM) alebo inverzná plynová chromatografia (IGC) (Moško, 2024). Nepriamo sa povrchová energia určuje prostredníctvom merania kontaktného uhla na pevnom povrchu s jednou alebo viacerými čistými testovacími kvapalinami so známymi hodnotami povrchového napätia. Jedna z kvapalín je určená na meranie disperznej zložky, napr. diiodometán alebo α -brómnaftalén, pričom druhá z dvojice je polárna, napr. deionizovaná voda, formamid, etylénglykol alebo glycerol. Povrchovú energiu možno určiť z nameraného statického kontaktného uhla pre dvojicu kvapalín pomocou viacerých výpočtových teórií (BS adhesion, 2025; BS methods, 2025).

5.2.3.1 Zismanova teória

Teória vychádza z lineárnej závislosti goniometrickej funkcie $\cos\theta$ na voľnej povrchovej energii γ_l . Ziskáva sa meraním kontaktného uhla niekoľkými kvapalinami a preložením priamky vytvorenej bodmi, danými dvojicou dát $[\cos\theta, \gamma_l]$. Jej podstatu vyjadruje rovnica (5.3):

$$\cos\theta = 1 + b(\gamma_c - \gamma_l) \quad (5.3)$$

kde γ_l je povrchová energia kvapaliny v J.m^{-2} ,

γ_c – kritická povrchová energia, kedy uhol $\theta = 0^\circ$ a $\cos\theta \rightarrow 1$ v J.m^{-2} ,

b – konštanta zohľadňujúca typ kvapaliny.

5.2.3.2 Fowkesova teória

Táto teória vychádza z predpokladu povrchovej energie ako miery príťažlivých síl povrchových vrstiev kvapaliny a pevnej látky. Uvažuje len nepolárne interakcie a predpokladá vzájomnú aditívnosť všetkých druhov interakcií. Jej podstatu vyjadruje rovnica (5.4):

$$\gamma_l(1 + \cos\theta) = 2(\sqrt{\gamma_s^d \cdot \gamma_l^d}) \quad (5.4)$$

kde γ_s^d je disperzná zložka povrchovej energie pevnej látky v J.m^{-2} ,
 γ_l^d – disperzná zložka povrchovej energie kvapaliny v J.m^{-2} .

5.2.3.3 Teória OWRK (Owens – Wendt – Rabel – Kaelble)

Ide o jednu z najčastejšie používaných techník stanovenia voľnej povrchovej energie. Vychádza z Fowkesovej teórie, pričom celkovú povrchovú energiu počíta ako súčet disperznej (^d) a polárnej zložky (^p). Jej podstatu vyjadruje rovnica (5.5):

$$\gamma_l(1 + \cos\theta) = 2(\sqrt{\gamma_s^d \cdot \gamma_l^d} + \sqrt{\gamma_s^p \cdot \gamma_l^p}) \quad (5.5)$$

5.2.3.4 Acido-bázická teória

Táto teória patrí do kategórie najnovších a vysoko presných stratégií zisťovania voľnej povrchovej energie. Je využívaná najmä v oblasti skúmania biologických systémov, pretože zhrňa súčet disperznej γ_d a acidobázickej zložky γ_{ab} , ktorá je presnejším vyjadrením polárnej zložky γ_p . Acidobázická zložka je definovaná na základe prijatia elektrónu γ^+ alebo odovzdania elektrónu γ^- . Na meranie sa používa súbor dvoch polárnych (voda a glycerol) a jednej disperznej testovacej kvapaliny (diiodometán) podľa vzťahu (5.6): (BS methods, 2025; BS sfe, 2025)

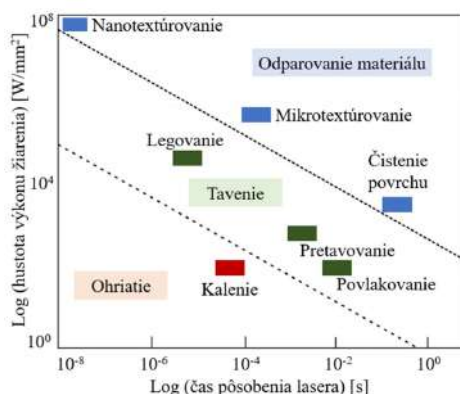
$$\gamma_l(1 + \cos\theta) = 2 \left(\sqrt{\gamma_s^d \gamma_l^d} + \sqrt{\gamma_s^+ \gamma_l^-} + \sqrt{\gamma_s^- \gamma_l^+} \right) \quad (5.6)$$

5.3 Laserová modifikácia povrchu

Proces laserovej modifikácie povrchu je cielená úprava vlastností povrchových vrstiev materiálu pôsobením laserového žiarenia. Vysoký tepelný účinok, koherentnosť a monochromaticita laserového žiarenia sa s výhodou využívajú na úpravu chemického a fázového zloženia povrchov, ich morfológie a drsnosti. Procesy prebiehajúce na strane spracovávaného materiálu sú riadené teplotou procesu T v závislosti od teploty tavenia materiálu T_t a teploty jeho odparovania T_o : (Vilar a Almeida, 2016)

- $T < T_t$ – ožiarený povrch ostáva v tuhom stave, pričom však môže dochádzať k fázovým premenám, napr. pri laserovom kalení a žíhaní,
- $T < T_s < T_o$ – materiál sa taví ale nedochádza k jeho odparovaniu, čo je typické pre laserové pretavovanie, legovanie a povlakovanie,
- $T > T_o$ – materiál sa čiastočne alebo úplne odparuje, tzv. abluje, čo sa využíva pri technológiách laserového štruktúrovania a textúrovania.

Procesy povrchovej modifikácie v závislosti od výkonovej hustoty a času pôsobenia laserového žiarenia znázorňuje Obr. 5.5.

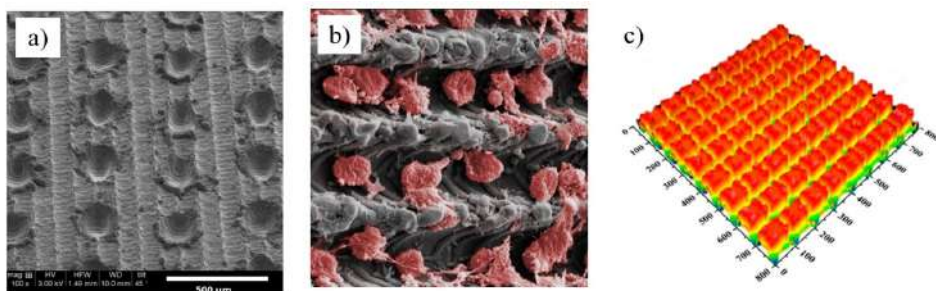


Obr. 5.5. Porovnanie možností laserovej modifikácie povrchu v závislosti od hustoty výkonu a času pôsobenia laserového žiarenia (Majumdar a Manna, 2011)

5.3.1 Laserové textúrovanie

Textúrovanie laserovým zväzkom je vytváranie priestorových povrchových štruktúr a vzorov so zreteľným výškovým rozlíšením (drážky, kanáliky, priehlbiny) veľkosti rádovo niekoľko mikrometrov až milimetrov (Obr. 5.6) (Beňačka, 2016; Lightmotif, 2022). Na textúrovanie sa používajú lasery, ktoré produkujú krátke a ultra krátke pulzy s vysokou tepelnou intenzitou a s minimálnym tepelným vplyvom na okolité materiálové vrstvy. Sú to nano, piko a femtosekundové pulzné lasery.

Povrchové textúry nachádzajú uplatnenie pri znižovaní hydrodynamického odporu v klzných kontaktoch, pri usmerňovaní prúdenia maziva alebo pri zvyšovaní biomechanického prepojenia ortopedických a dentálnych implantátov s pevnými tkanivami (kosťami). Pomáhajú tiež zvýšiť odolnosť voči opotrebeniu, menia adhézne a v neposlednom rade aj vizuálne vlastnosti povrchu.



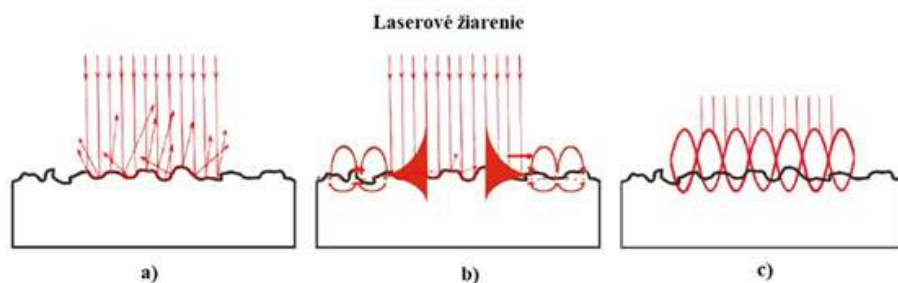
Obr. 5.6. Príklady laserom indukovanej textúry
a – jamková textúra (Laserax, 2025),

b – drážková textúra – biokompatibilný dentálny implantát LaserLok (LaserLok, 2025),

c – križová textúra nasnímaná konfokálnym mikroskopom (plocha 800 μm x 800 μm) (Huang a kol., 2019)

5.3.2 Laserové štruktúrovanie povrchu

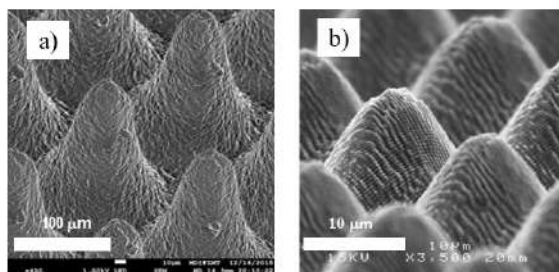
V porovnaní s technológiou laserového textúrovania, štruktúrovanie laserovým zväzkom umožňuje okrem modifikácie topografických vlastností na mikrogeometrickej úrovni, ovplyvňovať aj nanogeometriu povrchu, čo si našlo praktické využitie v biomedicínskom priemysle a elektrotechnike. Vhodným príkladom je zlepšenie antibakteriálnych vlastností a zmáčavosti dentálnych implantátov tvorbou tzv. hierarchickej, mikro aj nano povrchovej štruktúry. Častými štruktúrami na nanogeometrickej úrovni sú tzv. laserom indukované periodické povrchové štruktúry (LIPSS), ktoré majú podobu samo organizujúcich sa paralelných lineárnych alebo náhodne orientovaných vlnitých povrchových prvkov. Jeden z viacerých možných mechanizmov ich vzniku vysvetľuje Obr. 5.7. Laserový zväzok, dopadajúci na povrch zhora sa rozptyľuje v závislosti od morfológie pôvodného povrchu (Obr. 5.7a). Rozptyľ laserového žiarenia môže viesť k vzniku elektromagnetických vln, ktoré sa pohybujú pozdĺž rozhrania povrch – okolitá atmosféra (Obr. 5.7b) a interferujú s dopadajúcim laserovým žiarením, čoho výsledkom je selektívna ablácia povrchu (Obr. 5.7c).



Obr. 5.7. Mechanizmus vzniku laserom indukovanej textúry (Florian a kol., 2020)
a – rozptyľ laserového žiarenia pri dopade na povrch, b – vznik elektromagnetických vln pozdĺž povrchu,
c – interferencia elektromagnetických vln s laserovým žiarením – selektívna ablácia

Laserové štruktúrovanie sa využíva v elektronike na úpravu povrchových vlastností automobilových senzorov a zlepšenie vodivosti polovodičov v elektrických obvodoch, pri výrobe komponentov optických zariadení, kde sa využíva na reguláciu svetelnej odrazivosti povrchu, absorpčnej schopnosti alebo rozptylu šošoviek. Používa sa tiež pri výrobe superhydrofilných alebo superhydrofóbných povrchov a povrchov so samočistiacim a antibakteriálnym účinkom (Obr. 5.8a), pri výrobe fotovoltických článkov, prípadne na zlepšenie stability adhézneho spojenia komponentov batériových článkov alebo výmenníkov tepla (SP structuring, 2024; Trumpf, 2025).

Špecifickým príkladom sú tzv. biomimetické povrchové textúry, ktoré sú inšpirované prírodnými systémami, s antibakteriálnym, protiplesňovým alebo samočistiacim účinkom, napodobňujúce povrchy rastlín alebo živočíchov, napr. lotosový kvet (Obr. 5.8b) alebo pokožka chvostoskoka.



Obr. 5.8. Príklady laserom indukovanej textúry (Lightmotif, 2022)
a – superhydrofóbny povrch ClearSurface™,
b – LIPSS hierarchická štruktúra inšpirovaná lotosovým kvetom

5.4 Hodnotenie mikrogeometrických vlastností a zmáčavosti laserom modifikovaného povrchu – prípadová štúdia

Prípadová štúdia prezentuje postup laserovej modifikácie povrchu určeného na použitie v dentálnej implantológii. Cieľom je zlepšiť jeho biomedicínske vlastnosti. Podrobne opisuje postup laserovej úpravy povrchu v 4 rôznych plynných prostrediach a dokumentuje metodiku a výsledky hodnotenia drsnosti a zmáčavosti takto upravených povrchov. V štúdiu bol použitý kompozitný materiál Ti-TiB₂ s 5 obj.% TiB₂, hustotou 4,49 g·cm⁻³, pórovitosťou 0,5 % a priemernou mikrotvrdosťou 357 MHV_{0,5}, pripravený metódou práškovej metalurgie. Chemické zloženie materiálu uvádza Tabuľka 5.1.

Tabuľka 5.1. Chemické zloženie kompozitu typu Ti-TiB₂

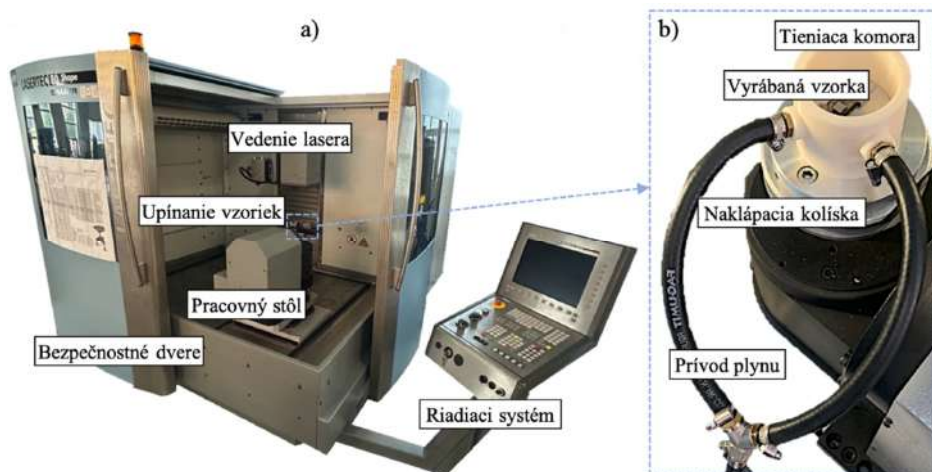
Ti (hm.%)	O (hm.%)	C (hm.%)	B (hm.%)
86,6	6,0	4,6	2,7

5.4.1 Úprava povrchu laserom

Laserová modifikácia povrchu bola realizovaná na 5-osovom obrábacom centre Lasertec 80 Shape (Obr. 5.9a), vybavenom nanosekundovým Yb-dopovaným vláknovým laserom pracujúcim s konštantnou dĺžkou pulzu 120 ns pri vlnovej dĺžke 1064 nm a s konštantným priemerom laserového zväzku 50 μm.

Pred laserovou úpravou boli vzorky pripravené brúsením pomocou brúsnych papierov zrnitosti P600 a P1200, čím sa získala homogénna povrchová štruktúra s rovnakou východiskovou drsnosťou na každom z obrábaných povrchov. Po brúsení boli vzorky očistené destilovanou vodou a etanolom v ultrazvukovej čističke a potom vysušené prúdom horúceho vzduchu.

Laserová modifikácia povrchu bola realizovaná na vzduchu (vzorka BV) a potom v kyslíkovej (vzorka BO), argónovej (vzorka BA) a dusíkovej atmosfére (vzorka BN) v tieniacej komore s dvojicou vtokových kanálov s konštantným prietokom ochranného plynu (Obr. 5.9b). Vyrobené boli štyri experimentálne plochy s rozmerom 4,5 x 4,5 mm, pričom boli použité dva prechody laserového zväzku s kolmým krížením dráh jeho pohybu po povrchu. Pri každom prechode bola odstránená vrstva materiálu s teoretickou hrúbkou 1 μm. Technologické podmienky procesu sumarizuje Tabuľka 5.2.



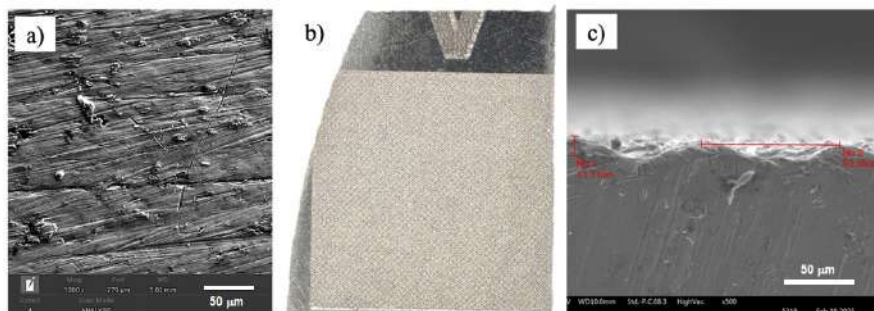
Obr. 5.9. Experimentálne zariadenie
a – CNC 5-osové laserové obrábacie centrum Lasertec 80 Shape,
b – tieniaca komora na prívod ochrannej atmosféry

Tabuľka 5.2. Podmienky laserovej úpravy povrchu

Označenie povrchu	P (W)	f (kHz)	v_s (mm/s)	D_L (μm)	D_T (μm)	E_P (mJ)	Plyn (-)	Q (l/min)
BV	4	20	1000	50	10	0,2	Vzduch	-
BA							Argón	20
BN							Dusík	20
BO							Kyslík	20

Poznámka: P – výstupný optický výkon laserového žiarenia, f – frekvencia laserového žiarenia, v_s – skenovacia rýchlosť zväzku, D_L – laterálna vzdialenosť medzi jednotlivými pulzami, D_T – transverzálna vzdialenosť medzi jednotlivými dráhami, E_P – energia jedného laserového pulzu, Q – prietoková rýchlosť plynu

Príklad laserom modifikovaného povrchu na vzduchu (BV) je uvedený na Obr. 5.10.



Obr. 5.10. Laserom modifikovaný povrch BV
a – povrch pred laserovou úpravou (brúsený brúsny papierom so zrnitosťou P1200,
b – povrch upravený laserom vo vzduchovom prostredí, c) profil laserom modifikovaného povrchu

5.4.2 Drsnosť povrchu po laserovej úprave

V rámci hodnotenia drsnosti laserom modifikovaných povrchov boli vyhodnotené výškové parametre profilu povrchu Ra , Rq , Rsk , Rku a parametre profilových prvkov Rz , Rp a Rv . Na meranie bol použitý dotykový profilometer Mitutoyo SJ 210. Meranie každého parametra bolo opakované 7-krát v smere kolmom na stopy laserového zväzku v poslednej odoberanej vrstve. Vyhodnotené boli tiež plošné parametre drsnosti povrchu Sa , Sq , Sz , Sp , Sv , Ssk , Sku . Na ich meranie bol použitý vysokorozlišovací digitálny mikroskop VHX-X1 (Obr. 5.11).



Obr. 5.11. Meranie drsnosti
a – kontaktným profilometrom, b – digitálnym mikroskopom

5.4.2.1 Výsledky merania parametrov profilovej drsnosti povrchu

Údaje uvedené v Tabuľke 5.3 a zobrazené na Obr. 5.12. predstavujú parametre profilovej drsnosti povrchu laserom modifikovaných povrchov pri použití 4 rôznych plynových atmosfér a ich porovnanie s parametrami drsnosti Ti kompozitu v stave po brúsení.

Tabuľka 5.3. Namerané hodnoty parametrov profilovej drsnosti

	ZM		BV		BA		BN		BO	
	AP	SO	AP	SO	AP	SO	AP	SO	AP	SO
Ra (μm)	0,34	0,03	2,08	0,16	1,77	0,31	2,35	0,09	1,72	0,13
Rq (μm)	0,46	0,05	2,54	0,17	2,20	0,34	2,90	0,09	2,14	0,17
Rz (μm)	3,08	0,43	12,38	1,12	11,35	1,22	14,31	0,69	11,06	0,83
Rp (μm)	1,91	0,25	6,15	0,56	5,68	0,53	7,14	0,31	5,17	0,56
Rv (μm)	1,17	0,21	6,23	0,67	5,67	0,93	7,16	0,45	5,89	0,50
Rsk (-)	0,74	0,34	0,03	0,16	0,01	0,16	0,06	0,08	-0,19	0,14
Rku (-)	5,45	2,07	2,54	0,29	2,88	0,44	2,64	0,19	2,84	0,15

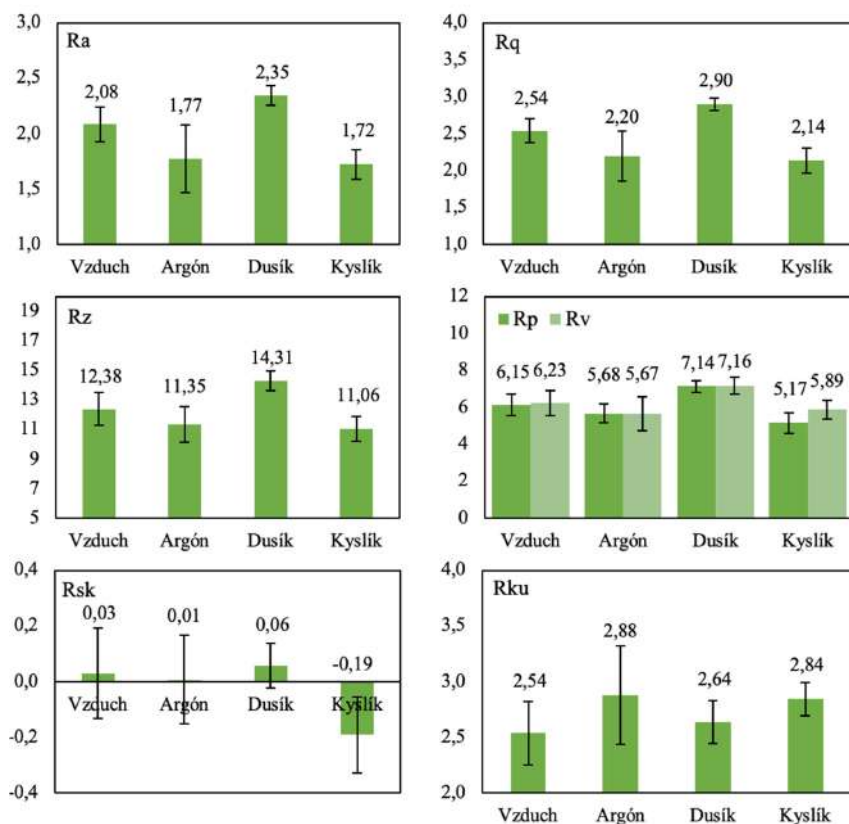
Poznámka: AP – aritmetický priemer zo 7 opakovaných meraní, SO – smerodajná odchýlka vypočítaná zo 7 opakovaných meraní

Z hľadiska posudzovania účinku laserovej modifikácie povrchu možno pozorovať výrazné zvýšenie drsnosti povrchu, súhrnne kvantifikované zvýšenou hodnotou parametra Ra a Rq , pričom možno pozorovať niekoľkonásobné zväčšenie rozmeru výstupkov a priehlbín. Povrchová mikrogeometria sa po laserovom spracovaní stala rovnomernejšou

z hľadiska výškových rozdielov (Rsk blízke 0) a v dôsledku prítomnosti laserom indukovanej križovej textúry aj priestorovo usporiadanejšou, menej členitou a s nižšou mierou špicatosti ($Rku < 3$).

Najvyššia hodnoty parametrov drsnosti Ra , Rq a Rz boli zaznamenané na povrchu vyrobenom v dusíku (povrch BN).

Naopak, prítomnosť kyslíka a argónu ako ochrannej atmosféry napomáha získať výrazne nižšie hodnoty drsnosti, ktoré sú svojou veľkosťou porovnateľné. Kyslíková atmosféra (povrch BO) napomáha tvorbe povrchu s prevahou priehlbín nad výstupkami ($Rku < 3$), čo predikuje dobrú zmačavosť povrchu. Prítomnosť argónovej atmosféry (povrch BA), pomohol vyrobiť vyvážený stabilný povrch s rovnomerným rozložením výstupkov a priehlbín s vyváženou členitosťou (najbližšie ku $Rsk = 0$ a $Rku = 3$).



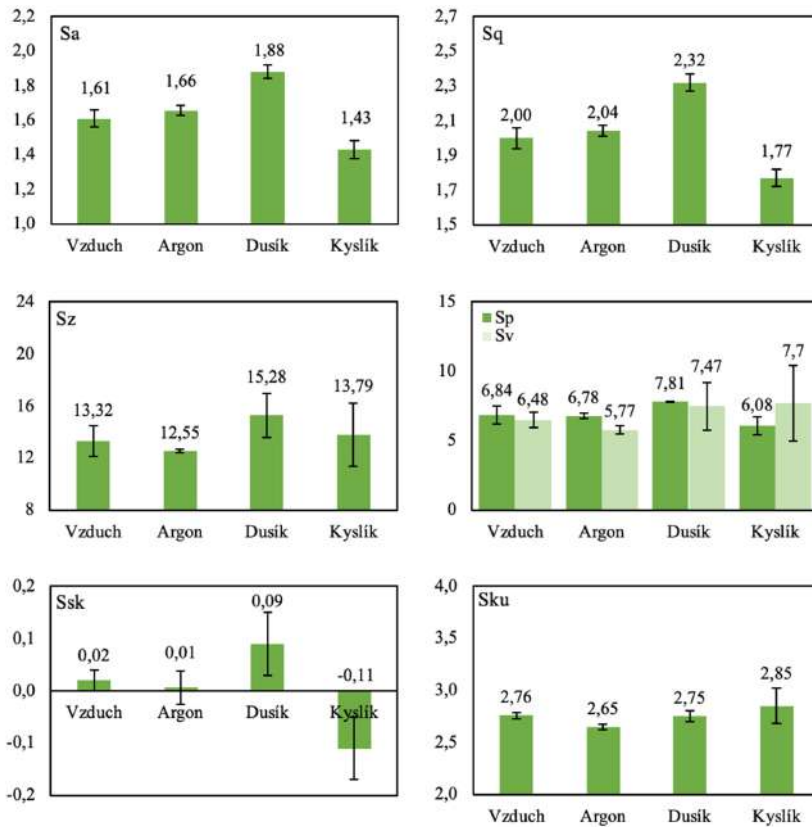
Obr. 5.12. Hodnoty profilových parametrov drsnosti pri obrábaní v rozličných atmosférach

5.4.2.2 Výsledky merania parametrov plošnej drsnosti povrchu

Kombinované meranie profilovej a plošnej drsnosti poskytuje podrobnejšie a komplexnejšie informácie o anizotropii povrchovej štruktúry. Namerané hodnoty parametrov plošnej drsnosti povrchu sú uvedené v Tabuľke 5.4 a znázornené na Obr. 5.13. Rozdiely v povrchovej mikrogeometrii je vhodné pozorovať taktiež pomocou 3D máp na Obr. 5.14.

Tabuľka 5.4. Namerané hodnoty parametrov plošnej drsnosti

	ZM		BV		BA		BN		BO	
	AP	SO	AP	SO	AP	SO	AP	SO	AP	SO
Sa (μm)	0,20	0,02	1,61	0,05	1,66	0,03	1,88	0,04	1,43	0,05
Sq (μm)	0,27	0,03	2,00	0,06	2,04	0,03	2,32	0,05	1,77	0,05
Sz (μm)	3,17	1,67	13,32	1,18	12,55	0,13	15,28	1,72	13,79	2,39
Sp (μm)	1,70	0,69	6,84	0,63	6,78	0,19	7,81	0,01	6,08	0,66
Sv (μm)	1,47	1,00	6,48	0,55	5,77	0,31	7,47	1,72	7,70	2,71
Ssk (-)	0,22	0,30	0,02	0,02	0,01	0,03	0,09	0,06	-0,11	0,06
Sku (-)	6,74	4,93	2,76	0,03	2,65	0,03	2,75	0,05	2,85	0,17

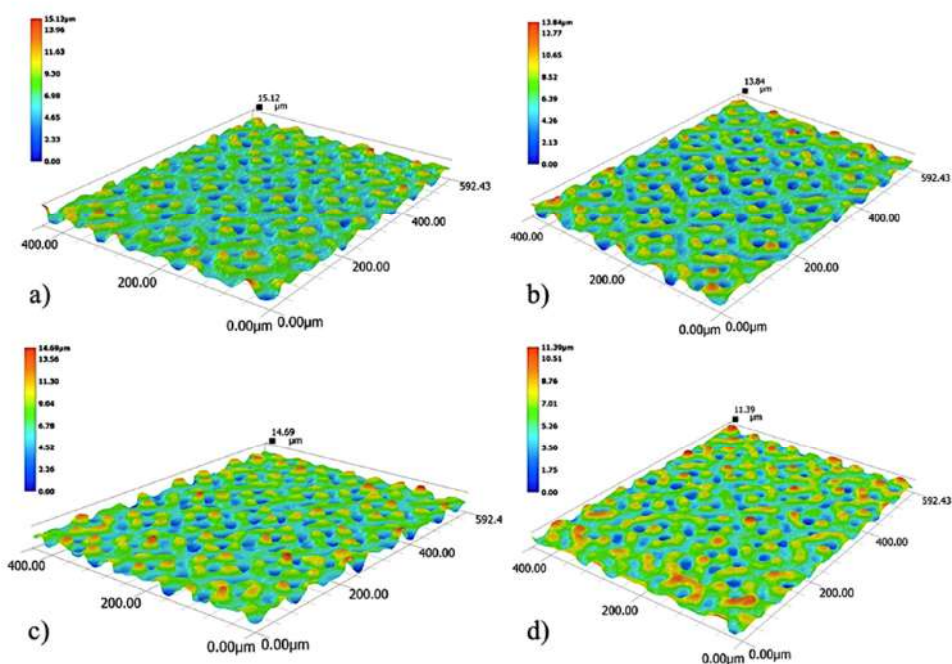


Obr. 5.13. Hodnoty plošných parametrov drsnosti pri obrábani v rozličných atmosférach

Namerané hodnoty parametrov plošnej drsnosti vykazujú nižšiu variabilitu v porovnaní s profilovými parametrami. Najvyššiu drsnosť aj v tomto prípade vykazuje povrch vyrobený v dusíkovej atmosfére (povrch BN). Zvýšenie drsnosti povrchu po laserovom spracovaní TiG5 zliatiny v dusíku, v porovnaní s modifikáciou v argóne, zaznamenali tiež autori Li

a kol. (2020). Identifikovaný bol aj miernejší účinok argónu (povrch BA) na hodnoty špicatosti a šikmosti profilu (Rku a Sk).

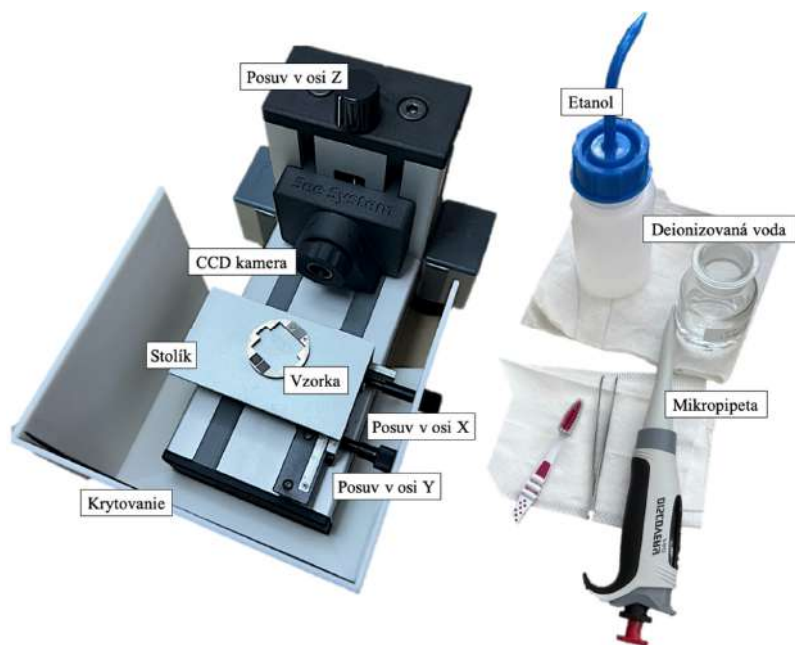
Na 3D mapách povrchov možno zreteľne pozorovať textúru spôsobenú krížovým šrafovaním laserového zväzku. Najlepšie je textúru vidieť na povrchu BV (Obr. 5.14a), ktorý obsahuje pravidelné výstupky a priehlby rovnomerne rozložené po celom povrchu (Rsk blízke 0). Povrch BA (Obr. 5.14b) je charakteristický jemnou štruktúrou s najnižšou špicatosťou Rku a najmenšou výškou profilu Sz . Povrch BN je napohľad drsnejší, čo vidieť aj na najvyššom nameranom parametri Sz a výraznom červenom sfarbení jednotlivých výstupkov (Obr. 5.14c). Najviac členitý povrch s prevahou priehlbín a malou drsnosťou je povrch BO, kde možno pozorovať priestorovú anizotropiu textúry (Obr. 5.14d). Atypická spojitosť medzi jednotlivými výstupkami môže byť spôsobená odlišným mechanizmom tavenia materiálu a zvýšenou oxidáciou v prostredí kyslíkovej atmosféry.



Obr. 5.14. 3D mapy povrchov
a – vzorka BV, b – vzorka BA, c – vzorka BN, d – vzorka BO

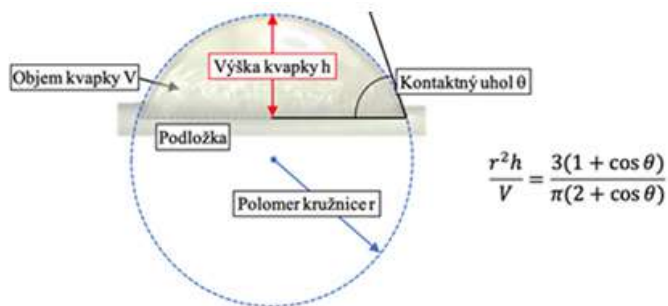
5.4.3 Meranie uhla zmáčavosti povrchu metódou sediacej kvapky

Na posúdenie zmáčavosti experimentálnych povrchov bol použitý goniometer See System E (Obr. 5.15). Meraný bol statický kontaktný uhol θ (uhol medzi dotyčnicou nanesej kvapky a povrchom vzorky) kvapky deionizovanej vody s objemom 3 μ l, ktorá bola nanesená na povrch pred laserovou modifikáciou a 24 h a 30 dní po laserovej úprave. Merania boli opakované trikrát na rôznych miestach povrchu, aby sa obmedzil vplyv nehomogenity povrchu z hľadiska chemického stavu a drsnosti, pričom medzi každým meraním bol povrch vyčistený etanolom a vysušený pri izbovej teplote.



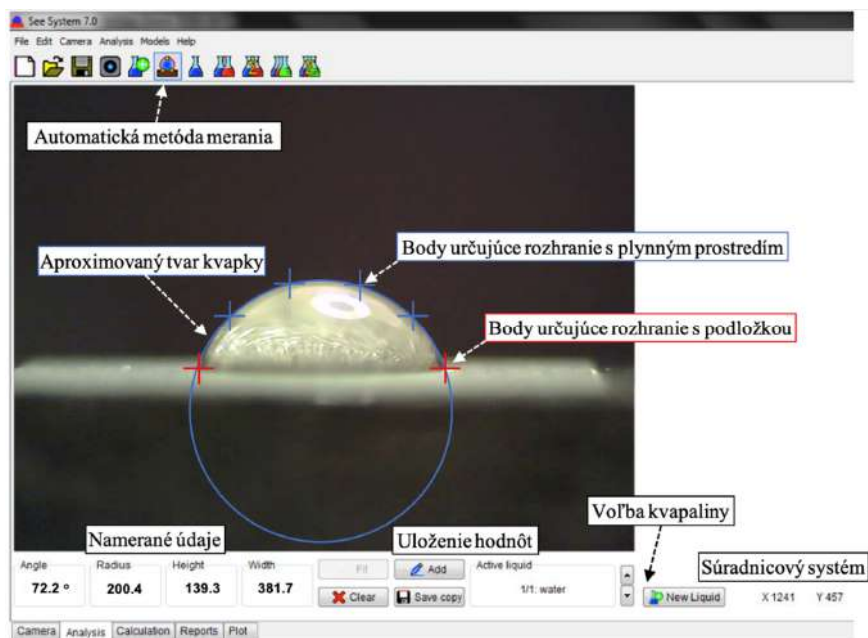
Obr. 5.15. Goniometer See System a pomôcky na meranie statického kontaktného uhla

CCD kamera inštalovaná na goniometri zaznamenáva profil pipetou nanesej kvapky. Kamerou zaznamenaný obraz alebo časový vývoj tvaru kvapky je počítačovo spracovaný. Špeciálny softvér umožňuje stanoviť hodnotu kontaktného uhla pomocou kružnice opisanej cez body na rozhraní medzi kvapkou a okolitým prostredím, sledovať časový vývoj tvaru kvapky alebo počítať povrchovú energiu použitím integrovaných štandardných výpočtových modelov, napr. Owens-Wendtovho modelu. Zo známej hodnoty polomeru kružnice r , objemu kvapky V a jej výšky h , možno vypočítať kontaktný uhol θ pomocou rovnice uvedenej na Obr. 5.16 (Mojrová, 2011).



Obr. 5.16. Parametre kvapky potrebné na výpočet veľkosti kontaktného uhla θ

Užívateľské prostredie softvéru See System 7.0 pri analýze tvaru meranej kvapky približuje Obr. 5.17.



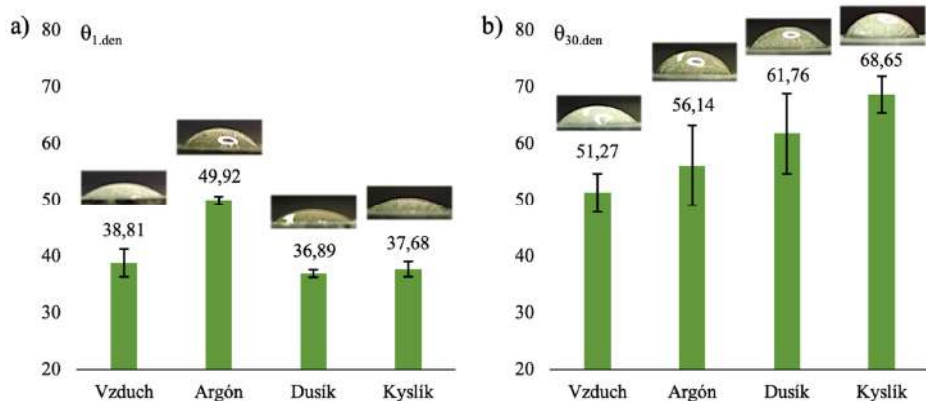
Obr. 5.17. Prostredie softvéru See System 7.0 pri analýze tvaru meranej kvapky

5.4.3.1 Výsledky merania zmáčavosti

Uhol zmáčavosti skúmaného povrchu vo východiskovom stave, pred laserovou modifikáciou, bol $80,16^\circ$. Hodnoty kontaktných uhlov povrchov θ po 1 dni od spracovania laserom v rôznom plynnom prostredí, ako je uvedené v Tabuľke 5.5 a zobrazené na Obr. 5.18, klesli v porovnaní s hodnotami nameranými na východiskovom povrchu. Povrchy sa stali výrazne hydrofilné, pričom najväčšia zmena bola zaznamenaná v prípade použitia dusíkovej a kyslíkovej atmosféry. Tento efekt možno vysvetliť prítomnosťou zvýšeného množstva polárnych oxidov a nitridov titánu prítomných na povrchu po tepelnom účinku lasera (Yang a kol., 2016). Naopak znížená zmáčavosť bola zaznamenaná v prípade modifikácie v inertnej argónovej atmosfére, ktorá aktívne potláča chemické reakcie nataveného kovu s okolitým prostredím.

Tabuľka 5.5. Hodnoty kontaktného uhla θ po 24 h a 30 dňoch od výroby

	BV		BA		BN		BO	
	AP	SO	AP	SO	AP	SO	AP	SO
$\theta_t - 1. \text{ deň } (^\circ)$	38,81	2,44	49,92	0,75	36,89	0,64	37,68	1,35
$\theta_{30} - 30. \text{ deň } (^\circ)$	51,27	3,41	56,14	7,07	61,76	7,04	68,65	3,27
Zmena θ ($^\circ$)	12,46		6,22		24,87		30,97	
Zmena θ (%)	32,11		12,46		67,42		82,19	



Obr. 5.18. Vývoj kontaktného uhla θ v závislosti od typu ochranného plynu
a – po 1 dni, b – po 30 dňoch

S narastajúcim časom od laserovej úpravy hodnoty kontaktných uhlov narastali v dôsledku starnutia, t. j. chemických zmien na povrchoch spôsobených interakciou s okolitým prostredím. Ich hodnoty však už nedosiahli hodnotu uhla zmáčavosti východiskového povrchu. Časové zmeny boli pre jednotlivé plynné prostredia rôzne. Najvýraznejšia zmena bola zaznamenaná v prípade kyslíka (približne 82 %) a dusíka (približne 67 %). Najmenej výrazná časová zmena bola zaznamenaná v prípade použitia argónovej atmosféry, čo potvrdzuje teóriu nižšej polarity a tým zmáčavosti v dôsledku absencie povrchových oxidických produktov. Zaujímavosťou je to, že meranie údajov po 30 dňoch je charakteristické vysokou variabilitou, čo dokumentuje rôznu afinitu povrchov k zložkám prítomným v okolitej atmosfére (Yalishev a kol., 2022). Výrazný nárast hydrofóbnosti po 30 dňoch tiež naznačuje, že meranie bezprostredne po obrábaní nemusí spoľahlivo odrážať dlhodobé vlastnosti skúmaného materiálu.

Záver

Stratégia laserového obrábania povrchu práškoveho kompozitu Ti-TiB₂ krížovým šrafovaním v rôznych pracovných atmosférach zvýšila jeho drsnosť a zlepšila jeho zmáčavosť v porovnaní s pôvodným, brúseným povrchom. V závislosti od typu použitej pracovnej atmosféry bol dosiahnutý kontaktný uhol v intervale 36,89° až 68,65°. Všetky vyrobené povrchy boli hydrofilné aj po 30 dňoch.

Dusíková atmosféra (povrch BN) viedla k vzniku najvyššej povrchovej drsnosti. Tento povrch sa vyznačoval najvyššou hydrofilnosťou, ktorá klesla po 30 dňoch o približne 67 %. Prítomnosť kyslíkovej atmosféry (povrch BO) viedla k najnižšej hodnote drsnosti povrchu s výraznou anizotropiou vyrobenej textúry a ojedinelou prevahou priehlbín nad výstupkami ($R_{sk} = -0,19$, $S_{sk} = -0,11$). Hydrofóbnosť povrchovej vrstvy vyrobenej v kyslíku sa zvyšovala najrýchlejšie (zmena θ po 30 dňoch o približne 82 %). Argónová atmosféra (povrch BA) pomohla vytvoriť homogénny povrch s rovnomerným rozložením výstupkov a priehlbín (R_{sk} blízke 0), relatívne nízkou zmáčavosťou, ktorá sa po 30 dňoch zmenila iba o približne 12,5 %. Prítomnosť vzdušnej atmosféry (povrch BV) napomáhala tvorbe pravidelnej povrchovej textúry s porovnateľnými hodnotami zmáčavosti, ako v prípade dusíkovej a oxidačnej atmosféry (zmena k hydrofóbnosti o približne 32 %).

Zoznam bibliografických odkazov

BEŇAČKA, P. 2016. *Vliv ohniskové vzdálenosti na šířku řezu při laserovém obrábění polymerních materiálů.* [diplomová práce]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická.

BS ADHESION, 2025. *Adhesion.* [online] [cit. 2025-2-14]. Dostupné na internete: <https://content.biolinscientific.com/wp-adhesion>.

BS BIOMED, 2025. *Effect of wettability in biomedical applications.* [online] [cit. 2025-2-16]. Dostupné na internete: <https://content.biolinscientific.com/effect-of-wettability-in-biomedical-applications>.

BS CA, 2025. *Contact angle.* [online] [cit. 2025-2-16]. Dostupné na internete: <https://content.biolinscientific.com/contact-angle-what-is-it-and-how-to-measure-it>.

BS INTERFACE, 2025. *Surface and interfacial tension.* [online] [cit. 2025-2-12]. Dostupné na internete: <https://content.biolinscientific.com/surface-and-interfacial-tension>.

BS METHODS, 2025. *Surface free energy methods.* [online] [cit. 2025-2-16]. Dostupné na internete: <https://content.biolinscientific.com/surface-free-energy-methods-0-0>.

BS SFE, 2025. *Surface free energy.* [online] [cit. 2025-2-11]. Dostupné na internete: <https://content.biolinscientific.com/wp-surface-free-energy>.

FLORIAN, C., KIRNER, S. V., KRÜGER, J. and BONSE, J. 2020. Surface functionalization by laser-induced periodic surface structures. In *Journal of Laser Applications*, 32, 022063. [online] [cit. 2025-2-16]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.2351/7.0000103>.

GAO, S. X. and ZHANG, Q. L. 2013. Influence of machined workpiece surface integrity on fatigue performance. *Applied Mechanics and Materials*, 373–375(00), 1999–2003. [online] [cit. 2025-2-11]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.373-375.1999>.

HANSSON, K. N. and HANSSON, S. 2011. Skewness and Kurtosis: Important Parameters in the Characterization of Dental Implant Surface Roughness – A Computer Simulation. *International Scholarly Research Notices*, 2011, 1–6. [online] [cit. 2025-2-12]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.5402/2011/305312>.

HAVLÍK, L. 2012. *Integrita povrchu při vystružování s využitím vystružovací hlavy MT3.* [diplomová práce]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

HUANG, J., WEI, S., ZHANG, L., YANG, Y., YANG, S. and SHEN, Z. 2019. Fabricating the superhydrophobic nickel and improving its antifriction performance by the laser surface texturing. *Materials*, 12(7). [online] [cit. 2025-2-12]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.3390/ma12071155>.

ISO 21920-2; Geometrical product specifications (GPS)—Surface texture: Profile—Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters. ISO: Geneva, Switzerland, 2021.

ISO 25178-2; Geometrical product specifications (GPS)—Surface texture: Areal—Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters. ISO: Geneva, Switzerland, 2021.

JAWAHIR, I. S., BRINKSMEIER, E., M'SAOUBI, R., ASPINWALL, D. K., OUTEIRO, J. C., MEYER, D., UMBRELLO, D. and JAYAL, A. D. 2011. Surface integrity in material removal processes: Recent advances. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60(2), 603–626. [online] [cit. 2025-2-12]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.05.002>.

KEY DRSNOSTĚ, 2018. *Vyhodnocení drsnosti povrchu Návrhy na využití*. [online] [cit. 2025-2-17]. Dostupné na internete: https://www.keyence.eu/cscz/mykeyence/downloadFromDLList?downloadAssetId=AS_94140&downloadZipFlag=0.

KEY INTRO, 2018. *Introduction to surface roughness*. [online] [cit. 2025-2-18]. Dostupné na internete: https://www.keyence.eu/cscz/mykeyence/downloadFromDLList?downloadAssetId=AS_94992&downloadZipFlag=0.

KRÁSNÝ, I. 2010. *Měření kontaktních úhlů smáčení a určování povrchové energie plastů*. [diplomová práce]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav fyziky a mater. inženýrství.

KUNG, C. H., SOW, P. K., ZAHIRI, B. and MÉRIDA, W. 2019. Assessment and Interpretation of Surface Wettability Based on Sessile Droplet Contact Angle Measurement: Challenges and Opportunities. *Advanced Materials Interfaces*, 6(18), 1–27. [online] [cit. 2025-2-12]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1002/admi.201900839>.

LASERAX, 2025. *Laser texturing performance*. [online] [cit. 2025-2-12]. Dostupné na internete: <https://www.laserax.com/laser-texturing-performance-metals>.

LASERLOK, 2025. *Laser-Lok – microchannels*. [online] [cit. 2025-2-22]. Dostupné na internete: <https://www.laser-lok.com/>.

LI, G., YAO, X., WOOD, R.J., GUO, J. and SHI, Y. 2020. Laser Surface Nitriding of Ti–6Al–4V Alloy in Nitrogen–Argon Atmospheres. *Coatings*, 10, 1009. [online] [cit. 2025-2-22]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.3390/coatings10101009>.

LIAO, Z., LA MONACA, A., MURRAY, J., SPEIDEL, A., USHMAEV, D., CLARE, A., AXINTE, D. and M'SAOUBI, R. 2021. Surface integrity in metal machining - Part I: Fundamentals of surface characteristics and formation mechanisms. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 162, 103687. [online] [cit. 2025-2-22]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103687>.

LIGHTMOTIF, 2022. *Texturing*. [online] [cit. 2025-2-15]. Dostupné na internete: <https://www.lightmotif.nl/texturing>.

MAJUMDAR, J. D. and MANNA, I. 2011. Laser Material Processing. *International Materials Reviews*, 56(5–6), 341–388. [online] [cit. 2025-2-12]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1179/1743280411Y.0000000003>.

METELKOVÁ, J. 2014. *Pokročilé metody vyhodnocování topografie povrchu*. [bakalárska práca]. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

MOJROVÁ, B. 2011. *Měření vázaného náboje pomocí povrchového napětí*. [bakalárska práca]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.

MOŠKO, M. 2024. *Modifikácia funkčných vlastností povrchu CP Ti Grade 2 laserovým mikroobrábaním*. [diplomová práca]. Trnava : STU v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave.

PAWLUS, P., REIZER, R. and WIECZOROWSKI, M. 2021. Functional importance of surface texture parameters. *Materials*, 14(18), 1–29. [online] [cit. 2025-2-28]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.3390/ma14185326>.

SAMANTA, A., WANG, Q., SHAW, S. K. and DING, H. 2020. Roles of chemistry modification for laser textured metal alloys to achieve extreme surface wetting behaviors. *Materials and Design*, 192, 108744. [online] [cit. 2025-2-28]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108744>.

SP STRUCTURING, 2024. *Laser structuring*. [online] [cit. 2025-2-14]. Dostupné na internete: <https://www.spectra-physics.cn/en/n/laser-structuring>.

TRUMPF, 2025. *Laser structuring*. [online] [cit. 2025-2-28]. Dostupné na internete: https://www.trumpf.com/en_US/solutions/applications/surface-processing-with-the-laser/laser-structuring/.

ULUTAN, D. and OZEL, T. 2011. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(3), 250–280. [online] [cit. 2025-2-28]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.11.003>.

VILAR, R. and ALMEIDA, A. 2016. 2 – Laser surface treatment of biomedical alloys. *Laser Surface Modification of Biomaterials: Techniques and Applications*, 35–75. [cit. 2025-2-14]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100883-6.00002-2>.

WANG, Q. and CHUNG. Y. 2013. *Encyclopedia of tribology*. Springer New York Heidelberg Dordrecht London, 4139 s. ISBN 9780387928968.

WONGSUE, S., THANATVARAKORN, O., PRASANSUTTIPORN, T., NIMMANPIUG, P., SASTRARUJI, T., HOSAKA, K., FOXTON, R. M. and NAKAJIMA, M. 2023. Effect of surface topography and wettability on shear bond strength of Y-TZP ceramic. *Scientific Reports*, 13(1), 1–9. [cit. 2025-2-14]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45510-8>.

YALISHEV, V., IQBAL, M., KIM, V. and ALNASER, A. S. 2022. Effect of processing environment on the wettability behavior of laser-processed titanium. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 55(4). [cit. 2025-2-12]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac296c>.

YANG, C. JUAN, MEI, X. SONG, TIAN, Y. LING, ZHANG, D. WEI, LI, Y. and LIU, X. PING. 2016. Modification of wettability property of titanium by laser texturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(5–8), 1663–1670. [cit. 2025-2-15]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8601-9>.

Pod'akovanie

Tento príspevok vznikol v rámci projektu: *Implementácia inovatívnych foriem učenia a praktického tréningu do vzdelávania v oblasti výrobných technológií a výrobného manažmentu s cieľom zvýšiť atraktivnosť štúdia a podporiť rozvoj prierezových kompetencií absolventov* (026STU-4/2023), s podporou agentúry KEGA MŠVVaŠ SR.

6 APLIKÁCIA RÁMCA SCRUM PRI RIADENÍ AGILNÝCH PROJEKTOV

SAMÁKOVÁ, J., – MESÁROŠOVÁ, J., – KADERÁBEKOVÁ, N.

Úvod

V súčasnom dynamickom podnikovom prostredí zohráva efektívne riadenie projektov kľúčovú úlohu pri dosahovaní strategických cieľov podnikov. Tradičné prístupy k riadeniu projektov, ako vodopádový (waterfall) bol dlhé roky dominantnou metódou v mnohých odvetviach. S narastajúcou potrebou flexibility, rýchleho prispôsobenia sa meniacim podmienkam trhu a neustálemu zlepšovaniu kvality produktov, sa však čoraz viac presadzujú agilné prístupy k riadeniu projektov. Agilné prístupy sú určené pre vývoj produktov, resp. pre jeho riadenie. Nie sú určené na komplexné riadenie projektov. Nemožno nimi teda nahradiť tradičné „waterfall“ projektové riadenie. Otázkou teda nie je, či riadiť agilne alebo tradične, ale ako tieto prístupy kombinovať a integrovať (POTIFOB, 2025). V súčasnosti sa preto čoraz viac uplatňuje hybridný prístup k riadeniu projektov, ktorý kombinuje prvky tradičného a agilného prístupu, s cieľom využiť výhody oboch prístupov.

Cieľom tejto prípadovej štúdie je komplexne zadefinovať tri hlavné prístupy k riadeniu projektov: tradičné (waterfall) riadenie projektov, agilné riadenie projektov a hybridné riadenie projektov, so zameraním na agilný rámec SCRUM. V prípadovej štúdii sú zadefinované aj jednotlivé agilné rámce ako Kanban a Scrumban, ktoré môžu byť kombinovateľné pri riadení projektov. Nosnú časť štúdie však tvorí podrobný opis agilného rámca SCRUM, ktorý sa v súčasnosti radí medzi najrozšírenejšie rámce využívané pre agilné alebo hybridné riadenie projektov. Okrem teoretického zhodnotenia SCRUM-u je v štúdii prezentovaná aj jeho praktická aplikácia v konkrétnom priemyselnom podniku, čo poskytuje reálny pohľad na jeho implementáciu, výhody a možné výzvy.

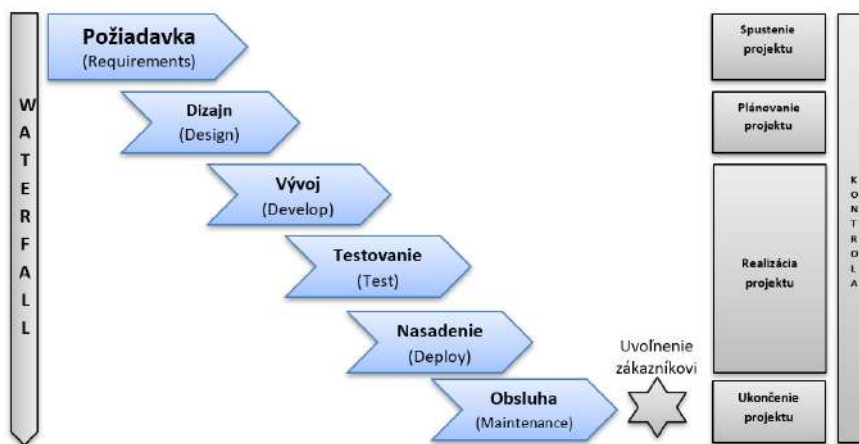
Cieľom predkladanej prípadovej štúdie je nielen identifikovať rozdiely medzi jednotlivými prístupmi (tradičný, agilný a hybridný), ale aj poskytnúť podrobný pohľad na fungovanie SCRUM-u v podnikovom prostredí. Na základe tejto analýzy bude možno vyhodnotiť efektivitu jeho implementácie a poskytnúť odporúčania pre podniky, ktoré zvažujú prechod na agilné, prípadne hybridné riadenie projektov.

6.1 Tradičné riadenie projektov

Tradičné riadenie projektu, nazývané tiež sekvenčné, procesné alebo tzv. waterfall (vodopádové) riadenie spočíva v podrobnom plánovaní projektu na jeho začiatku a ďalšom riadení všetkých aktivít počas jeho trvania. Tento prístup je vhodný, keď je jasne definovaný cieľ a je nevyhnutné riadiť všetky činnosti v rámci projektu. Tradičné riadenie projektov si vyžaduje presne zadefinovaný cieľ projektu, výstupy a plán projektu, na rozdiel od agilného prístupu, kde sú tieto aspekty flexibilnejšie. Vodopádové riadenie reprezentuje prístup k riadeniu projektov, kde je nevyhnutné plniť úlohy postupne, krok za krokom. Jeho pevná organizácia a predom stanovené fázy sú obvykle jeho charakteristickými rysmi. Tento prístup často efektívne funguje pri jednoduchých projektoch, kde je potrebné minimálne upravovať plán. Avšak pre komplexnejšie projekty nemusí byť najvhodnejší, pretože vyžadujú flexibilnejší prístup. Poskytuje stabilný projektový plán od počiatku do konca. Využíva zrozumiteľný a dobre štruktúrovaný prístup, jednoduché monitorovanie pokroku a identifikáciu potenciálnych rizík. Obsahuje detailnú dokumentáciu svojich výsledkov a procesov. Je vhodný pre projekty, kde sa pravdepodobne nevyskytnú výrazné zmeny počas priebehu projektu. (MSG LIFE, 2023; FBE, 2025)

Podľa MSG LIFE (2023) a Všetechku (2015), sa tradičné (waterfall) riadenie projektov skladá z piatich fáz, ktoré tvoria cyklus riadenia projektu (Obr. 6.1):

1. Spustenie projektu (Initiation): Definujú sa základné ciele projektu, účel projektu a realizujú sa vstupné analýzy.
2. Plánovanie projektu (Planning and Design): Vytvára sa Plán projektu. Na konci tejto procesnej skupiny by mali byť známe časová a finančná náročnosť projektu.
3. Realizácia/uskutočňovanie projektu (Execution): Počas tejto fázy tímoví členovia vykonávajú úlohy definované v pláne, s cieľom dosiahnuť stanovené ciele projektu v stanovenom termíne.
4. Kontrola projektu (Monitoring and Controlling): Celý priebeh projektu je monitorovaný a prípadne upravovaný, aby bol dosiahnutý plánovaný výsledok.
5. Ukončenie projektu (Completion): Záverečná fáza projektu, kde sa zhodnocuje výsledok a celý proces vytvorenia projektu. Týmto spôsobom sa identifikujú silné a slabé stránky, čo môže poslúžiť ako skúsenosť pre budúce projekty.



Obr. 6.1. Grafické znázornenie tradičného – waterfall riadenia projektov so zobrazením Cyklu riadenia projektov

Výhody tradičného prístupu riadenia projektov: (Projectmanagement.com, 2022; Samáková a Mesárošová, 2023)

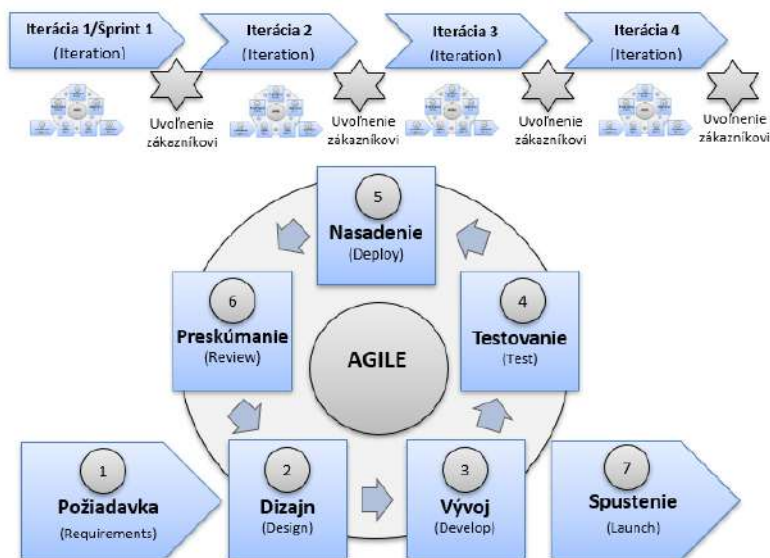
- Priamočiare a jasné plánovanie a navrhovanie vďaka dohodnutým výstupom na začiatku projektu.
- Presne definovaný rozsah prác.
- Jednoduchšie plánovanie nákladov.
- Lepšie sa kontroluje, pretože sú k dispozícii podrobné plány všetkých častí projektu (termíny, náklady, ciele a výstupy).
- Jasne definované tímové roly, ich úlohy a kompetencie.
- Priradené prostriedky môžu pracovať paralelne, pre svoje konkrétne úlohy.
- Zákazník presne vie, čo dostane.

Nevýhody tradičného prístupu riadenia projektov: (Projectmanagement.com, 2022; Samáková a Mesárošová, 2023)

- Projekty neprinášajú prezentovateľné výsledky pre zákazníka pred ukončením projektu a tím sa môže stať, že projekt nesplní očakávania zákazníka;
- Nie je ideálny pre veľké projekty, kde konečný výsledok vidieť až ďaleko v budúcnosti. Testovanie prebieha až na konci projektu (vysoká pravdepodobnosť chýb);
- V prípade potreby skrátenia projektu či redukcie rozsahu nie je jasné, ktoré úlohy možno vynechať – neexistuje prioritizácia úloh;
- Ak sa potreby klienta zmenia v priebehu projektu, nie je možno na ne okamžite reagovať;
- Skoré detailné plánovanie požiadaviek môže neskôr spôsobiť vývoj produktu, ktorý v konečnom dôsledku nie je potrebný alebo je zložitý.

6.2 Agilné riadenie projektov

Tradičné prístupy k projektovému riadeniu sú v súčasnosti podrobované značnej kritike a sú nahrádzané novými prístupmi, ktorých snahou je zvýšiť na jednej strane kvalitu výstupu a na druhej aj proces samotnej realizácie projektu (Sochna, 2025). Termín „agilný“ čiže agile je chápaný mnohými odlišnými spôsobmi. Môžeme sa na neho pozerieť ako na súbor správania, konceptov a techník, ktoré sú charakteristické ako agilné spôsoby práce (POTIFOB, 2025). Agilné riadenie je postavené na inkrementálnom modeli (Obr. 6.2). Projektový tím je počas celého trvania projektu v úzkom kontakte so zákazníkom a fungujúci výstup projektu je dôležitejší ako obsahla dokumentácia. V prípade potreby zmien je tento podnet dôležitejší ako už naplánovaná akcia. Kolaborácia tímu a bohaté interakcie sú hnacou dôležitou silou celého modelu. (Sabol, Babič a Matej, 2012; Wong, 2007; Obuch a Samáková 2024)



Obr. 6.2. Agilné riadenie projektov

Počas posledných rokov sa na základe prieskumov (napríklad CHAOS report), úspešnosť tradične riadených projektov nijako nezvyšuje. (Sochna, 2025) V Tabuľke 6.1 sú zobrazené výsledky úspešných a neúspešných agilne a tradične riadených projektov od roku 2016. Výsledky z rokov 2022 až 2024 spoločnosť Standish Group ešte nezverejnila. (Standish Group, 2015; Standish Group, 2021; Mersino, 2020; Vitality, 2020; Samáková a Mesárošová, 2023) Na porovnanie úspechu a neúspechu projektu bolo použité trojité obmedzenie, ktoré sa používa v projektovom riadení niekoľko rokov:

- Úspešný projekt (successful project) – je projekt, ktorý spĺňa všetky tri obmedzenia, kde patrí: harmonogram (čas), náklady a rozsah.
- Napadnutý projekt (challenged project) – je projekt, ktorý spĺňa dve z troch obmedzení, napr. dodaný v správnom čase, so stanoveným rozpočtom, ale nie v požadovanom rozsahu.
- Neúspešný projekt (failed project) – je projekt, ktorý je zrušený pred dokončením, alebo projekt, ktorý bol dokončený, ale nie je použiteľný.

Tabuľka 6.1. Súhrnné údaje Agile a Waterfall riadených projektov (Standish Group, 2015; Standish Group, 2021; Mersino, 2020; Vitality, 2020; Samáková a Mesárošová, 2023)

	Agile (A) Waterfall (W)	Úspešný projekt (Successful) (%)	Napadnutý projekt (Challenged) (%)	Neúspešný projekt (Failed) (%)
2016	A	39	52	9
(2011 až 2015)	W	11	60	29
2018	A	42	50	8
(2013 až 2017)	W	26	53	21
2021	A	42	47	11
(2016 až 2020)	W	13	59	28

Výhody agilného prístupu riadenia projektov: (Projectmanagement.com, 2022; Samáková a Mesárošová, 2023)

- Rýchlejší životný cyklus, rýchlejší čas (Time to Market (30 až 40) %).
- Predvídateľný rozsah (plán) v šprintoch. Chyby sa odhalia včas vďaka pravidelným šprintom (rýchlym poradám).
- Prístup zameraný na zákazníka, čo vedie k zvýšenej spokojnosti zákazníka;
- Flexibilita v prijímaní zmien. Projekt sa aktualizuje v jeho priebehu a do všetkých fáz je zapojený aj klient.
- Projektový tím má možnosť kreatívne riešiť vzniknuté problémy. Umožňuje tímom riadiť projekty a podporuje efektívnu komunikáciu.
- Úspora (30 až 70) % a redukcia chýb a nedostatkov.
- Ideálne pre projekty s nefixným financovaním, väčšia transparentnosť.

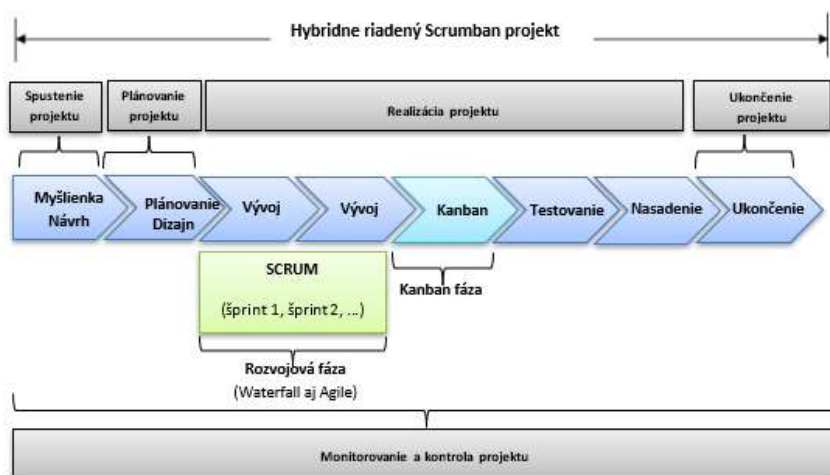
Nevýhody agilného prístupu riadenia projektov: (Projectmanagement.com, 2022; Samáková a Mesárošová, 2023)

- Vyžaduje vysoký stupeň angažovanosti zákazníkov, čo nie všetkým zákazníkom vždy vyhovuje.

- Je potrebná veľmi dobrá komunikácia v rámci tímu. Tím je poskladaný zo špecifických ľudí, ktorých je v prípade potreby ťažké zastúpiť.
- Časový rámec nemusí stačiť na to, aby sa poskytli všetky výsledky/výstupy, čo si môže vyžadovať ďalšie šprinty a tým zvýšenie nákladov.
- Agile odporúča spoločné umiestnenie pre efektívnu komunikáciu, čo nie je vždy možné.
- Nehodí sa pre veľké projekty s niekoľkými tímami naraz.

6.3 Hybridné riadenie projektov

Digitálna transformácia a jej vplyv na riadenie projektov sa stávajú dôležitými témami v súčasnom podnikateľskom prostredí. Otázkou však je, či tradičné metódy riadenia projektov dokážu zabezpečiť udržateľnosť v tomto dynamickom prostredí. Na riešenie tejto výzvy sa často používa hybridný prístup (Leong a kol., 2023). Hybridné prístupy využívané pri riadení projektov umožňujú kombinovať výhody tradičných a agilných prístupov, čo ich robí účinnými pri správe portfólia nových produktov alebo pri implementácii otvorených inovácií (Zasa, Patrucco a Pellizzoni, 2020). Hybridné riadenie projektov (Obr. 6.3) umožňuje dosiahnuť lepšie výsledky projektov prostredníctvom efektívnejšieho využitia zdrojov, zvýšenia rýchlosti dodávok a zlepšenia spokojnosti zainteresovaných strán. Integrácia agilného rámca do projektov môže výrazne zlepšiť ich vývojový proces. Tento krok prinesie menej chýb, rýchlejšie uvedenie produktov na trh, efektívnejšiu komunikáciu so zainteresovanými stranami a tímovú komunikáciu. Okrem toho povedie k vyššej kvalite a podrobnejšej analýze rizík. Tradičné riadenie projektov síce má svoje výhody, ale v niektorých oblastiach zaostáva za agilným prístupom, ktorý prináša riešenie pre kľúčové výzvy v riadení projektov, ako sú neurčitý časový rámec, nedostatok informácií o požiadavkách a nezhody s obchodnými cieľmi. Použitie agilného rámca môže zvýšiť úspešnosť, kvalitu práce a produktivitu projektu. Na dosiahnutie maximálneho účinku je dôležité zohľadniť aspekty ako ľudia, procesy a organizácia v rámci hybridného prístupu v riadení projektov. Týmto spôsobom vzniká nový a komplexný prístup k riadeniu projektov (Leong a kol., 2023).



Obr. 6.3. Hybridné riadenie projektov (Dash, 2022)

Výhody hybridného prístupu riadenia projektov: (Microsoft, 2019)

- Plánovanie vychádza z vodopádového riadenia, čo umožňuje tímom získať hodnotné informácie o požiadavkách projektu a poskytnúť presnejšie odhady času a nákladov.
- Práca je uskutočňovaná v malých, opakujúcich sa segmentoch, čo umožňuje jednoduché prispôbienie sa meniacim sa potrebám a požiadavkám.
- Hybridné riadenie podporuje spoluprácu tímov a zainteresovaných strán.
- Umožňuje stanoviť pevné lehoty a rozpočty.

Nevýhody hybridného prístupu riadenia projektov: (Microsoft, 2019)

- Pre tých, ktorí preferujú pružnejší agilný prístup, sa vodopádové riadenie môže javiť príliš obmedzujúce.
- Efektívnosť hybridne riadených projektov závisí od rozhodnutia tímov spolupracovať.
- Implementácia vyžaduje schopného projektového manažéra, ktorý vie vymedziť a priradiť úlohy do šprintov.
- Príliš veľký počet zainteresovaných strán a časté zmeny počas procesu môžu viesť k prekročeniu rozpočtu a zmeškaným termínom.

6.4 Agilné rámce využívané pri riadení projektov

V súčasnosti sa organizácie neustále snažia nájsť spôsoby, ako udržať krok s rýchlymi zmenami v technológiách a dynamicky sa meniacimi trhmi. Keďže kľúčovým faktorom je rýchlosť, vývojové tímy musia byť oveľa agilnejšie a flexibilnejšie ako kedykoľvek predtým. Agilný prístup nie je len metodikou, ale súborom techník, ktoré vynikajú agilným spôsobom vykonávania činností (Silberg, 2020). Agilný prístup k riadeniu projektov umožňuje podnikom rýchlo reagovať na meniace sa požiadavky zákazníkov a zabezpečuje, aby sa výsledné riešenie čo najviac priblížilo k ich požiadavkám. Tento prístup tiež umožňuje zlepšovať a prispôbovať procesy a riešenia v reálnom čase, čo vedie k efektívnejšiemu a pružnejšiemu projektovému riadeniu. (Thesing, Feldmann a Burchard, 2021)

Aj keď agilný prístup nie je vhodný pre každý typ projektu, agilita sa adaptuje aj v organizáciách mimo oblasti informačných technológií. Úspešné využitie agilného prístupu závisí od viacerých faktorov, ako sú jasné ciele zákazníka, skúsenosť manažéra projektu a tímu, schopnosť pracovať pod tlakom a dôraz na skúsenosť koncového užívateľa. Väčšia flexibilita a menej formálnych procesov, charakteristických pre agilný prístup, nemusia byť vždy vhodné v tradičných organizáciách s pevnými procesmi, politikami a tímami. Rovnako tak agilita nemusí optimálne fungovať v prípade, ak si zákazník nie je istý svojimi cieľmi, alebo ak projektový manažér a tím nie sú zvyknutí na prácu pod tlakom. (Silberg, 2020)

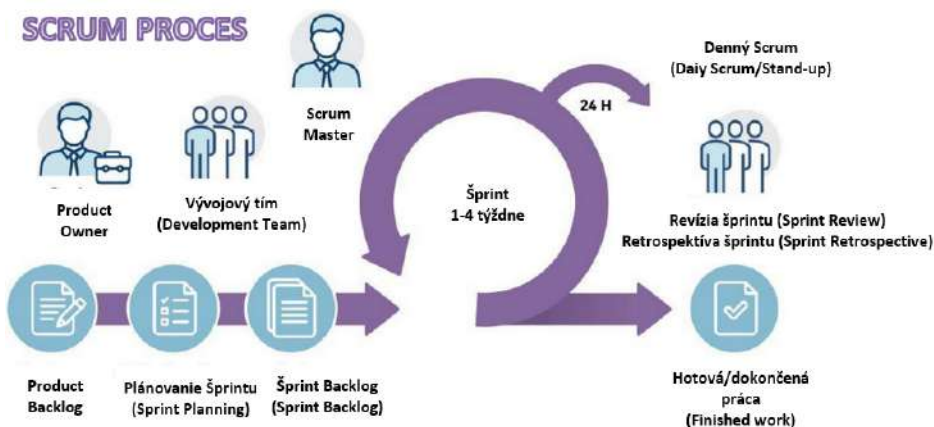
Neexistuje unifikovaná „agilná metodika“. Medzi najpoužívanejšie a najznámejšie rámce považované za agilné patria Scrum, Kanban, Scrumban, Lean, LeanStartup, XP (eXtreme Programming), SAFe (Scaled Agile Framework), DSDM (Dynamic Systems Development Method)/AgilePM, DevOps, FDD (feature-driven development), Crystal, ASD (Adaptive Software Development), DAD (Disciplined Agile Delivery). (POTIFOB, 2025)

6.4.1 SCRUM

Scrum (Obr. 6.4) je jeden z najpopulárnejších agilných rámcov a poskytuje súbor princípov, ktoré umožňujú tímom: (Kačengová, 2021)

- dodávať funkčné produkty v krátkych cykloch,
- zabezpečovať rýchlu spätnú väzbu,
- umožňovať neustále zlepšovanie,
- facilitovať rýchlu adaptáciu na vonkajšie vplyvy a zmeny.

Agilný rámec je založený na princípoch uvedených v Agile manifeste, ktorý kladie dôraz na štyri hlavné hodnoty: jednotlivci a interakcie pred procesmi a nástrojmi, funkčný softvér pred komplexnou dokumentáciou, spolupráca so zákazníkom pred vyjednávaním o zmluve a reagovanie na zmeny pred dodaním pôvodného produktu. Tieto hodnoty podporujú flexibilitu, spoluprácu a neustále zlepšovanie, čím umožňujú tímom reagovať na nové výzvy a príležitosti efektívnejšie. (Kuchárik, 2025) Agilný rámec SCRUM je detailne charakterizovaný v podkap. 6.5.



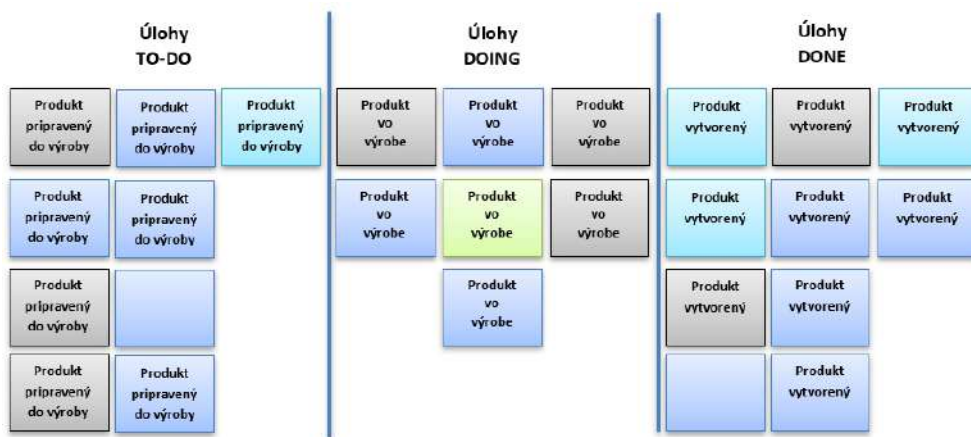
Obr. 6.4. SCRUM proces (Kuchárik, 2025)

6.4.2 Kanban

Kanban je agilná metóda, ktorá je zameraná na zlepšovanie procesov na základe lean hodnôt a lean myslenia. Obsahuje súbor princípov a postupov, ako efektívne riadiť pracovný tok a skrátiť čas realizácie nápadov alebo funkcií od začiatku až po dodanie zákazníkovi. Realizuje sa pomocou vizuálnych techník, ako sú karty alebo lepiace papieriky, obmedzenia rozpracovanej výroby (WIP) a vizualizácie toku výroby (Petrova, 2023; Obuch a Samáková 2024).

V praxi sa metóda Kanban organizuje na tabuli (Obr. 6.5) alebo stole, ktorý je rozdelený do stĺpcov, zobrazujúcich každý tok v rámci projektu alebo vývoja produktu. (Santo, 2022) Kanban tabuľa (Kanban board) je nástrojom lean projektového riadenia, ktorý poskytuje vizuálny prehľad úloh v rámci životného cyklu projektu od jeho začiatku až do momentu ukončenia. Nástroj umožňuje efektívne riadenie úloh v rámci tímu tým, že poskytuje

aktuálne informácie o vytážení členov tímu a zobrazuje úlohy, na riešenie ktorých je potrebných najviac zdrojov. (Forbes Media LLC, 2023; Riečičiar a Samáková, 2023)



Obr. 6.5. Kanban tabuľa (Gablas, 2025)

6.4.3 Scrumban

Scrumban je flexibilná, agilná metodika riadenia procesov, ktorá kombinuje prvky Scrumu a Kanbanu, pričom odstraňuje niektoré obmedzenia Scram a využíva Kanban na vizuálne riadenie toku práce a zvyšovanie efektívnosti procesov. (Kniberg a Skarin, 2010)

6.5 Agilný rámec SCRUM

Scrum je postavený na princípe empirického riadenia procesov, čo znamená, že rozhodnutia sú odvodené zo skúseností a znalostí. Jeho iteratívny a prírastkový prístup slúži na optimalizáciu predvídateľnosti a riadenie rizík. Medzi tri piliere podporujúce implementáciu tohto empirického procesu patrí: (Schwaber a Sutherland, 2020; Obuch a Samáková 2024)

- **Transparentnosť** – všetky významné aspekty procesu musia byť jasne viditeľné pre všetkých, ktorí sú zodpovední za výsledok.
- **Kontrola** – dôležité je sledovať pokrok smerom k cieľu a odhaliť nežiaduce odchýlky.
- **Adaptácia** – ak kontrola odhalí odchýlky, ktoré by mohli viesť k neprijateľnému výsledku, proces alebo materiál sa musí okamžite upraviť.

V rámci prípadovej štúdie sú agilné pojmy uvádzané v slovenskom a súčasne aj v anglickom jazyku, keďže v praxi sa primárne využíva ich anglický ekvivalent. Niektoré názvy však nemožno adekvátne preložiť do slovenského jazyka, a preto sú v článku uvádzané výlučne v anglickom jazyku.

6.5.1 SCRUM tím

Scrum tím je tím pozostávajúci z Vlastníka produktu (Product Owner), Scrum Mastra a Vývojového tímu (Development Team). Hlavnou úlohou Scrum tímu je dosiahnuť Cieľ produktu (Product Goal) vytváraním hodnotných Prírastkov (Increments) v každom Šprinte

(Sprint). Scrum tím je interdisciplinárna skupina profesionálov riadená zvnútra. Kompetencie členov tímu sa navzájom dopĺňajú a posilňujú, prostredníctvom vzájomnej pomoci, častej spätnej väzby a záväzku. (Becker, 2025)

Scrum Master je podľa príručky Scrum definovaný takto: „*Scrum Master je zodpovedný za propagáciu a podporu používania Scrumu. Robí to tak, že pomáha každému porozumieť teórii Scrumu, jeho aktivitám, pravidlám a hodnotám.*“ Scrum Master vedie a učí ľudí o tom, ktoré ich konanie je prospešné a ktoré by mali zmeniť, aby maximalizovali hodnotu, ktorú Scrum tím dodáva. Scrum Master taktiež vedie tím k tomu, aby dodržiaval časové limity pre jednotlivé udalosti a mítingy. (Kačengová, 2021)

Vlastník produktu (Product Owner) zastupuje záujmy stakeholderov (obvykle zákazníkov) a snaží sa porozumieť ich potrebným požiadavkám. Primárnou zodpovednosťou Product Ownera je komunikovať so zákazníkom a následne nastaviť priority pre prácu tímu – prioritizovať poradie položiek. (Becker, 2025) Produkt Owner definuje očakávania od produktu, zaznamenáva zmeny v produkte a spravuje Produkt Backlog, ktorý je podrobným a neustále aktualizovaným zoznamom úloh pre Scrum projekt. (Vardy, 2016)

Vývojový tím (Development Team) sú všetci členovia tímu, ktorí nie sú Product Owners alebo Scrum Masters. Vývojový tím tvoria ľudia s rôznymi zručnosťami a zodpovednosťami, ktorí sú zodpovední za plánovanie svojich úloh, t. j. vytváranie Plánu šprintu (Sprint Planning) obsiahnutého v Šprint Backlogu (Sprint Backlog) a tiež za dennú prácu na vývoji produktu, aby v každom šprinte vyprodukovali užitočný prírastok podľa Definície hotovo (Definition of Done). (Becker, 2025)

6.5.2 SCRUM artefakty

Scrum artefakty sú Product Backlog, Šprint Backlog a Prírastok (Increment). SCRUM artefakty poskytujú všetkým zainteresovaným stranám prístup k informáciám o stave produktu. Obsah Product Backlogu je krok za krokom popis, ako dosiahnuť Cieľ produktu (Product Goal). Obsah Šprint Backlogu je popis úloh vedúcich k dosiahnutiu Cieľa v šprinte (Sprint Goal). Prírastok (Increment) je súčet čiastočných funkčností produktu, realizovaných v danom šprinte, pridaných k aktuálnemu stavu produktu. (Becker, 2025)

1. Product Backlog s Cieľom produktu (Product Goal)

Product Backlog (Obr. 6.6) je živý dokument, ktorý obsahuje zoznam požiadaviek zákazníka, ktorý spravuje Vlastník produktu (Product Owner) a na ktorých plánuje Scrum tím pracovať pri vytváraní produktu. (Karapetyan, 2023; Obuch a Samáková 2024) Ide o postupne vytváraný a zorganizovaný zoznam položiek, ktoré sú potrebné na zlepšenie produktu. Položky v Product Backlog majú všetky rovnakú hodnotu, čím umožňujú Scrum tímu uvažovať o alternatívach a rôznych prístupoch k dosiahnutiu spoločného cieľa. Položky Product Backlog, ktoré môže Scrum tím dokončiť počas jedného šprintu, sa považujú za pripravené na výber v udalosti Plánovania šprintu (Sprint Planning). Spresňovanie Product Backlogu zahŕňa rozdelenie a ďalšie definovanie položiek na menšie a presnejšie položky. Táto aktivita prebieha neustále a zahŕňa pridávanie podrobností, ako je popis, objednávka a veľkosť. Atribúty sa často líšia v závislosti od oblasti práce. (Schwaber a Sutherland, 2020; Puk a Samáková, 2023)

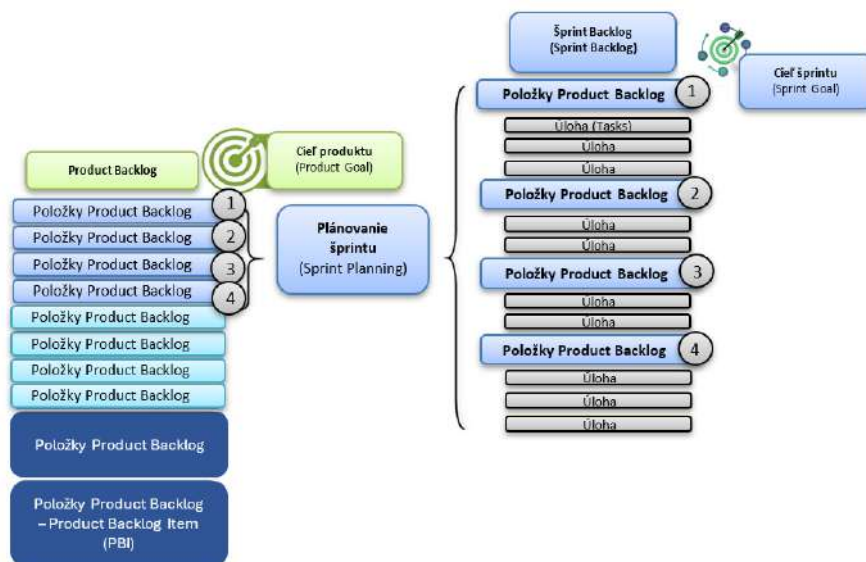
Cieľ produktu (Product Goal) je dlhodobý záväzok popisujúci budúci stav, vzhľadom na ktorý Scrum tím plánuje. (Cole a Scotcher, 2015; Červeňanská a Samáková, 2023)

V Produkt Backlogu sa nachádzajú **Položky Product Backlog (Product Backlog Items – PBI's)**, ktoré sa často označujú aj ako **Užívateľský príbeh (User story)**. (Vardy, 2016; Červeňanská a Samáková, 2023) Užívateľský príbeh popisuje čiastočnú funkčnosť produktu z pohľadu zákazníka. Má formu „Ako [typ používateľa], chcem [čo robiť?] pretože [prečo?]“. Rýchlosť šprintu (Team Velocity) je ukazovateľ, ktorý slúži na určenie, koľko z Product Backlog sa stalo incrementálnym počas jedného šprintu. (Becker, 2025).

2. Šprint Backlog (Sprint Backlog) s Cieľom šprintu (Sprint Goal)

Šprint Backlog (Obr. 6.6) vychádza z Product Backlog. Je to zoznam práce, ktorú plánuje vykonať Scrum tím v priebehu šprintu. Skladá sa z Cieľov šprintu (Sprint Goals), zoznamu položiek Produktového Backlogu vybraných pre šprint a akčného plánu na dodanie prírastku. Šprint Backlog slúži na vizualizácia práce v reálnom čase, ktorú má Scrum tím vykonať počas šprintu na dosiahnutie Cieľa šprintu (Sprint Goal). Počas šprintu sa Šprint Backlog pravidelne aktualizuje na základe nových poznatkov a môže sa meniť v závislosti od potrieb tímu. (Schwaber a Sutherland, 2020; Puk a Samáková, 2023)

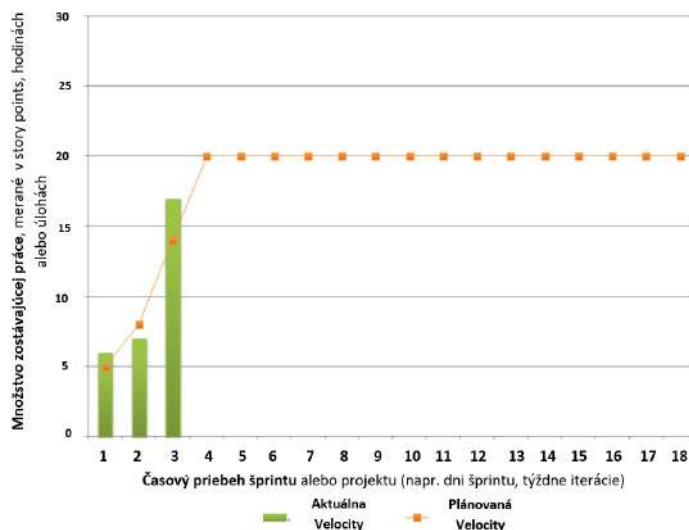
Šprint Backlog má za záväzok splniť **Cieľ šprintu (Sprint Goal)**, ktorý je vytvorený počas Plánovania šprintu (Sprint Planning) a je to jediný cieľ, smerom ku ktorému tím v rámci daného šprintu postupuje a na pravidelnej báze ho aktualizuje. (Schwaber a Sutherland, 2020)



Obr. 6.6. Product Backlog a Šprint Backlog (Bajić, 2021)

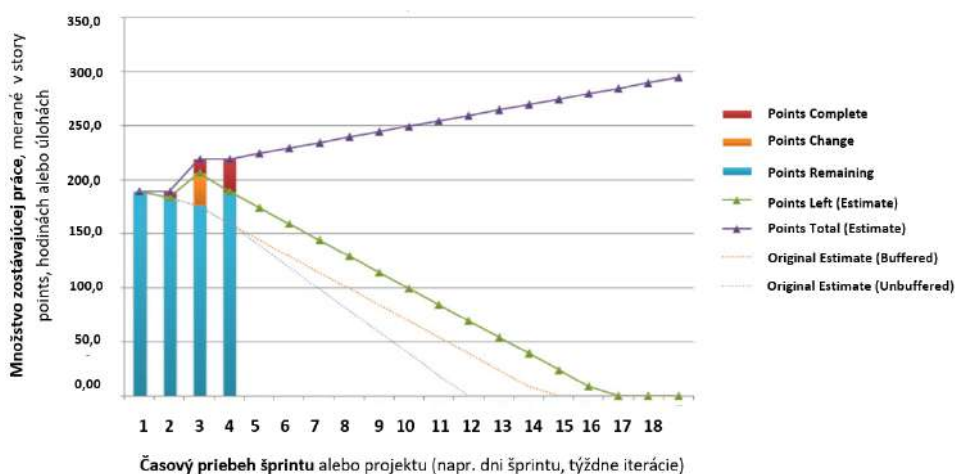
V mnohých prípadoch si tímy spolu so Šprint Backlog vedú aj **Burndown graf (Burndown chart)**, kde je znázornená ubúdajúca práca na projekte. (Cole a Scotcher, 2015; Červeňanská a Samáková, 2023) Burndown graf ukazuje množstvo práce naplánovanej v šprinte alebo Product Backlogu, v súvislosti s časom zostávajúcim na jej dokončenie. Burndown graf je výborným pomocníkom pri vizualizácii výsledkov a predstavuje dva grafy. Jedným z nich je tzv. **Project Velocity Plan** (Obr. 6.7) teda plán, ako rýchlo bude tím postupovať. Zvyčajne sa berie do úvahy, že na začiatku sa tím učí a potom už pracuje

konštantnou rýchlosťou. (Šochová, 2018) **Plánovaná Velocity (Planned Velocity)** je očakávaná rýchlosť tímu, založená na historických údajoch alebo odhade kapacity tímu. Predstavuje počet Story points alebo úloh, ktoré tím plánuje dokončiť v danom šprinte alebo iterácii. **Aktuálna rýchlosť (Actual Velocity)** je skutočný počet Story points alebo úloh, ktoré tím dokončil na konci šprintu. Táto hodnota môže byť rovnaká, nižšia alebo vyššia ako plánovaná rýchlosť v závislosti od výkonu tímu a nepredvídaných okolností. (Šochová, 2018) Planned Velocity je teda odhad pred začiatkom šprintu a Actual Velocity je reálny výsledok po ukončení šprintu.



Obr. 6.7. Project Velocity Plan (Šochová, 2018)

Druhým grafom je **Project Burndown Graf** (Obr. 6.8), ktorý kombinuje aktuálny stav s odhadom a vizualizuje predpokladaný koniec projektu. (Šochová, 2018)



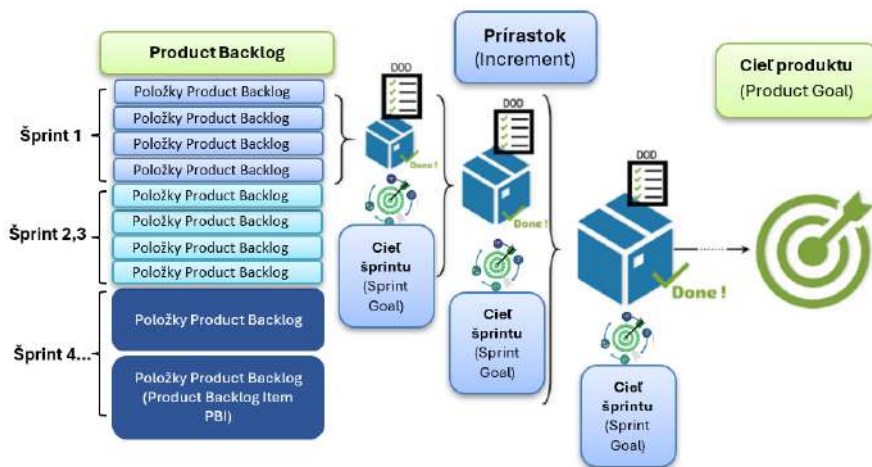
Obr. 6.8. Project Burndown Graf (Šochová, 2018)

Význam pojmov uvedených v Project Burndown Graf:

- **Points Complete** – Počet Story points, ktoré tím úspešne dokončil v danom časovom úseku (napr. v šprinte).
- **Points Change** – Zmena v počte Story points počas šprintu, napr. keď sa pridajú nové úlohy alebo sa odstránia tie, ktoré už nie sú potrebné.
- **Points Remaining** – Počet Story points, ktoré ešte zostáva dokončiť v rámci šprintu alebo iterácie.
- **Points Left (Estimate)** – Odhadovaný počet Story points, ktoré ešte zostávajú na dokončenie, založený na aktuálnom tempe práce tímu.
- **Points Total (Estimate)** – Celkový odhadovaný počet Story points pre celý šprint alebo projekt. Tento údaj môže zahŕňať aj pridané alebo odstránené body počas šprintu.
- **Original Estimate (Buffered)** – Pôvodný odhad práce vrátane dodatočnej rezervy (bufferu) na neočakávané problémy alebo zdržania. Používa sa na konzervatívnejšie plánovanie.
- **Original Estimate (Unbuffered)** – Pôvodný odhad práce bez akéhokoľvek bufferu – čistý odhad založený na historických údajoch alebo expertnom posúdení.

3. Prírastok (Increment) s Definíciou hotovo (Definition of Done)

Je súčet čiastočných funkčností produktu realizovaných v danom šprinte, pridaných k aktuálnemu stavu produktu. Prírastok (Obr. 6.9) je definovaný ako suma všetkých predmetov v Backlogu, ktoré boli zatiaľ pre projekt dokončené. Na konci každého šprintu musí byť odovzdaný nejaký prírastok, ktorý je pevne stanovený záväzkom – **Definícia hotovo (Definition of Done – DOD)**. (Becker, 2025)



Obr. 6.9. Prírastok (Increment) a DOD (Bajič, 2021)

Definícia hotovo je umiestnená v **Product Backlog** a dáva jasný a transparentný popis očakávaného stavu produktu po dokončení Prírastku. Pridá sa k všetkým predošlým odovzdaným prírastkom a náležite sa verifikuje, či je s nimi kompatibilný. Aby mal prírastok hodnotu, musí spĺňať požadované parametre kvality, štandardy organizácie a byť

použiteľný. Súhrn prírastkov je prezentovaných počas revízie šprintu. (Cole a Scotcher, 2015; Červeňanská a Samáková, 2023)

6.5.3 SCRUM udalosti/SCRUM ceremónie

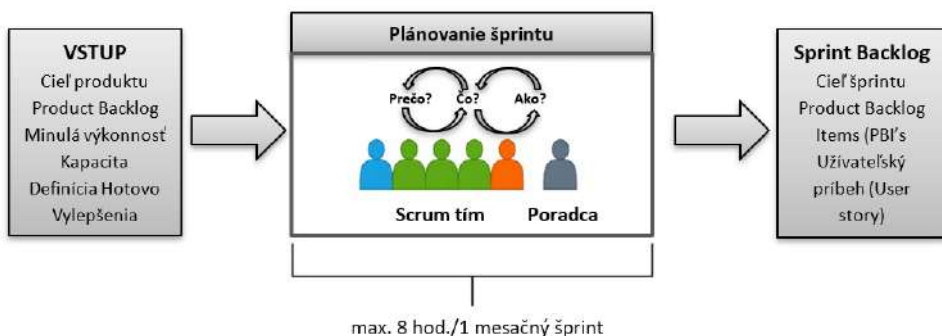
SCRUM udalosti slúžia na podporu tímovej spolupráce a zabezpečujú neustálu komunikáciu medzi členmi Scrum tímu počas životného cyklu. Scrum udalosti, neoficiálne nazývané Scrum ceremónie, sú: Plánovanie šprintu – plánovanie nového šprintu v jeho prvý deň; Denný Scrum – denné organizačné stretnutie vývojového tímu; Prehľad šprintu – otvorené stretnutie na zhrnutie šprintu a prezentáciu nových funkcií produktu; Retrospektíva šprintu – interné stretnutie Scrum tímu na zhrnutie spolupráce počas dokončeného šprintu. Každá z týchto udalostí má veľmi špecifickú úlohu v Scrum. (Becker, 2025)

Šprinty určujú pracovný cyklus Scrum tímu, preto má každý šprint rovnakú dĺžku. Nasledujú jeden po druhom a trvajú od prvého dňa práce na produkte až po posledný. (Becker, 2025) Šprinty slúžia na premenu nápadov na hodnoty. Sú to časovo obmedzené udalosti, ktoré trvajú obvykle jeden mesiac alebo menej, počas ktorého sa vytvorí hotový a použiteľný prírastok produktu (Increment). Nový šprint sa začína okamžite po skončení predchádzajúceho šprintu. (Westland, 2022; Schwaber a Sutherland, 2020; Obuch a Samáková 2024). Ak je trvanie šprintu príliš dlhé, Cieľ šprintu (Sprint Goal) sa môže stať neplatným a môže nastať zvýšená komplexnosť alebo riziko. Krátke šprinty umožňujú opakovaný cyklus učenia a obmedzenie rizika nákladov a úsilia na krátky časový úsek. Každý šprint môže byť vnímaný ako krátkodobý projekt. (Schwaber a Sutherland, 2020; Obuch a Samáková 2024)

1. Plánovanie šprintu (*Sprint Planning*)

Tím začne Plánovať šprint (Sprint Planning) (Obr. 6.10) pomocou Produktového Backlogu, začínajúc s položkami s najvyššou prioritou. Tím určí, ako dosiahnuť stanovené ciele, pričom je vhodné začať s pripravenými položkami. Plánovanie by malo byť krátke a tím by mal udržiavať spoluprácu. (Westland, 2022; Obuch a Samáková 2024) Plánovanie šprintu (Sprint Planning) sa zaoberá nasledujúcimi témami:

- a) **Aký je dôvod a význam tohto šprintu?** Celý Scrum tím sa podieľa na identifikovaní Cieľa šprintu (Sprint Goal) ktorý vysvetľuje zainteresovaným stranám, akú hodnotu prinesie konkrétny šprint. Cieľ šprintu (Sprint Goal) musí byť vypracovaný pred ukončením Plánovania šprintu (Sprint Planning).
- b) **Čo je možno dokončiť v rámci tohto šprintu?** Na základe diskusie s Product Ownerom si členovia vývojového tímu vyberú položky z Product Backlogu, ktoré budú realizované počas tohto šprintu. Scrum tím môže upresňovať vybrané položky, aby lepšie porozumel ich povahe. Stanovenie množstva práce, ktorú možno dokončiť počas šprintu, môže byť náročné. Avšak čím viac členovia vývojového tímu poznajú svoje predchádzajúce výkony, plánovanú kapacitu a Definíciu hotovo (DOD), tým presnejšie môžu predpovedať priebeh šprintu.
- c) **Ako sa bude vykonávať vybraná práca?** Pre každú vybranú položku z Product Backlogu plánuje Vývojový tím (Development) prácu, potrebnú na vytvorenie Prírastku (Increment), ktorý splní Definíciu hotovo (DOD). Často sa to dosahuje rozdelením položiek Product Backlogu na menšie pracovné úlohy s trvaním jedného dňa alebo kratším. Prístup k tomu je plne v kompetencii Developerov. (Schwaber a Sutherland, 2020; Obuch a Samáková 2024)



Obr. 6.10. Plánovanie šprintu (Kaczor, 2024)

2. Denný Scrum (Daily Scrum/Stand-up)

Denný Scrum (Daily Scrum) sa uskutočňuje každý deň. Ide o krátke 15-minútové stretnutie, kde každý člen tímu odpovedá na nasledujúce otázky: definuje úlohy, na ktorých pracoval včera, na ktorých pracuje dnes a zdieľa prekážky a ťažkosti. (Westland, 2022; Obuch a Samáková 2024) Denné Srumy posilňujú komunikáciu, identifikujú prekážky, podporujú rýchle rozhodovanie a následne eliminujú potrebu ďalších stretnutí. (Schwaber a Sutherland, 2020; Obuch a Samáková 2024)

3. Revízia šprintu/Prehľad šprintu (Sprint Review)

Keď je šprint ukončený, je potrebné, aby bol produkt preskúmaný. Revízia šprintu (Sprint Review) poskytuje možnosť ohliadnuť sa za šprintom, zhodnotiť, čo fungovalo a čo nie. Informácie sa môžu využiť pri plánovaní budúcich šprintov na zvýšenie efektívnosti. V rámci tohto kroku investori, zákazníci a iné zúčastnené strany diskutujú o dodaných Prírastkoch (Increments) a zdieľajú nápady, čo možno zlepšiť. (Vardy, 2016) V tomto kroku možno aktualizovať Product Backlog, aby reflektoval nové príležitosti. Revízia šprintu (Sprint Review) je pracovná udalosť a Scrum tím by nemal obmedzovať jeho účel len na prezentáciu. (Schwaber a Sutherland, 2020; Obuch a Samáková 2024)

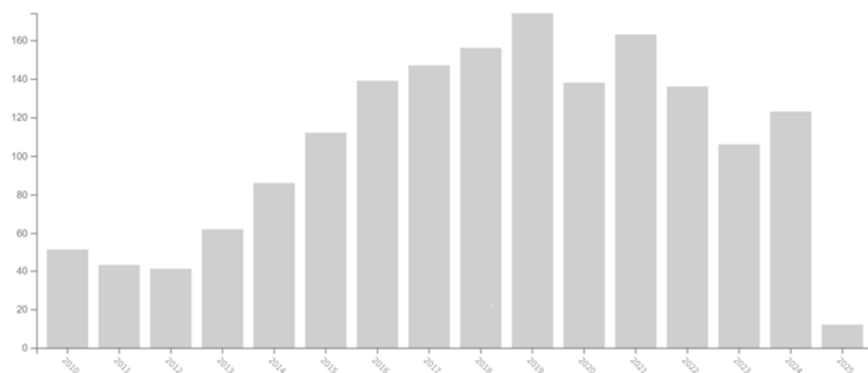
4. Retrospektíva šprintu (Sprint Retrospective)

Po tom, ako tím dostal spätnú väzbu a revíziu od zúčastnených strán, sa opäť stretne, aby zhodnotil uplynulý šprint, identifikoval pozitívne a negatívne zistenia a získal spätnú väzbu od zainteresovaných strán a zákazníkov, s cieľom zlepšiť výkon produktu. (Westland, 2022) Scrum tím identifikuje úpravy, ktoré by výrazne zvýšili jeho efektívnosť. Zlepšenia s najvýraznejším dopadom sa implementujú čo najskôr. Dokonca môžu byť zaradené do Sprint Backlogu pre nasledujúci šprint. (Schwaber a Sutherland, 2020; Obuch a Samáková 2024)

6.6 Literárny prehľad v databáze WOS

V nasledujúcej časti prípadovej štúdie je uvedený prieskum počtu publikácií v citačnej databáze WOS – Web of Science v rokoch 2010 až 2025. Analyzované boli publikácie zamerané na témy „agilné riadenie projektov“ prostredníctvom „agilného rámca SCRUM“. Cieľom zrealizovanej analýzy bolo poukázať na relevantnosť daných oblastí. Obr. 6.11 poukazuje na rastúci trend článkov v jednotlivých databázach. Aj v roku 2025 sa predpokladá rastúci trend, pretože ide o populárne oblasť v rámci riadenia projektov. Agilný

rámec SCRUM je jedným z najrozšírenejších prístupov pri riadení projektov, či už ide o projekty riadené agilným alebo hybridným prístupom v rôznych dynamických odvetviach. Hlavnou výhodou SCRUM je schopnosť efektívne reagovať na zmeny, zlepšiť spoluprácu medzi tímami a zabezpečiť pravidelné dodávanie funkčných výstupov a z tohto dôvodu bude stále častejšie využívaný.



Rok vydania	Počet záznamov	% z 1 689	Rok vydania	Počet záznamov	% z 1 689
2025	12	0,710	2017	127	8,703
2024	123	7,282	2016	139	8,230
2023	106	6,276	2015	112	6,631
2022	136	8,052	2014	86	5,092
2021	163	9,651	2013	62	3,671
2020	138	8,171	2012	41	2,427
2019	174	10,302	2011	43	2,546
2018	156	9,236	2010	51	3,020

Obr. 6.11. Témy: „agilné riadenie projektov a SCRUM rámec pre riadenie projektov“ vo svetovej databáze WOS v rokoch 2010 až 2025

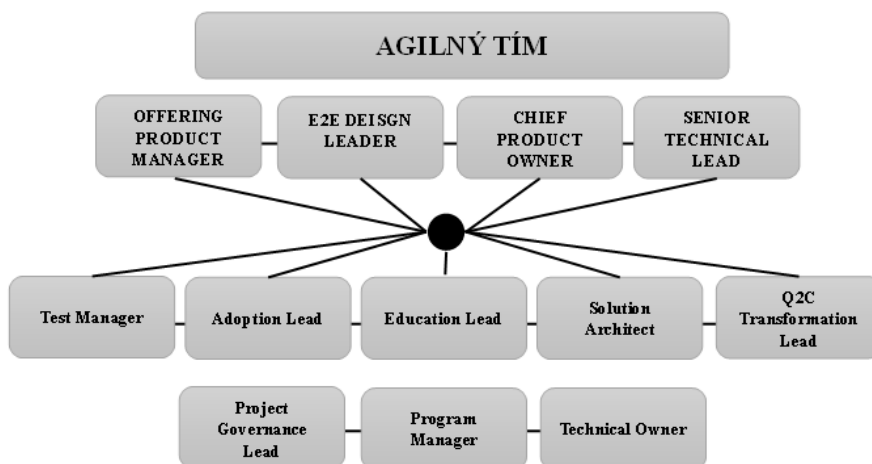
Druhým bodom analýzy bola zrealizovaná bibliometrická analýza, ktorá bola vykonaná pomocou VOSviewer software. (Rubin a Earl, 2009) Uvedená databáza využíva súbory vytvorené taktiež v citačnej databáze WOS. Pre túto analýzu bol z databázy vytvorený súbor údajov zameraný na kľúčové slová, a to „agilné riadenie projektov“ a „SCRUM rámec“ na riadenie projektov. Celkovo bolo vygenerovaných 1689 dokumentov. Dokumenty boli importované do súboru MS Excel a spracované v programe VOSviewer (Obr. 6.12).

v analyzovanej spoločnosti, fungovanie Scrum tímu, proces vytvárania Product Backlogu, popis priebehu jednotlivých šprintov a ostatných nástrojov, využívaných pri riadení agilných projektov.

- **Analýza podnikových dokumentov:** ktoré slúžili na analýzu vnútorných procesov spoločnosti, prostredníctvom interných noriem a w3id – internetovej stránky s neverejnými informáciami o analyzovanej spoločnosti.

6.7.1 Agilný tím

Analyzovaná spoločnosť chápe, že agilné riadenie projektov je prístup k riadeniu, ktorý zdôrazňuje flexibilitu, pružnosť a rýchlu reakciu na zmeny. Jeho cieľom je poskytnúť hodnotu zákazníkovi čo najrýchlejšie a čo najefektívnejšie. Na Obr. 6.13 je zadefinovaná organizačná štruktúra agilného tímu, ktorá sa skladá z hlavných predstaviteľov. Pozície agilného tímu sú uvedené v anglickom jazyku z dôvodu, že sa v rámci podniku nevyužíva ich slovenský ekvivalent.



Obr. 6.13. Organizačná štruktúra agilného tímu (interný zdroj analyzovanej spoločnosti)

Agilný tím v spoločnosti tvoria (interný zdroj analyzovanej spoločnosti):

- **Offering Product Manager** – riadenie a rozvoj portfólia.
- **E2E Design Leader** – vedenie a riadenie celkového dizajnového procesu.
- **Chief Product Owner** – vytváranie a realizácia stratégie produktu.
- **Senior Technical Lead** – poskytovanie technickej odbornosti.

Ďalej do tímu patrí: Test Manager, Adoption Lead, Education Lead, Solution Architect, Q2C Transformation Lead, Project Governance Lead, Program Manager, Technical Owner. Títo členovia zodpovedajú za zostavovanie tímov, ktoré sa budú podieľať na projekte.

Hlavnou úlohou Scrum tímu je rýchlo reagovať na zmeny a prispôbiť sa novým požiadavkám zákazníka, či nečakaným udalostiam. V analyzovanej spoločnosti sa Scrum tím stretáva na pravidelných stretnutiach, ako sú plánovacie schôdzky, denné Scrum meetingy a retrospektívy, kde tím diskutuje o svojom pokroku, vyhodnocuje možné

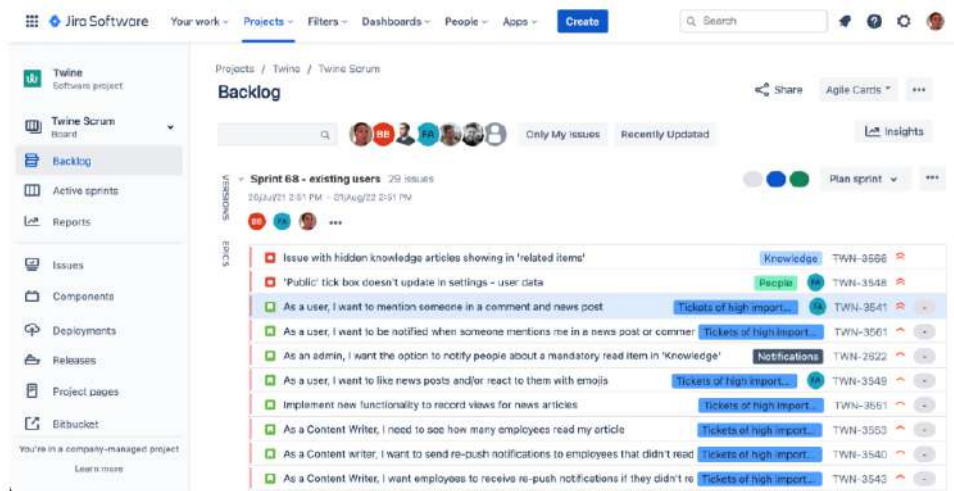
zlepšenia a zhodnocuje svoje úspechy a prekážky. Zároveň Scrum tím zabezpečuje transparentnosť vo svojej práci a neustále sa učí zo svojich skúseností, čím sa snaží zlepšiť svoj výkon a efektívnosť v budúcich iteráciách. V konečnom dôsledku je úloha Scrum tímu významná nielen pre úspech konkrétneho projektu, ale aj pre dlhodobú schopnosť spoločnosti efektívne a flexibilne reagovať na zmeny na trhu a požiadavky zákazníka.

6.7.2 Riadenie projektu prostredníctvom rámca SCRUM

V nasledujúcej podkapitole je opísaný podrobný postup, ako sa v analyzovanej spoločnosti riadia agilné projekty. Spoločnosť v rámci svojich projektov aktívne využíva agilné metódy, najmä agilný rámec SCRUM. Využívanie agilných prístupov podniku umožňuje vytvárať rýchlejšie dodávky hodnoty, iteratívne vývojové cykly a zvýšenú spoluprácu v tíme a so zákazníkom.

1. Začiatok projektu a jeho prípravná fáza

Na začiatku projektu prebieha prípravná fáza, počas ktorej sa zostavujú tímy, ktoré sa budú podieľať na projekte. Tieto tímy zahŕňajú Project Ownera, Developera (osobu zodpovednú za vývojový tím), Scrum Mastera, testera a business analytika. Ďalej sa definuje produkt a identifikujú sa jeho ciele, požiadavky a výsledky. Tento proces vedie k vytvoreniu Produktového Backlogu, ktorý je pre analyzovaný projekt zobrazený na Obr. 6.14 a je spracovaný v softvéri Jira. Produktový Backlog zahŕňa všetky funkcie, úlohy a požiadavky, ktoré sa majú v projekte realizovať. Produktový Backlog slúži ako zoznam prioritných úloh, ktoré musia byť splnené počas vývoja produktu. Tento krok je kľúčovým prvkom v príprave na nasledujúce fázy vývoja a riadenia agilného projektu. Vzhľadom k tomu, že oficiálnym jazykom v podniku je angličtina, vizuálne materiály z konkrétneho projektu nemožno prekladať, a preto sú v prípadovej štúdii prezentované v pôvodnom jazyku projektu.

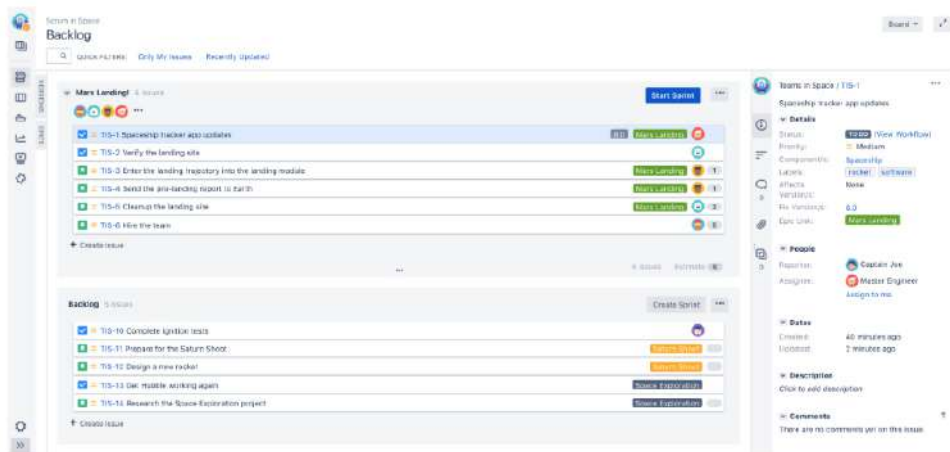


Obr. 6.14. Produktový Backlog (interný zdroj analyzovanej spoločnosti)

2. Nultý šprint

Počas nultého šprintu sa tímy zameriavajú na nastavenie vývojového prostredia, čo zahŕňa aj prípravu Salesforce Development. V tomto štádiu sa vyberajú vhodné technológie a začína

sa s vývojom aplikácie. Paralelne s tým sa vytvára aj Šprint Backlog (Obr. 6.15), ktorý vychádza z Produktového Backlogu.



Obr. 6.15. Šprint Backlog (interný zdroj analyzovanej spoločnosti)

Šprint Backlog definuje úlohy a aktivity, ktoré budú realizované počas konkrétneho šprintu. Je to zoznam úloh, ktoré musia byť splnené počas jednotlivých iterácií vývoja a poskytuje tak súbor cieľov, ktoré tímy musia dosiahnuť v rámci daného časového obdobia. V rámci predkladaného príspevku nemožno zadávať konkrétne úlohy, ktoré sú vytvorené v Product Backlog, pretože ide o veľmi citlivé informácie analyzovaného podniku. Tieto úlohy však zahŕňajú body ako (interný zdroj analyzovanej spoločnosti):

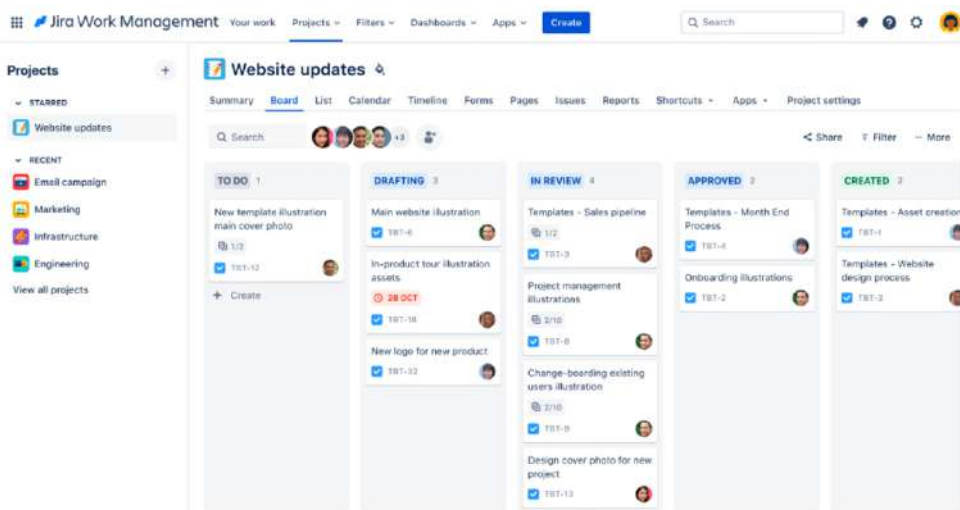
- **Funkčné požiadavky:** úlohy, ktoré opisujú nové funkcie, ktoré majú byť implementované do produktu.
- **Opravy chýb (Bugs):** úlohy na identifikáciu, vyhodnotenie a opravu chýb alebo problémov, ktoré sa vyskytli v existujúcom produkte.
- **Optimalizácia výkonu:** úlohy na zlepšenie výkonu produktu, vrátane rýchlosti, efektívnosti alebo škálovateľnosti.

Týmto spôsobom sa zabezpečuje štruktúrovaný prístup k vývoju produktu a jeho postupnému dosahovaniu požadovanej podoby.

3. Plánovanie šprintu

Každé tri týždne tímy v rámci agilného projektu uskutočňujú Plánovanie šprintu, počas ktorého sa rozhoduje o aktivitách a úlohách, ktoré budú realizované počas nasledujúcich troch týždňov. Tieto úlohy sa vyberajú z Product Backlogu na základe priority, ktorú určuje Product Owner. Na sledovanie pokroku a riadenie úloh používajú tímy softvér Jira (Obr. 6.16), ktorý poskytuje prehľadný pohľad na stav každej úlohy.

Úlohy sa často kategorizujú do rôznych fáz, ako sú „To Do“, „Drafting“, „In Review“, „Approved“, „Created“ a „Done“. Toto rozdelenie umožňuje členom tímu vidieť, ktoré úlohy sú ešte vo fáze plánovania alebo analýzy, ktoré sú v procese implementácie a ktoré už boli dokončené. Tým sa zabezpečuje jasné sledovanie postupu každého šprintu a celého projektu a umožňuje sa ľahká identifikácia a riešenie prípadných problémov alebo blokov.



Obr. 6.16. Šprint Backlog – Plánovanie šprintu (interný zdroj analyzovanej spoločnosti)

4. Denný Scrum (Daily Scrum/Stand-up)

Daily stand up meetings sú krátke stretnutia, ktoré sa konajú každý deň hneď ráno a umožňujú tímu rýchlo prejsť cez pokrok a plány. Na týchto stretnutiach každý člen tímu hovorí o tom, čo už dokončil, čo plánuje dokončiť nasledujúci deň a aké prekážky mu stoja v ceste. Stretnutia prebiehajú buď cez online platformy ako Webex alebo osobne. Obvykle sa v analyzovanom podniku uprednostňujú osobné stretnutia, pretože umožňujú lepšiu interakciu medzi členmi tímu a podporujú otvorenú komunikáciu. Taktiež poskytujú priestor na riešenie viacerých oblastí a efektívnejšie preberanie informácií.

5. Vývoj

Počas fázy vývoja tímy pracujú na úlohách z plánu práce, teda zo Šprint Backlogu. Ich cieľom je zabezpečiť, že na konci každého šprintu bude mať tím dokončený a funkčný prírastok produktu, tzv. increment. Táto fáza zahŕňa aktívne programovanie, dizajn, testovanie a integrovanie nových funkcií a úprav. Tímy spolupracujú na dosiahnutí cieľov stanovených v rámci šprintu a usilujú sa o to, aby ich práca bola v súlade s požiadavkami zákazníka a špecifikáciami projektu. Každý člen tímu prispieva k rozvoju produktu a zabezpečuje, že výstupom z každého šprintu bude funkčná a hodnotná časť produktu.

6. Revízia šprintu/Prehľad šprintu a Retrospektíva šprintu

Po ukončení každého šprintu tím uskutočňuje dvojité posúdenie: Prehľad šprintu a Retrospektíva šprintu. V rámci Prehľadu šprintu tímy predstavia, čo bolo dosiahnuté počas daného šprintu. Prezentujú hotové práce a poskytujú spätnú väzbu ostatným zainteresovaným stranám. Toto posúdenie umožňuje zákazníkovi a iným členom tímu vidieť, aké pokroky sa dosiahli a získať lepšie pochopenie stavu projektu. V rámci druhej fázy – Retrospektíva šprintu, tím reflektuje na spôsob, akým pracoval počas šprintu. Tím zhodnotí, čo išlo dobre, čo sa môže zlepšiť a čo by sa malo zmeniť alebo upraviť pre ďalší šprint. Retrospektíva šprintu je v analyzovanej spoločnosti kľúčovým prvkom agilného prístupu, pretože umožňuje tímu identifikovať a riešiť problémy, zlepšovať procesy a posilňovať efektívnosť práce. Na základe spätných informácií z retrospektívy tím plánuje zmeny a zlepšenia pre ďalší šprint, čím sa zabezpečuje, že každý nový cyklus vývoja je ešte

efektívnejší ako ten predchádzajúci. Scrum Master hrá dôležitú úlohu pri zabezpečovaní, aby boli retrospektívy produktívne a zamerané na hľadanie konkrétnych oblastí na zlepšenie. Podpora retrospektív predstavuje dôležitý prvok v procese kontinuálneho zlepšovania tímu.

7. Uvoľnenie produktu

Po niekoľkých šprintoch, keď je produkt alebo jeho verzia pripravená, nasleduje fáza uvoľnenia. V tejto fáze sa produkt dáva do produkcie alebo sa uvoľňuje zákazníkovi. Počas tejto fázy sa tímy zameriavajú na zabezpečenie, že produkt je plne funkčný a pripravený na použitie. To môže zahŕňať finálne testovanie, ladenie a prípadné opravy chýb. Cieľom tejto fázy je zaistiť hladké a úspešné nasadenie produktu do reálneho prostredia, alebo jeho distribúciu zákazníkovi. Uvoľnenie produktu predstavuje dôležitý míľnik v agilnom projekte, pretože umožňuje zákazníkovi začať využívať a hľadať hodnotu v novom produkte alebo jeho aktualizácii.

8. Hodnotenie projektu a spätná väzba

Hodnotenie projektu s klientom a získavanie spätnej väzby od koncových používateľov sú v analyzovanej spoločnosti kľúčové kroky po uvoľnení produktu. Počas týchto procesov sa posudzuje, ako dobre produkt vyhovuje požiadavkám zákazníka a ako efektívne rieši ich potreby. Tieto kroky zahŕňajú zhodnotenie úspešnosti projektu a analyzovanie spätých informácií s cieľom zistiť, čo sa darilo a čo sa môže zlepšiť v budúcnosti. Zhodnotenie projektu so zákazníkom umožňuje prehodnotiť ciele projektu a zistiť, či boli splnené. Zber spätnej väzby od koncových používateľov poskytuje cenné informácie o tom, ako produkt funguje v reálnom svete a čo možno zlepšiť alebo upraviť v budúcnosti. Tieto kroky sú neoddeliteľnou súčasťou agilného prístupu a pomáhajú zabezpečiť, že projekt má skutočný a trvalý vplyv na zákazníkov a používateľov.

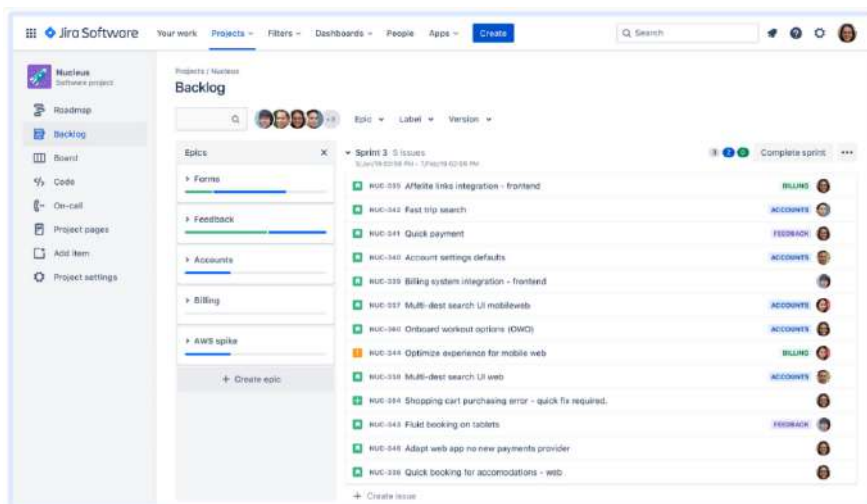
9. Dokumentácia a prepustenie zdrojov

Po dokončení projektu je dôležité zabezpečiť, aby všetka práca na projekte bola poriadne zdokumentovaná. To zahŕňa dokumentáciu všetkých aspektov projektu, vrátane procesov, riešení a rozhodnutí, ktoré boli počas projektu prijaté. Tento krok pomáha zabezpečiť, že získané poznatky a skúsenosti sú zachytené a môžu byť využité v budúcich projektoch. Okrem toho je dôležité zabezpečiť, aby boli všetky zdroje projektu riadne spravované a uvoľnené. Patrí sem napríklad správa licencií, hardvér, softvér a iné materiály, použité počas projektu. Toto zabezpečuje, že sa minimalizuje riziko straty alebo zneužitia zdrojov a že sú zabezpečené potrebné podmienky pre ďalšie použitie alebo spracovanie. Dokumentácia a správa zdrojov sú dôležitými poslednými krokmi v agilnom projekte v analyzovanej spoločnosti a pomáhajú zabezpečiť, že hodnota projektu je zachovaná a že je možno ho efektívne a účinne ukončiť.

6.7.3 Softvérové nástroje využívané pri riadení agilných projektov

Nasledujúca podkapitola prípadovej štúdie opisuje najčastejšie využívané softvérové nástroje, ktoré sú využívané pri riadení agilných projektov v rámci Scrum tímu v analyzovanom podniku.

Jira sa používa na sledovanie Product Backlogu a aktívnych šprintov (Obr. 6.17). Tento nástroj umožňuje sledovať postup úloh a ich aktuálny stav (napr. „To Do“, „In Progress“, „Block“, „Testing“), pričom uvedené informácie sa zdieľajú na každodenných stretnutiach, čo umožňuje všetkým členom tímu mať prehľad o tom, kto pracuje na akej úlohe a koľko z nej má splnené.



Obr. 6.17. *Sprint Backlog Template v softvéri Jira (interný zdroj spoločnosti Jira)*

Confluence slúži na zaznamenávanie projektovej dokumentácie, dizajnových zmien a procesov. Tento nástroj uľahčuje zdieľanie dôležitých informácií a umožňuje členom tímu prístup k dôležitým dokumentom a údajom. Na základe rozhovorov so Scrum Masterom možno konštatovať, že nástroj Confluence zohráva dôležitú úlohu pri zaznamenávaní dokumentov a je súčasťou hlavných nástrojov, ktoré Scrum tím využíva.

Box je v analyzovanej spoločnosti pri riadení agilných projektov využívaný na ukladanie a zdieľanie spoločných dokumentov a súborov. Tento nástroj umožňuje efektívne zdieľanie a spoluprácu na dokumentoch a súboroch v rámci tímu. Nástroj Box členovia projektového tímu využívajú na dennej báze. Box nepoužívajú len členovia projektového oddelenia, ale aj celá spoločnosť. Prístup majú len oprávnení používatelia, to znamená, že zamestnanec sa dostane k údajom, len ak je do boxu pozvaný.

Významným nástrojom je aj **Vacation Planner**, ktorý pomáha sledovať dostupnosť členov tímu v kalendári a evidenciu ich dovolení a lekárskeho návštev. To umožňuje lepšie plánovanie práce a optimalizáciu tímových zdrojov. Okrem uvedených nástrojov Scrum tím využíva aj komunikačné platformy ako **Slack** a **Outlook**, ktoré sa používajú na internú a externú komunikáciu.

Používanie nástrojov ako Jira, Confluence, Box a Vacation Planner pomáha tímu sledovať postup práce, zdieľať dôležité informácie a spolupracovať efektívne. Procesy zdieľania úspechov a riešenia problémov tiež prispievajú k zlepšeniu komunikácie a spolupráce v tíme. Zvládanie zmien je kľúčovou schopnosťou tímu, ktorý vyžaduje otvorenú komunikáciu, flexibilitu a schopnosť adaptovať sa na nové podmienky.

Záver

Riadenie projektov v analyzovanej spoločnosti je založené na agilnom prístupe. Projekty sú riadené pomocou SCRUM rámca, ktorý zahŕňa pravidelné Plánovanie šprintov, Denné stand-up stretnutia, Vývoj, Revíziu šprintu a Retrospektívu šprintu. Tím sa zameriava na efektívne plánovanie a realizáciu cieľov v rámci krátkych časových úsekov, čo umožňuje

pružnú reakciu na zmeny a rýchle dodanie hodnoty zákazníkovi. Komunikácia, spolupráca a pravidelné hodnotenie a zlepšovanie procesov sú kľúčovými prvkami tohto agilného prístupu k riadeniu projektov. Aj keď rámec SCRUM prináša do riadenia projektov flexibilitu, rýchlu adaptáciu na zmeny a neustále zlepšovanie, v praxi často samotný SCRUM a teda agilné riadenie nestačí. Niektoré projekty, kde sú stanovené pevné termíny a rozpočet, si vyžadujú jasne definované procesy, podrobnú dokumentáciu a dôsledné plánovanie, ktoré sú typické práve pre tradičné (waterfall) riadenie projektov. Práve preto sa v mnohých organizáciách osvedčuje hybridné riadenie, ktoré spája výhody agilného a tradičného prístupu. Kým agilné rámce, ako napr. SCRUM, umožňujú efektívnu iteratívnu prácu a rýchle doručovanie hodnoty, tradičné riadenie zabezpečuje kontrolu nad rozpočtom, termínmi a rizikami. Tento prístup umožňuje podnikom prispôbiť spôsob riadenia konkrétnym potrebám projektu, čím sa zvyšuje jeho úspešnosť.

Ani zavedenie SCRUM-u však nie je univerzálnym riešením pre každý podnik. Vyžaduje si kultúrnu zmenu, jasnú podporu zo strany vedenia a ochotu zamestnancov prispôbiť sa novému spôsobu práce. Ak však je SCRUM implementovaný správne, môže podniku priniesť vyššiu agilitu, efektivitu a schopnosť neustále sa inovovať v rýchlo sa meniacom podnikateľskom prostredí.

V prostredí podniku prináša SCRUM niekoľko zásadných benefitov:

- Zvyšuje flexibilitu a umožňuje rýchle prispôbenie sa meniacim sa požiadavkám trhu alebo zákazníkov. Tradičné metódy riadenia projektov, ako vodopádový (waterfall) prístup, často narážajú na problém dlhých vývojových cyklov, ktoré neumožňujú priebežnú spätnú väzbu. SCRUM naopak funguje v iteráciách - šprintoch, pričom každý z nich prináša konkrétnu a hodnotnú časť produktu. Tento spôsob zabezpečuje, že zákazníci môžu priebežne testovať a hodnotiť čiastkové dodávky, čím sa minimalizuje riziko neúspechu celého projektu.
- Zlepšuje tímovú prácu a komunikáciu. SCRUM podporuje samostatnosť tímov, umožňuje členom tímu efektívne riešiť problémy v reálnom čase. Pravidelné stretnutia, ako sú denné stand-upy, plánovacie schôdzky a retrospektívy, vytvárajú priestor na neustále zlepšovanie procesov.
- Vysoký prehľad o projekte. Transparentnosť, ktorá je základným pilierom SCRUM zabezpečuje, že všetci zapojení do projektu majú neustále prehľad o stave projektu a môžu včas reagovať na vzniknuté prekážky.
- Vyššia kvalita výsledného produktu. Keďže sa pri riadení projektov pomocou rámca SCRUM kladie dôraz na priebežné testovanie a spätnú väzbu, odhaľovanie a oprava chýb prebieha kontinuálne a nie až na konci projektu. Z uvedeného vyplýva, že konečný produkt lepšie zodpovedá očakávaniam používateľov.
- Optimalizácia nákladov a vyššia návratnosť investícií. Vďaka iteratívne prístupu môže podnik rýchlejšie uviesť na trh prvé verzie produktov, čo mu poskytuje konkurenčnú výhodu. Zároveň SCRUM eliminuje neefektívne procesy a minimalizuje riziko plytvania zdrojmi.

Zoznam bibliografických odkazov

BAJIĆ, O. 2021. *Sprint do cilja: Scrum tim mora jasno definirati i dugoročne i kratkoročne ciljeve* [online] [cit. 2025-03-13]. Dostupné na internete: <https://www.netokracija.com/scrum-tim-cilj-175097>.

BECKER, C. 2025. *SCRUM Guide*. [online] [cit. 2025-13-10]. Dostupné na internete: <https://firmbee.sk/vlastnosti-dobreho-scrum-mastra>.

COLE, R. and SCOTCHER, E. 2015. *Brilliant Agile Project Management: a Practical Guide to Using Agile, Scrum and Kanban*. Pearson Business; 1st Edition (2015) pp. 200. ISBN 978-1-292-06356-0.

ČERVEŇANSKÁ, T. and SAMÁKOVÁ, J. 2023. *Návrh opatrení na zlepšenie riadenia projektov v podniku Jaguar Land Rover Slovakia s.r.o., s využitím agilného rámca SCRUM*. Bakalárska práca. Trnava, STU, Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, 2023. 69 s. Evidenčné číslo: MTF-16682-111670.

DASH, S. N. 2022. *Managing A Hybrid-ScrumBan Project with MS Project Agile*. [online] [cit. 2025-02-13]. Dostupné na internete: <https://mpug.com/managing-a-hybrid-scrumban-project-with-ms-project-agile/#comments>.

FBE. 2025. *Čistý Waterfall a čistý Agile je mýtus*. [online]. [cit. 2025-02-20]. Dostupné na internete: <https://fbe.sk/cisty-waterfall-a-cisty-agile-je-mytus/>.

FORBES MEDIA LLC. 2023. *What is a kanban board. The ultimate guide*. [online] [cit. 2025-03-22]. Dostupné na internete: <https://www.forbes.com/advisor/business/software/what-is-kanban-board/>.

GABLAS, B. 2025. *Kanban tabuľa*. [online] [cit. 2025-03-22]. Dostupné na internete: <https://www.project-academy.com>.

KACZOR, K. 2024. *Spring planning*. [online] [cit. 2025-02-10]. Dostupné na internete: <https://www.qagile.pl/scrum/co-to-jest-sprint-planning/>.

KAČENGOVÁ, A. 2021. *Scrum a ako ho zaviesť – kompletný návod*. Lumeer [online]. [cit. 2025-03-22]. Dostupné na: <https://www.lumeer.io/cs/scrum-a-ako-ho-zaviesť-kompletny-navod/>.

KADERÁBEKOVÁ, N. a SAMÁKOVÁ, J. 2023. *Návrh riešenia na zlepšenie riadenia projektov v medzinárodnej spoločnosti pre informačné technológie, s využitím agilných prístupov*. Diplomová práca. Trnava, STU, Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, 2023. 77 s. Evidenčné číslo: MTF-16684-103287.

KARAPETYAN, S. 2023. *Product Backlog Perfection: 3 Examples Of Backlogs Done Right*. [online] [cit. 2025-03-05]. Dostupné na internete: <https://theproductmanager.com/topics/product-backlog-examples/>.

KNIBERG, H. and SKARIN, M., 2010. *Kanban and Scrum: making the most of both*. United States of America, C4Media. 2010. s. L20. ISBN 978-0-557-13832-6. [online] [cit. 2025-03-05]. Dostupné na internete: <https://www.agileleanhouse.com/lib/lib/People/HenrikKniberg/KanbanAndScrumInfoQVersionFINAL.pdf>.

KUCHÁRIK, D. 2025. *Agilné princípy a Scrum: Zrýchlenie dodávok a efektívne reakcie na zmeny.* [online] [cit. 2025-03-03]. Dostupné na internete: <https://www.cems.sk/blog/1205-agilne-principy-a-scrum-zrychlenie-dodavok-a-efektivne-reakcie-na-zmeny>.

LEONG, J., YEE, K. M., BAITSEGI, O., PALANISAMY, L. and RAMASAMYET, R. K. 2023. *Hybrid Project Manažment between Traditional Software Development Lifecycle and Agile Based Product Development for Future Sustainability.* In: Sustainability. 2023, roč. 15, č. 2, s. 1121. ISSN 2071-1050. [online] [cit. 2025-03-03]. Dostupné na internete: <file:///C:/Users/qsugarova/Downloads/sustainability-15-01121-v2.pdf>.

MERSINO, A. 2020. *Agile Project Success Rates are 2X Higher than Traditional Projects.* [online] [cit. 2025-03-07]. Dostupné na internete: <https://medium.com/leadership-and-agility/agile-project-success-rates-are-2x-higher-than-traditional-projects-376a05e590d4>.

MICROSOFT. 2019. *Ako si pre project zvolit' najlepšiu agilnú metodológiu.* [online] Dostupné na internete: <https://www.microsoft.com/sk-sk/microsoft-365/business-insights-ideas/resources/how-to-choose-the-best-agile-methodology-for-your-project>.

MSG LIFE. 2023. *Čo je projektový manažment, projektové riadenie, klasický a agilný prístup.* [online] [cit. 2025-02-06]. Dostupné na internete: <https://msg-life.sk/clanky/kariera/projektovy-manazment/>.

OBUCH, M. a SAMÁKOVÁ, J. 2023. *Návrh riešenia na zlepšenie riadenia projektov v spoločnosti HELLA Slovakia Lighting s.r.o., organizačná zložka Bánovce nad Bebravou, s využitím nástrojov umelej inteligencie a agilných prístupov.* Diplomová práca. Trnava, STU, Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, 2023. 85 s. Evidenčné číslo: MTF-16684-122276.

PETROVA, S. 2023. *What Is Kanban Methodology? Process, Model Principles & More.* [online] [cit. 2025-02-06]. Dostupné na internete: <https://crm.org/news/what-is-kanban-methodology>.

POTIFOB. 2025. *Agilné prístupy a certifikácie – Scrum a ostatné.* [online] [cit. 2025-02-10]. Dostupné na internete: <https://potifob.sk/Agile>.

PROJECTMANAGEMENT.COM. 2022. *Difference between agile and waterfall: Software development medhodoologies.* [online] [cit. 2025-02-10]. Dostupné na internete: <https://project-management.com/agile-vs-waterfall/>.

PUK, N. a SAMÁKOVÁ, J. 2023. *Návrh riešenia na zlepšenie riadenia projektov v podniku Slovenské elektrárne, a.s., Atómové elektrárne Mochovce, odštepný závod, s využitím nástrojov umelej inteligencie a agilných prístupov.* Diplomová práca. Trnava, STU, Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, 2023. 66 s. Evidenčné číslo: MTF-16684-85438.

RIEČIČIAR, M. a SAMÁKOVÁ, J. 2023. *Návrh riešenia na zlepšenie riadenia projektov v podniku MATADOR Industries, a.s.* Diplomová práca. Trnava, STU, Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, 2023. 94 s. Evidenčné číslo: MTF-16684-69462.

RUBIN, A. and EARL. B. 2001. *Research methods for social work. 7th ed.,* Linda Schreiber: Brooks/Cole, Cengage Learning. 2009. 653 s. ISBN-13: 978-0-495-81171-8; ISBN-10: 0-495-81171-8.

SABOL, T., BABIČ, F. a MACEJ, P., 2012. *Projektový management*. Technická univerzita v Košiciach. 2012. 294 s. ISBN 978-80-553-0897-5.

SAMÁKOVÁ, J. a MESÁROŠOVÁ, J. 2023. *Vplyv prístupu na úsech riadenia projektov. Agilný, Waterfall alebo hybrid?* Fórum manažéra. 1/2023. ISSN 1339-9403.

SANTO, D. 2022. *Top 5 main Agile methodologies: advantages and disadvantages*. [online] [cit. 2025-01-24]. Dostupné na internete: <https://www.xpand-it.com/blog/top-5-agile-methodologies/>.

SCHWABER, K. and SUTHERLAND, J. 2020. *The Scrum Guide*. [online] [cit. 2025-01-24]. Dostupné na internete: <https://scrumguides.org/docs/scrumguide/v2020/2020-Scrum-Guide-US.pdf>.

SILBERG, S. 2020. *Agilný prístup: Ako transformovať dynamiku a motiváciu v tíme?* [online] [cit. 2025-03-06]. Dostupné na internete: <https://www.prohuman.sk/pedagogika/agilny-pristup-ako-transformovat-dynamiku-a-motivaciu-v-time>.

SOCHNA, P. 2025. *Agilné prístupy v projektovom riadení*. [online]. [cit. 2025-03-14]. Dostupné na internete: <https://www.projektovymanazment.sk/agilne-pristupy-projektovom-riadeni/>.

STANDISH GROUP. 2015. *CHAOS REPORT 2015*. [online] [cit. 2023-09-14]. Dostupné na internete: chromeextension://efaidnbmnmnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.standishgroup.com/sample_research_files/CHAOSReport2015-Final.pdf.

STANDISH GROUP. 2021. *Chaos report Beyond Infinity (digital version)*. [online] [cit. 2023-09-14]. Dostupné na internete: <https://standishgroup.myshopify.com/collections/frontpage/products/copy-of-chaos-report-beyond-infinity-digital-version>.

ŠOCHOVÁ, Z. 2018. *Burndown graf*. [online] [cit. 2025-03-24]. Dostupné na internete: <https://soch.cz/blog/management/agile/burndown-graf/>.

THESING, T., FELDMANN, C. and BURCHARDT, M. 2021. *Agile versus Waterfall Project Management: Decision Model for Selecting the Appropriate Approach to a Project*. Procedia Computer Science. 2021, roč. 181, s. 746–756. ISSN 18770509. [online] cit. 2023-09-14]. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.227>.

VARDY, A. 2016. *SCRUM: The Ultimate Beginners Guide to Mastering Scrum to Boost Productivity & Beat Deadlines (ITIL, ITSM, Project Management, Computer Programming, ITIL Foundations, Prince 2)*. Create Space Independent Publishing Platform. (2016) ISBN 978-1-5300-7655-0. [online] [cit. 2024-11-10]. Dostupné na internete: <https://dal.acm.org/doi/10.5555/3019477>.

VITALITY. 2020. *Why Agile is Better than Waterfall (Based on Standish Group Chaos Report 2020)*. [online]. [cit. 2023-09-10]. Dostupné na internete: <https://vitalitychicago.com/blog/agile-projects-are-more-successful-traditional-projects/>.

VŠETEČKA, P. 2015. *Projektové myslenie*. Vydavateľstvo Liptovský Mikuláš. 511 s. ISBN 978-80-971982-1-3.

WESTLAND, J. 2022. *Product Backlog and Sprint Backlog: A Quick Guide*. [online] [cit. 2024-01-05]. Dostupné na internete: <https://www.projectmanager.com/blog/product-backlog-sprint-backlog>.

WONG, Z. 2007. *Human Factors in Project Management: Concepts, Tools, and Techniques for Inspiring Teamwork and Motivation.* Wiley. 368 s. ISBN-10-0787996297.

ZASA, F. P., PATRUCCO, A. and PELLIZZONI, E., 2020. *Managing the Hybrid Organization: How Can Agile and Traditional Project Management Coexist?* In *Research Technology Management*. 2021. roč. 64, číslo 1, pp. 54-63. doi.org/10.1080/08956308.2021.1843331 [online] [cit. 2023-09-10]. Dostupné na internete: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/08956308.2021.1843331>.

Pod'akovanie

Tento príspevok vznikol v rámci projektu: *Implementácia inovatívnych foriem učenia a praktického tréningu do vzdelávania v oblasti výrobných technológií a výrobného manažmentu s cieľom zvýšiť atraktivnosť štúdia a podporiť rozvoj prierezových kompetencií absolventov* (026STU-4/2023), s podporou agentúry KEGA MŠVVaŠ SR.

7 OPTIMALIZÁCIA ÚROVNE AUTONÓMNEJ ÚDRŽBY V PRIEMYSELNOM PODNIKU

MESÁROŠOVÁ, J. – JURČOVÁ, S. – SAMÁKOVÁ, J.

Úvod

V modernom priemyselnom prostredí zohráva údržba podstatnú úlohu pri zabezpečení plynulého chodu výrobných procesov, minimalizácii prestojov a optimalizácii nákladov. Efektívna údržba nielenže predlžuje životnosť zariadení, ale zároveň prispieva k zvýšeniu celkovej produktivity podniku, znižovaniu nákladov na opravy a energetickú spotrebu, ako aj k zvýšeniu bezpečnosti a kvality výroby.

Jedným z moderných prístupov v oblasti údržby je koncept autonómnej údržby, ktorý je súčasťou metodiky Total Productive Maintenance (TPM) – Totálne produktívna údržba. Tento prístup spočíva v prenesení časti zodpovednosti za údržbu na operátorov výrobných zariadení, ktorí vykonávajú základné údržbárske činnosti, ako sú čistenie, mazanie, kontrola a jednoduché opravy. Cieľom autonómnej údržby je znížiť závislosť od špecializovaných údržbárskych tímov, zvýšiť povedomie operátorov o stave strojov a predchádzať poruchám skôr, než dôjde k ich eskalácii.

Implementácia autonómnej údržby však nie je jednoduchý proces a vyžaduje systematický prístup. Podnik sa musí popasovať s viacerými výzvami, medzi ktoré patrí správne nastavenie školení pre operátorov, motivácia zamestnancov k prevzatiu zodpovednosti za údržbu, vytvorenie jasných postupov a pravidiel, ako aj zabezpečenie potrebných nástrojov a vizualizácie údržbárskych úloh. Dôležitou súčasťou je aj prekonanie počiatočného odporu zo strany zamestnancov, ktorí môžu vnímať autonómnu údržbu ako dodatočnú záťaž k ich bežným pracovným povinnostiam.

Úspešná implementácia autonómnej údržby prináša podniku viacero benefitov. Okrem zníženia prestojov a zvýšenia spoľahlivosti výrobných zariadení dochádza aj k zlepšeniu pracovného prostredia, keďže operátori lepšie chápu dôležitosť údržby a starostlivosti o technológie, s ktorými pracujú. V dlhodobom horizonte vedie autonómna údržba k zvýšeniu efektívnosti výroby, zníženiu nákladov a k rozvoju kultúry neustáleho zlepšovania v podniku.

Cieľom kapitoly je optimalizácia úrovne autonómnej údržby vo vybranom priemyselnom podniku. V prvej časti kapitoly bude stručne charakterizované manažerstvo údržby, základné stratégie údržby, Totálne produktívna údržba, ako aj základné pojmy, súvisiace s predkladanou problematikou. V druhej časti sa budeme zaoberať kľúčovými aspektami implementácie autonómnej údržby a identifikáciou prekážok, s ktorými sa podnik môže stretnúť pri jej zavádzaní. Tretia časť demonštruje praktickú aplikáciu autonómnej údržby v priemyselnom podniku.

7.1 Manažerstvo údržby

Manažerstvo údržby (Maintenance Management) je systematický prístup k plánovaniu, riadeniu a optimalizácii údržbárskych činností v podniku. Jeho hlavným cieľom je zabezpečiť vysokú spoľahlivosť a dostupnosť výrobných zariadení pri minimálnych nákladoch a čo najnižšom vplyve na plynulosť výroby. Manažerstvo údržby je teda súčasťou strategického manažerstva podniku, ktoré určuje zámery rozvoja podniku a získava pre tieto zámery spolupracovníkov, vyhľadáva a využíva príležitosti, zvažuje riziká, prijíma unikátne rozhodnutia a dlhodobo plánuje podnikové ciele. (Grenčík a kol., 2020)

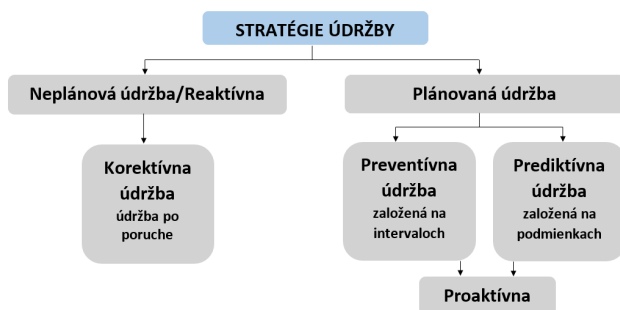
7.1.1 Požiadavky na manažérstvo údržby

Poruchovosť zariadení je dôležitým faktorom, ktorý ovplyvňuje nie len účinnosť ich prevádzky, ale aj celkovú schopnosť podniku dosahovať stanovené ciele. Tento faktor je často spojený aj s bezpečnosťou a ochranou zdravia pri práci, rizikom pre zdravie okolitého obyvateľstva a možnosťou ovplyvňovania environmentálnych aspektov. Efektívne manažérstvo údržby je teda nevyhnutné pre každý priemyselný podnik, ktorý chce dosiahnuť vysokú produktivitu a konkurencieschopnosť. Pačaiová a kol. (2020) definuje základné požiadavky na manažérstvo údržby takto:

- **Údržba ako proces** – údržba je dnes vnímaná ako komplexný systém s vlastnou štruktúrou a procesmi, ktoré musia byť starostlivo monitorované a hodnotené od počiatočnej požiadavky zákazníka až po spokojnosť zákazníka.
- **Integrácia starostlivosti o majetok** – dlhodobé dosahovanie cieľov organizácie vyžaduje rozumnú integráciu starostlivosti o majetok do všetkých riadiacich činností.
- **Riadenie údržby a PDCA** – je opísané ako systematický súbor procesov postavených na PDCA cykle (Plan – plánuj, Do – konaj, Check – kontroluj, Act – zasiahni), tento cyklus využíva riadenie rizík ako základ pre rozhodovanie a vykonávanie údržbových činností.
- **Politika riadenia údržby** – kľúčovým prvkom pre riadenie údržby je politika riadenia údržby, ktorá definuje rámec organizácie, strategický smer, ciele údržby a záväzok na splnenie požiadaviek zainteresovaných strán a neustále zlepšovanie.
- **Systém riadenia údržby (SMÚ)** – Systém riadenia údržby je definovaný ako riadenie činností, ktoré určujú ciele, stratégie a zodpovednosti údržby, a to v súlade s ekonomickými, bezpečnostnými a environmentálnymi požiadavkami.

7.1.2 Základné stratégie údržby

Údržba zohráva kľúčovú úlohu v zabezpečení spoľahlivosti výrobných zariadení a efektívneho chodu podniku. Správne zvolená stratégia údržby umožňuje minimalizovať prestoje, optimalizovať náklady a predchádzať neočakávaným poruchám. V závislosti od charakteru výroby, technologických požiadaviek a dostupných zdrojov môže podnik implementovať rôzne prístupy k údržbe. Stratégie údržby sa delia do dvoch hlavných skupín (Obr. 7.1), a to na údržbu do poruchy (Preventívna a Prediktívna údržba) a údržbu po poruche (Korektívna údržba). Výber vhodnej stratégie závisí od faktorov, ako sú kritickosť zariadení, náklady na opravy a dostupnosť náhradných dielov.



Obr. 7.1. Hierarchia stratégií údržby (Hamasha a kol., 2023)

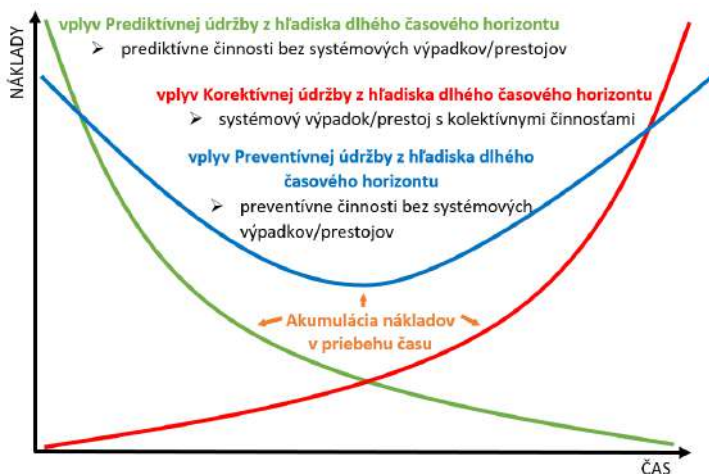
A) Korektívna údržba (reaktívna údržba) – korektívna údržba je stratégia, ktorá spočíva v oprave zariadenia až po jeho poruche. Hoci je nenáročná na plánovanie a nevyžaduje vysoké investície do preventívnych opatrení, môže viesť k nečakaným prestojom, vyšším nákladom na opravy a možným stratám vo výrobe. Používa sa najmä tam, kde výpadok zariadenia nemá kritický dopad. Vykonávanie korektívnej údržby môže byť neplánované alebo plánované: (Červeňan, 2015)

- *neplánované* – ide o najčastejší prípad v praxi, a to bezprostredná reakcia na poruchu. Výsledkom môže byť buď úplné alebo čiastočné odstránenie poruchy v zariadení.
- *plánované* – v tomto prípade sa oprava neuskutočnila okamžite alebo nebolo potrebné ju vykonať ihneď. Namiesto toho sa vykonala iba provizórna oprava a úplné odstránenie poruchy sa naplánovalo na predom dohodnutý čas.

B) Preventívna údržba – preventívna údržba je stratégia, pri ktorej sa údržbárske zásahy vykonávajú pravidelne s cieľom predchádzať poruchám a predĺžiť životnosť zariadení. Ide o plánovaný prístup, ktorý minimalizuje riziko nečakaných výpadkov výroby a optimalizuje prevádzkové náklady. Tento typ údržby sa často využíva pri objektoch, kde nie je praktické alebo ekonomicky výhodné sledovať stav zariadenia pomocou diagnostiky a tiež tam, kde nemožno merať opotrebenie. Plánovanie týchto prác zohráva dôležitú úlohu a môže viesť k zníženiu nákladov na údržbu v porovnaní s nákladmi na opravy po poruche. Negatívum tohto prístupu je, že môže dochádzať k plytvaniu nákladmi pri výmene komponentov, ktoré ešte mohli byť funkčné. (Rázgová, 2018)

C) Prediktívna údržba – ide o typ plánovanej údržby, ktorá využíva monitorovanie stavu zariadení pomocou senzorov a diagnostických nástrojov (napr. meranie vibrácií, teploty, opotrebenia). Na základe získaných údajov sa údržba vykonáva v optimálnom čase pred zlyhaním komponentu. Tento prístup znižuje náklady na opravy, minimalizuje prestoje a predlžuje životnosť zariadení. Je však náročný na technológie a vyžaduje investície do meracích systémov. Uplatnenie prediktívnej údržby je vhodné pre zariadenia s kritickou prevádzkovou funkciou, kde zlyhanie zariadenia znamená vysoké náklady. (Predictive maintenance, 2023)

Na porovnanie je na Obr. 7.2 zobrazený prehľad nákladov na údržbu v prípade využívania korektívnej, preventívnej alebo prediktívnej stratégie údržby.



Obr. 7.2. Náklady na korektívnu, preventívnu a prediktívnu údržbu z časového hľadiska (Soualhi, 2021)

D) Proaktívna údržba – ide o údržbu, ktorá vznikla spojením preventívnej a prediktívnej údržby. Obsahuje všetky aspekty prediktívnej údržby s tým, že sa nezameriava len na súčasné príznaky stavu zariadenia alebo stroja, ale aktívne identifikuje a eliminuje príčiny nežiaduceho stavu. Systém proaktívnej údržby je komplexný systém tvorený rôznymi časťami, ktoré zahŕňajú sledované objekty, tímy pracovníkov, preventívnu údržbu, sledovanie stavu pomocou technickej diagnostiky a online sledovanie senzormi. Cieľom je udržiavať a zvyšovať prevádzkovú schopnosť stroja, znížiť náklady na údržbu, obmedziť poruchy a predĺžiť životnosť stroja. Systém využíva technickú diagnostiku a realizuje štatistickú kontrolu vplyvov na prevádzku objektu. (Plonka, 2014)

Výber správnej stratégie údržby je kľúčový na zabezpečenie spoľahlivosti a efektivity výrobných zariadení. Podniky môžu využívať rôzne prístupy podľa charakteru výroby, technologických požiadaviek a dostupných zdrojov.

7.1.3 Totálne produktívna údržba

Totálne produktívna údržba – Total Productive Maintenance (TPM) je systematický prístup k údržbe, ktorý má za cieľ maximalizovať efektívnosť výrobných zariadení, minimalizovať prestoje a zapojiť všetkých zamestnancov do procesu zlepšovania. TPM kladie dôraz na údržbu ako na nevyhnutnú a životne dôležitú súčasť podnikania. Iniciatíva TPM je zameraná na zvýšenie konkurencieschopnosti organizácií a zahŕňa silný štruktúrovaný prístup na zmenu myslenia zamestnancov, čím sa viditeľne zmení pracovná kultúra organizácie. TPM sa snaží zapojiť všetky úrovne a funkcie v organizácii s cieľom maximalizovať celkovú efektívnosť výrobných zariadení. Táto metóda ďalej vyladzuje existujúce procesy a zariadenia znížením chýb a nehôd. TPM je iniciatíva svetovej triedy v oblasti výroby, ktorá sa snaží optimalizovať efektívnosť výrobných zariadení. Zatiaľ čo oddelenia údržby sú tradičným centrom programov preventívnej údržby, TPM sa snaží zapojiť pracovníkov zo všetkých oddelení a úrovní, vrátane úrovne závodu až po vedúcich pracovníkov, aby zabezpečili efektívnu prevádzku zariadení. (Ahuja a Khamba, 2008)

Ide o metódu riadenia údržby, ktorá pochádza z Japonska a bola vyvinutá s cieľom dosiahnuť nulové poruchy, nulové chyby a nulové nehody vo výrobnom procese.

5 základných pilierov TPM, ktoré sú zobrazené na Obr. 7.3, tvorí hlavné nástroje na dosiahnutie tohto cieľa. (Červeňan, 2015)



Obr. 7.3. Základné piliere TPM (Červeňan, 2015)

Každý z pilierov prispieva k zvyšovaniu produktivity, znižovaniu nákladov a zlepšovaniu pracovných podmienok v organizácii, konkrétne ide o: (Grenčík a kol., 2020)

1. **Hodnotenie celkovej efektívnosti strojov a zariadení (liniek) pomocou OEE (Overall Equipment Effectiveness)** – zahŕňa neustále hľadanie spôsobov, ako zvýšiť celkovú efektívnosť zariadení. Zodpovednosť za tieto aktivity sú založené spolupráci výrobných tímov, pričom podpora im je poskytovaná zo strany oddelenie údržby, oddelenie výroby a technickej prípravy výroby.
2. **Plánovaná údržba** – údržba sa vykonáva plánovane na základe analýzy dát o spoľahlivosti zariadení. Pomáha tak predchádzať neplánovaným prestojom a predlžuje životnosť zariadení. Jednotlivé činnosti plánovanej údržby sú vykonávané v nasledujúcich 7 krokoch: stanovenie priorít údržby, eliminácia slabých miest, vytvorenie informačného systému, spustenie plánovanej údržby, zvýšenie efektívnosti údržby, vylepšená údržba, implementácia plánovaného programu údržby.
3. **Systém pre návrh preventívnej údržby a včasné manažérstvo zariadení** – technická príprava výroby a oddelenie údržby vykonávajú činnosti zahrňujúce konštruovanie výrobkov vzhľadom na ich jednoduchú vyrobiteľnosť, výrobné procesy a plány, organizáciu a riadenie údržby, monitorovanie nákladov, plány výroby a opráv, navrhovanie a riadenie preventívnej údržby. Dané činnosti sú vykonávané v nasledujúcich 7 fázach: vývoj výrobku, návrh, konštrukcia, výroba, inštalácia, nábeh zariadenia a samotná prevádzka.
4. **Tréning na zlepšenie zručností pracovníkov** – zvyšuje kompetencie operátorov aj údržbárov, aby lepšie porozumeli strojom a efektívnejšie riešili problémy. Zamestnanci si osvoja správne postupy pri obsluhu a údržbe zariadení, čo pomáha zavádzať kultúru neustáleho zlepšovania v podniku.
5. **Autonómna údržba** – obsluha stroja vykonáva údržbu, ktorá zahŕňa rozpoznávanie normálneho a abnormálneho chodu stroja, zabezpečovanie normálnych prevádzkových podmienok, schopnosť opraviť odchýlky od štandardu, vykonávanie čistenia a mazacích cyklov, pravidelné revízie stroja, implementáciu štandardov autonómnej údržby a monitorovanie kvality komponentov stroja.

Neskôr Tokutaro Suzuki na základe súčasných požiadaviek na kvalitu, efektívnosť a výkonnosť rozšíril 5 základných pilierov TPM na 8 pilierov. Pridal **6. TPM v administratívne** (plytvanie v administratívnych funkciách), **7. Kvalitu údržby** (zlepšenie kvality odstraňovaním zdrojov defektov) a **8. Bezpečnosť, zdravie a životné prostredie** (odstránenie potencionálnych bezpečnostných a zdravotných rizík). (Drahňovský, 2011)

7.1.3.1 Sedem krokov autonómnej údržby

V rámci obsahu a cieľa predkladanej publikácie, sa bližšie zameriame na autonómnu údržbu ako na jeden z pilierov TPM, v ktorom sú operátori zapojení do základných údržbárskych úloh, ako je čistenie, mazanie, kontrola a drobné opravy. Cieľom autonómnej údržby je znížiť závislosť od údržbárskeho personálu, zvýšiť spoľahlivosť zariadení a predchádzať poruchám tým, že sa operátori naučia lepšie rozumieť strojom, s ktorými pracujú. Implementácia autonómnej údržby si vyžaduje čas, školenie a systematický prístup, ale v dlhodobom horizonte vedie k výraznému zlepšeniu produktivity a stability výrobných procesov. Na Obr. 7.4 je opísaných 7 hlavných krokov autonómnej údržby (Boledovič, 2017a), podľa ktorých sa v malých obmenách, v závislosti od typu a zamerania podniku, implementuje autonómna údržba na vybrané pracovisko alebo zariadenie.



Obr. 7.4. Sedem krokov autonómnej údržby (Boledovič, 2017a; panák na obrázku www.canva.com)

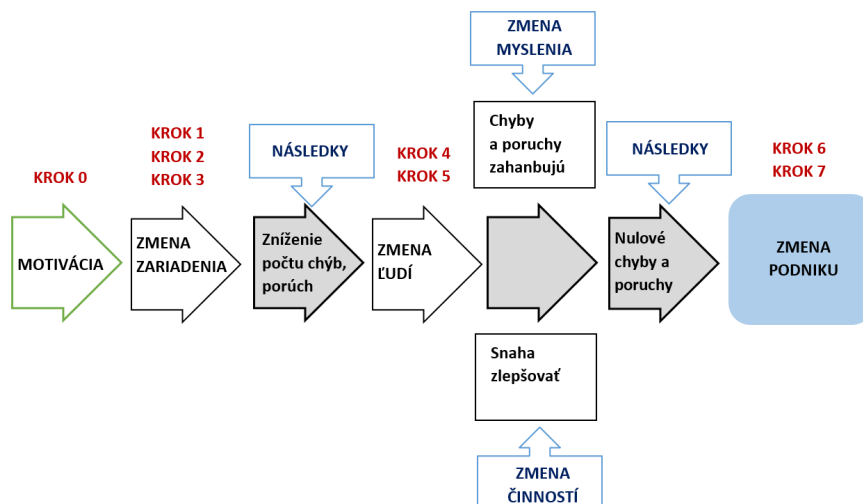
K základným 7 krokom autonómnej údržby patrí:

- 1. Počiatočné čistenie** – v prvom zo siedmich krokov autonómnej údržby je potrebné poskytnúť operátorom informácie a vedomosti o tom, ako sa starať a obsluhovať zariadenia a stroje, s ktorými prichádzajú do každodenného styku. Predpokladom efektívnej autonómnej údržby je teda splnená podmienka, že operátori musia detailne poznať zariadenia a stroje, na ktorých pracujú. Operátori musia byť schopní vykonať dôkladné čistenie stroja a odstránenie nečistôt, prachu a olejových usadenín. Počas čistenia sú schopní identifikovať abnormality (úniky oleja, uvoľnené skrutky, opotrebované diely). Výsledkom prvého kroku je lepšie pochopenie stavu stroja ako aj identifikácia príčin znečistenia.
- 2. Eliminácia zdrojov znečistenia** – v druhom kroku sa identifikujú a eliminujú príčiny znečistenia, napríklad netesnosti, uvoľnené matice a skrutky, opotrebenie alebo nesprávne mazanie. Zlepšuje sa prístup k údržbovým bodom, napríklad odstránením

prekážok alebo doplnením krytov na ochranu citlivých častí stroja. V tomto kroku je dôležité poskytnúť operátorom štandardizované pracovné pokyny, ktoré im poskytnú potrebné informácie krok za krokom, ako vykonávať rutinné úlohy údržby. V tomto prípade sa pre lepšie pochopenie odporúča tvorba vizuálneho pracovného štandardu, kde možno doplniť jednotlivé pracovné pokyny vhodným obrázkom časti zariadenia alebo stroja.

3. **Normy čistenia a mazania** – po vykonaní počiatočnej kontroly a príslušných čistení všetkých zariadení a strojov je dôležité zabezpečiť, aby sa znova nedostali do nežiaduceho stavu. To možno dosiahnuť minimalizáciou alebo odstránením všetkých možných príčin ich kontaminácie. Tretí krok autonómnej údržby sa preto zameriava na definíciu štandardizovaných postupov pre čistenie, mazanie a pravidelné kontroly stroja. Súčasťou tohto kroku je aj priradenie zodpovednosti operátorom a tvorba harmonogramu údržby.
4. **Všeobecná kontrola** – akonáhle budú mať operátori súbor noriem a štandardov, ktoré musia dodržiavať, aby im pomohli pri vykonávaní základných úloh údržby, môžu ich na základe svojich skúseností upraviť, aby zefektívnili a zlepšili vykonávané úlohy. Okrem toho, môžu operátori počas tohto kroku poskytnúť informácie vedúcemu pracovníkovi vo forme kontrolných správ s priloženými obrázkami, ktoré podrobne popisujú aktuálny stav zariadenia alebo stroja a realizované úlohy údržby. Vo štvrtom kroku autonómnej údržby sa operátori učia rozpoznávať abnormality na strojoch a zariadeniach (napr. vibrácie, hluk, teplota), čím získavajú základné technické znalosti o fungovaní stroja.
5. **Autonómna kontrola** – operátori vykonávajú pravidelné kontroly podľa definovaných štandardov. Zavádzajú sa vizuálne manažérske nástroje (štítky, kontrolné zoznamy, farebné označenia). Inými slovami, operátorom by mali byť poskytnuté vizuálne pomôcky, ktoré posilnia normy a štandardy a umožnia lepšie pochopenie činností, ktoré sa týkajú daného zariadenia alebo stroja.
6. **Organizácia a poriadok** – údržba sa stáva pravidelnou a štandardizovanou súčasťou pracovného procesu, pričom používa vizuálne pomôcky na uľahčenie kontroly a dokumentácie. Tento krok vychádza z princípov 5S (Triedenie, Usporiadanie, Čistenie, Štandardizácia, Disciplína), ktoré pomáhajú vytvoriť organizované pracovné prostredie na všetkých pracoviskách v podniku.
7. **Rozvoj autonómnej údržby** – posledným zo siedmich krokov autonómnej údržby je vytvorenie kultúry neustáleho zlepšovania. Operátori systematicky aplikujú Kaizen a neustále hľadajú možnosti zlepšenia, čo zaisťuje, že pracujú na optimálnej úrovni. Vedúci tímu a technici údržby sa taktiež môžu podieľať na neustálom zlepšovaní pravidelným auditom práce operátorov, čím na jednej strane poukážu na príležitosti na ich zlepšenie, ako aj motivujú svojich podriadených pochvalou za dobre odvedenú prácu.

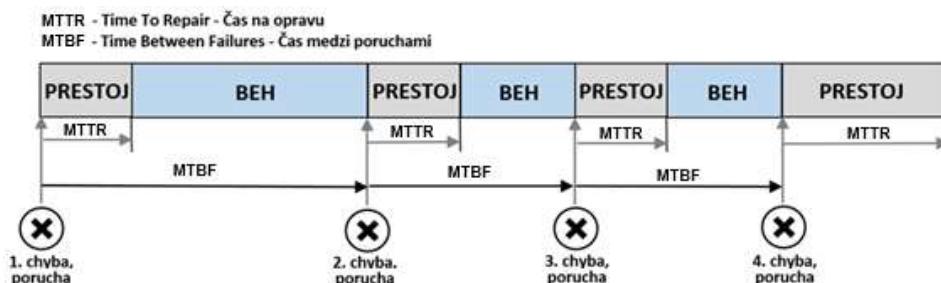
Na Obr. 7.5 je znázornený postup implementácie autonómnej údržby, ktorý so sebou prináša postupné zmeny v podniku. Najprv je to „zmena zariadenia“, ktoré je po implementácii prvých troch krokov (Počiatočné čistenie, Eliminácia zdrojov znečistenia, Normy čistenia a mazania) menej kazové. Viditeľné zníženie počtu chýb alebo porúch na zariadení sa pretaví do redukcie času prestojov, čo so sebou prináša „zmenu ľudí“. Tí zrazu vidia súvislosť medzi aktivitami autonómnej údržby a nižšou poruchovosťou zariadení, čím dochádza k „zmene myslenia ľudí“. To sa potom prejaví v snahe zlepšovať procesy, čiže dochádza k „zmene činností“. Následkom týchto zmien sú nulové chyby a poruchy čo za následok najdôležitejšiu zmenu v rámci zavádzania autonómnej údržby a tou je „zmena podniku“.



Obr. 7.5. Zavádzanie autonómnej údržby (Ukážka školiacich materiálov, 2013)

7.1.4 Kľúčové ukazovatele údržby

Kľúčové ukazovatele údržby (*KPI* – Key Performance Indicators) sú dôležité metriky na hodnotenie výkonnosti procesov údržby, a tým na identifikáciu potenciálu na zlepšenie. Poskytujú jasný prehľad o efektívnosti, produktivite a kvalite činností údržby. Meraním a dodržiavaním *KPI* môžu spoločnosti zvýšiť efektívnosť svojich údržbárskych činností, znížiť prestoje, zlepšiť dostupnosť aktív a optimalizovať celkový výkon. V rámci tejto kapitoly sú popísané štyri *KPI* údržby, ktoré umožňujú podniku dosiahnuť stanovené ciele v oblasti systému údržby, konkrétne ide o (Obr. 7.6): **Stredný čas medzi poruchami** (*MTBF* – Mean Time Between Failures), **Stredný čas opravy** (*MTTR* – Mean Time To Repair), **Dostupnosť** (*A* – Availability) a **Celkovú efektívnosť zariadenia** (*OEE* – Overall Equipment Effectiveness). (Festo, 2024)



Obr. 7.6. Zobrazenie časov údržby (EAST-GATE, 2024)

1. Stredný čas medzi poruchami (*MTBF*)

Ide o kľúčový ukazovateľ údržby, ktorý udáva, ako dlho systém v priemere funguje medzi dvoma poruchami (Obr. 7.6). *MTBF* vyjadruje priemerný čas medzi dvoma po sebe nasledujúcimi poruchami počas normálnej prevádzky. Obvykle sa používa pri hodnotení

spoľahlivosti strojov, zariadení a systémov v priemysle, IT a elektrotechnike. Vyššia hodnota *MTBF* znamená vyššiu spoľahlivosť zariadenia, pretože poruchy sa vyskytujú menej často. Tento ukazovateľ sa používa na plánovanie údržby, znižovanie prestojov a optimalizáciu výrobných procesov. Vypočíta sa vzťahu (7.1): (EAST-GATE, 2024)

$$MTBF = \frac{\text{Celkový prevádzkový čas (Beh)}}{\text{Počet porúch}} \quad (7.1)$$

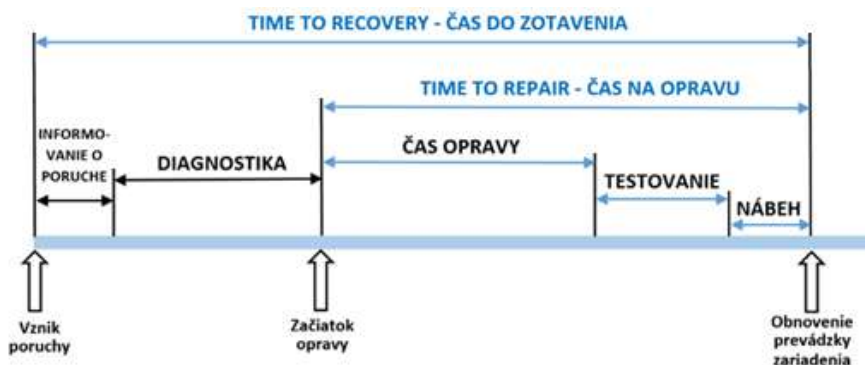
2. Stredný čas opravy (*MTTR*)

MTTR je štatistická veličina, ktorá vyjadruje priemerný čas, ktorý je potrebný na opravu zariadenia po poruche. Zahŕňa čas potrebný na diagnostiku poruchy, samotnú opravu a opätovné uvedenie zariadenia do prevádzky. *MTTR* sa vypočíta podľa vzťahu (7.2): (EAST-GATE, 2024)

$$MTTR = \frac{\text{Celkový čas opráv}}{\text{Počet porúch}} \quad (7.2)$$

Nižšia hodnota *MTTR* znamená rýchlejšie opravy a kratšie prestoje, čo je dôležité pre efektívnosť výrobných procesov a prevádzku technických systémov. *MTTR* sa často používa spolu s *MTBF* na hodnotenie spoľahlivosti zariadení a plánovanie preventívnej údržby.

Na lepšie pochopenie problematiky prestojov je dôležité spomenúť aj **Čas do zotavenia** (*TTR* – Time To Recovery). Ide o metriku, ktorá vyjadruje dobu potrebnú na obnovenie normálnej prevádzky systému alebo procesu po výskyte poruchy, incidentu alebo iného narušenia. Tento čas v sebe zahŕňa čas informovania o poruche, diagnostiku, čas samotnej opravy stroja, testovanie a nábeh stroja (Obr. 7.7). Vo výrobe a údržbe označuje čas potrebný na úplnú obnovu výrobných procesov po poruche alebo neočakávanej udalosti. Krátky Čas do zotavenia znamená vyššiu efektívnosť a nižšie straty v dôsledku prestojov. (Festo, 2024)



Obr. 7.7. Čas do zotavenia (Festo, 2024)

3. Dostupnosť (*A*)

Dostupnosť vyjadruje, aký podiel času je zariadenie schopné vykonávať svoju plánovanú činnosť v porovnaní s celkovým časom, počas ktorého by malo byť k dispozícii na prevádzku. Tento ukazovateľ reflektuje spoľahlivosť a efektívnosť údržby. Dostupnosť sa vypočíta podľa vzťahu (7.3): (EAST-GATE, 2024)

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \cdot 100 \quad (7.3)$$

4. Celková efektívnosť zariadenia (OEE)

OEE je metrika, ktorá vyjadruje efektívnosť výrobného zariadenia. Pomáha identifikovať straty vo výrobe na základe troch zložiek, ktoré ho tvoria, a to: **Dostupnosť zariadenia (D)**, **Výkon (V)** a **Kvalita (K)**. Vypočíta sa podľa vzťahu (7.4) ako súčin týchto prvkov a vyjadruje sa v percentách:

$$OEE = (D \cdot V \cdot K) \cdot 100 \quad (7.4)$$

Porovnávaním hodnôt OEE môžu organizácie monitorovať svoj pokrok a zlepšovať výkonnosť výroby. Stručne povedané, OEE pomáha manažmentu odhaliť skrytú kapacitu, znížiť výrobné straty a rozhodnúť o potrebe dodatočných kapitálových investícií. Čím vyššia je hodnota OEE, tým viac nákladov možno ušetriť prostredníctvom efektívnejšieho využitia zariadení. (Cheah, Prakash a Ong, 2020) Dostupnosť zariadenia, výkon a kvalita kvantifikujú šesť veľkých strát na zariadení, ktoré spadajú do troch hlavných oblastí, a to: **Prestoje, Straty rýchlosti a Chyby**: (Boledovič, 2017b)

Prestoje

1. *Neplánované prestoje*: poruchy stroja (vplyvom mechanického, elektrického, pneumatického alebo hydraulického defektu), ostatné poruchy (chýbajúce nástroje, materiál alebo pomocné látky), neplánovaná údržba, ...
2. *Straty kvôli nastaveniam*: zoraďovanie a nastavenie (výmena prípravku, nástroja), preventívna údržba, čas nábehu zariadenia, ...

Straty rýchlosti

3. *Behy naprázdno, krátke prestávky*: abnormálna činnosť senzorov, zaseknutie komponentov, čistenie, kontrola, ...
4. *Znížená rýchlosť*: nesúlad medzi navrhnutou a skutočnou rýchlosťou zariadení, opotrebenie zariadenia, neefektívna práca operátora, ...

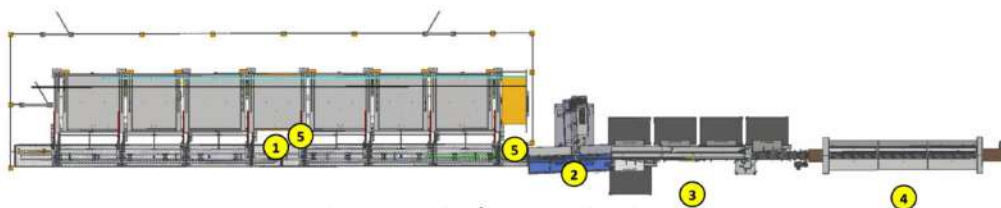
Chyby

5. *Chyby v procese*: nepodarky a nedostatky v kvalite, ktoré potrebujú opravu (nesprávna montáž komponentu),
6. *Straty rozbehom*: redukcia času medzi štartom a stabilnou prevádzkou zariadenia.

OEE je jeden z najdôležitejších ukazovateľov vo výrobe a v rámci údržby. Sleduje využitie strojov a pomáha podnikom znížiť náklady a maximalizovať výkon. OEE sa používa na analýzu efektívnosti jednotlivých zariadení aj integrovaných výrobných systémov, pričom počiatočné hodnoty OEE sa porovnávajú s budúcimi hodnotami OEE, čím sa kvantifikuje dosiahnutá úroveň zlepšenia. (Cheah, Prakash a Ong, 2020)

7.2 Analýza úrovne autonómnej údržby na vybranom stroji v priemyselnom podniku

V analyzovanom priemyselnom podniku bol pred niekoľkými rokmi zavedený systém *Totálne produktívnej údržby*. S postupom času však systém nevykazoval očakávané výsledky a bolo potrebné analyzovať jeho súčasný stav, identifikovať úzke miesta a odstrániť zistené nedostatky. Vedenie podniku si za predmet analýzy zvolilo deliaci stroj (profilové nožnice) na pracovisku delenia materiálu. Linka na prípravu polotovarov (Obr. 7.8) sa skladá z profilových nožníc, ktoré sú určené na uchytenie a vedenie ocelí s kruhovým a štvorhranným prierezom, z reťazových dopravníkov na ďalšie triedenie a odvádzanie týchto polotovarov a odpadu. Výstrižky z ocele sú strihané pod pravým uhlom a majú rovnaký objem.



Obr. 7.8. Linka na prípravu polotovarov strihaním (Jurčová, 2024)

1 – zásobník tyčí SMH 050, 2 – nožnice na strihanie tyčovej ocele CADDY 50,
3 – článkový reťazový pás SKB 190, 4 – článkový reťazový pás SKB-T 190, 5 – hydraulické agregáty

7.2.1 Analýza porúch na strihacom stroji

V analyzovanom priemyselnom podniku funguje korektívna a preventívna údržba. Analýza súčasného stavu údržby na strihacom (deliacom) stroji bola zameraná na zber a spracovanie údajov o vzniknutých poruchách a prestojoch za zvolené obdobie 01. 01. 2022 až 31. 12. 2023. Použité dáta boli získané a analyzované na základe dát zo súboru o poruchách, ktorý si podnik vedie v rámci všetkých zariadení. V Tabuľke 7.1 sú zobrazené celkové trvania prestojov za sledované obdobie, ktoré spôsobili jednotlivé poruchy na stroji.

Tabuľka 7.1. Zistené poruchy/nedostatky na strihacom stroji – analýza

DRUH PORUCHY	POČET CHÝB	PRESTOJE (min)
Vodiace kliešte	48	5232
Senzory	37	3602
Dorazové valce	16	3114
Vysoká teplota oleja	14	6360
Pás	22	2278
Motorový istič F9	9	916
Ochranný kôš	6	356
Porucha stroja	38	9167
Odsun	4	240
Spojka	2	142

Pokračovanie Tabuľky 7.1

DRUH PORUCHY	POČET CHÝB	PRESTOJE (min)
Kladka	4	673
Zadný dopravník	4	7665
Prítlačný valček	3	132
Tlak	4	147
Ochranné dvere	4	119
Zaseknutý komponent	10	1017
Vypadnutá skrutka	2	974
Ovládač	1	62
Piest	1	214
Spolu	229	42410

V analyzovanom priemyselnom podniku sa pracuje na 2 zmeny zo 7,5 hodinovým pracovným časom. Za sledované obdobie mal stroj celkovo odpracovať 7,5 h x 2 pracovné zmeny x 98 pracovných týždňov (počet týždňov za 2 roky, pričom 3 týždne do roka je odstavka), čo predstavuje celkový prevádzkový čas 7350 h, čo je 441000 min. V Tabuľke 7.1 je uvedené, že v dôsledku jednotlivých chýb stroj 42 410 min nepracoval, čo predstavuje značný objem neproduktívneho času. Stroj vykázal 229 porúch za sledované obdobie, pričom stredný čas medzi poruchami (*MTBF*) na linke/stroji sa vypočíta podľa vzťahu (7.5):

$$MTBF = \frac{\text{Celkový prevádzkový čas}}{\text{Počet porúch}} = \frac{100 \text{ pracovných týždňov} \cdot 7,5 \text{ h} \cdot 2 \text{ zmeny}}{229 \text{ porúch}} = 32,10 \text{ h} \quad (7.5)$$

To znamená, že stroj je potrebné opravovať v priemere každých 32,10 prevádzkových hodín. Priemerná doba potrebná na opravu stroja, ktorá sa vypočíta podľa vzťahu (7.6) je 3,09 h (185,2 min), čo predstavuje pomerne dlhý čas na obnovenie funkčnosti stroja:

$$MTTR = \frac{\text{celkový čas opráv}}{\text{počet porúch}} = \frac{42\,410 \text{ min}}{229 \text{ porúch}} = 185,2 \text{ min} = 3,09 \text{ h} \quad (7.6)$$

Ak by sa podarilo *MTTR* znížiť (napr. optimalizáciou údržbárskych procesov, lepšou dostupnosťou náhradných dielov), mohla by sa zvýšiť celková disponibilita stroja, ktorá sa vypočíta podľa vzťahu (7.7), a ktorá predstavuje:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \cdot 100 = \frac{32,10}{32,10 + 3,09} \cdot 100 = 91,22 \% \quad (7.7)$$

Stroj je v prevádzke **približne 91,22 % času**, pričom **8,78 % času je v oprave**, čo môže mať negatívny vplyv na výrobné kapacity a plánovanie produkcie.

Celkovo je súčasný stav na solídnej úrovni, no existuje priestor na optimalizáciu údržby, ktorá by mohla zvýšiť *MTBF*, znížiť *MTTR* a tým zlepšiť celkovú efektivitu strihacieho stroja. V Tabuľke 7.1 sú uvedené skupiny porúch, ktoré nastali na analyzovanom zariadení. Po preskúmaní jednotlivých príčin vzniku daných chýb vyplynulo, že až 52 chýb bolo

spôsobených absenciou autonómnej údržby. Nepravidelné čistenie, mazanie a kontrola mali za dôsledok vznik konkrétnych chýb, a to: vysoká teplota oleja (14 chýb), upchatie pásu (22 chýb), odsun (4 chyby), vypadnutá skrutka (2 chyby) a zaseknutý komponent (10 chýb). Z celkového počtu 229 porúch predstavuje 52 chýb z dôvodu absencie alebo zanedbania autonómnej údržby až 22,71 %.

Keďže jedným zo základných pilierov TPM je autonómna údržba, ďalšia analýza sa zamerala na detailnú analýzu chýb na strižnom stroji, ktoré vznikli v dôsledku jej absencie. V Tabuľke 7.2 sú uvedené výsledky z danej analýzy, ktorá odhalila nedostatočné čistenie, mazanie a kontrolu na strihacom stroji. Uvedené nedostatky so sebou prinášajú aj možné dôsledky, ktoré predstavujú predovšetkým bezpečnostné, zdravotné riziká a nefunkčnosť stroja.

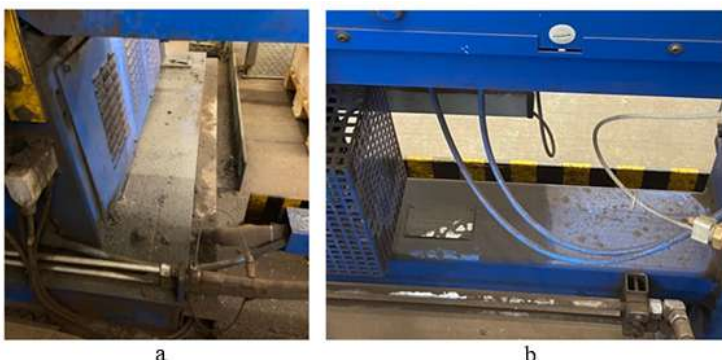
Tabuľka 7.2. Identifikované nedostatky autonómnej údržby na strihacom stroji

ČINNOSŤ	ZISTENÉ NEDOSTATKY	MOŽNÉ DÔSLEDKY
Č I S T E N I E	Znečistenie povrchu a spodnej časti reťazového dopravníka SKB-T190 od prachu a mastnoty.	Zníženie výkonnosti a presnosti stroja. Riziko vzniku požiaru. Dýchacie problémy u zamestnancov. Riziko pošmyknutia a úrazu.
	Znečistenie povrchu a spodnej časti reťazového dopravníka SKB190 od prachu a mastnoty.	Zníženie výkonnosti a presnosti stroja. Riziko vzniku požiaru. Dýchacie problémy. Riziko pošmyknutia a úrazu.
	Znečistenie povrchu zásobníka tyčí SMH 050 od prachu a korózie.	Zníženie výkonnosti a presnosti stroja. Riziko vzniku požiaru. Dýchacie problémy u zamestnancov. Riziko pošmyknutia a úrazu. Mechanické opotrebenie vplyvom korózie.
	Znečistenie povrchu nožníc CADDY 50 od prachu a mastnoty.	Zníženie výkonnosti a presnosti stroja. Riziko vzniku požiaru . Dýchacie problémy. Riziko pošmyknutia a úrazu.
M A Z A N I E	Neprimerané mazanie prestavovacieho vedenia dĺžkového dorazu.	Zvýšené opotrebenie a trenie. Zvýšená poruchovosť a kratšia životnosť stroja. Znížená účinnosť a vyššia spotreba energie. Hluk a vibrácie.
	Neprimerané mazanie uchopovacích klieštín.	Zvýšené opotrebenie a trenie. Zvýšená poruchovosť a kratšia životnosť stroja. Znížená účinnosť a vyššia spotreba energie. Hluk a vibrácie.

ČINNOSŤ	ZISTENÉ NEDOSTATKY	MOŽNÉ DÔSLEDKY
K O N T R O L A	Nepravidelná kontrola. centrálneho mazania .	Zvýšené trenie a opotrebenie súčiastok. Vyššia poruchovosť a neplánované odstávky. Prehrievanie a riziko požiaru. Poškodenie mazacieho systému. Oxidácia súčiastok. Zvýšené bezpečnostné riziká pre zamestnancov.
	Nepravidelná kontrola olejovej banky na premazávanie pneumatického systému.	Zvýšené trenie a predčasné opotrebenie. Nesprávne mazanie pohyblivých častí pneumatického systému (napr. ventily, valce). Kolísanie tlaku a nesprávna funkcia pneumatických systémov. Usadzovanie nečistôt v potrubiach a pneumatických prvkoch. Zvýšená poruchovosť a neplánované odstávky. Zvýšená spotreba energie.
	Nepravidelná kontrola indikátora hladiny oleja.	Nedostatočné mazanie a zvýšené opotrebenie súčiastok . Riziko prehriatia a zlyhania systému. Nesprávna funkcia hydraulických a mazacích systémov. Hromadenie nečistôt a kontaminácia oleja. Úniky oleja a environmentálne riziká. Zvýšené náklady na opravy a údržbu. Riziko úplného zlyhania stroja.

Nedostatočné čistenie

Nedostatočné čistenie bolo identifikované na viacerých častiach deliaceho stroja. Znečistenie masným prachom zobrazené na Obr. 7.9 so sebou prináša viacero rizikových faktorov, ktoré súvisia s vysokým rizikom vzniku požiaru pri kontakte s iskrou alebo vysokou teplotou. Masný prach sa môže uvoľňovať do ovzdušia, čo môže spôsobovať dýchacie problémy výrobných zamestnancov, špinavé a zanesené stroje môžu vytvárať nepríjemné a nebezpečné pracovné podmienky, čo negatívne ovplyvňuje morálku zamestnancov, zvyšuje riziko pošmyknutia a úrazov na klzkom povrchu.

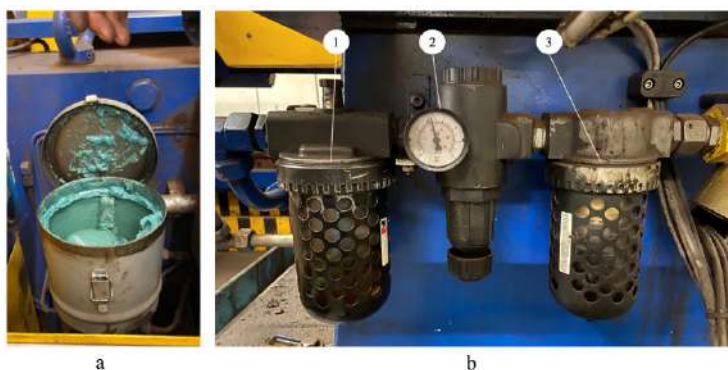


Obr. 7.9. Znečistenie deliaceho stroja (Jurčová, 2024)

a – spodná časť nožníc na strihanie tyčovej ocele CADDY 50, b – reťazový dopravník SKB 190

Nedostatočné mazanie a kontrola

Zanedbaná kontrola indikátora hladiny oleja, olejovej banky na premazávanie pneumatického systému (Obr. 7.10b) a nepravidelná kontrola centrálneho mazania stroja (Obr. 7.10a), môžu viesť k vážnym prevádzkovým problémom a poruchám. Nedostatočné mazanie jednotlivých častí stroja môže spôsobiť zvýšené trenie a opotrebenie súčiastok, čo vedie k ich rýchlejšiemu poškodeniu, prehrievaniu a vzniku mikrotrhlín. Zvýšené trenie je priamo úmerné zvyšovaniu spotreby energie, keďže stroj musí vynaložiť väčšiu silu na svoj pohyb. Nedostatok maziva v pohyblivých častiach strihacieho zariadenia môže viesť k prehriatiu kľúčových komponentov, čo zvyšuje riziko ich zlyhania a v extrémnych prípadoch môže dôjsť až k vzniku iskier a požiaru. Ak sa mazanie pravidelne nekontroluje, môže dôjsť k upchatiu alebo nefunkčnosti mazacieho systému, k hromadeniu nečistôt a ontaminácií oleja, čo so sebou prináša ďalšie poškodenia pohyblivých častí ako aj environmentálne riziko pri úniku oleja. V hydraulických a mazacích systémoch môže nedostatočné mazanie spôsobiť výpadky tlaku a nesprávnu funkciu mechanizmov. Zanedbanie pravidelnej kontroly mazacích systémov tak môže mať ekonomické, bezpečnostné aj environmentálne dôsledky, pričom preventívna údržba je vždy menej nákladná než opravy spôsobené jej zanedbaním.



*Obr. 7.10. Nedostatočná kontrola a mazanie (Jurčová, 2024)
a – centrálne mazanie, b – olejová banka na premazávanie pneumatického systému : 1 – olejnička,
2 – redukčný ventil, 3 – filter*

7.2.2 Zhodnotenie činností autonómnej údržby na strihacom stroji

Na základe vykonanej analýzy na vybranom strihacom zariadení, bolo v rámci autonómnej údržby identifikovaných viacero nedostatkov. Prvý nedostatok sa týka prestojov, ktoré boli viditeľné z výsledkov analýzy chýb, ktoré v priebehu dvoch rokov nastali na profilových nožniciach. Až 22,71 % z celkového počtu porúch bolo spôsobených zanedbanou alebo nefungujúcou autonómnou údržbou, ktorá súvisí s činnosťami ako je čistenie, mazanie a pravidelná kontrola jednotlivých častí výrobného zariadenia. Celkovo tak prestoje spôsobené týmto typom chýb trvali až 10 869 min. Každý minúta prestoja predstavuje pre podnik viaceré nevýhody, ktoré negatívne ovplyvňujú efektivitu, náklady a konkurencieschopnosť podniku. Jedným z hlavných problémov je finančná strata spôsobená nečinnosťou výrobných zariadení, keďže aj napriek zastavenej výrobe podnik stále nesie fixné náklady, ako sú mzdy zamestnancov alebo energie. Dlhšie prestoje môžu viesť k oneskoreniu výroby a dodávok, čo môže spôsobiť nespokojnosť zákazníkov,

poškodenie obchodných vzťahov a dokonca aj stratu zákazníkov v prospech konkurencie. Preto je dôležité minimalizovať výrobné prestoje prostredníctvom pravidelnej údržby a kontroly deliaceho stroja, ktoré je možno v rámci TPM dosiahnuť aj dodržiavaním autonómnej údržby. Druhý nedostatok, ktorý vyplýva z realizovanej analýzy, súvisí s množstvom rizík, ktoré prináša zanedbanie hlavných činností autonómnej údržby ako čistenie, mazanie a kontrola. Nedostatočná starostlivosť o strojné zariadenia spôsobuje postupné zníženie ich výkonnosti a presnosti, čo vedie k nekvalitnej výrobe a zvýšenému množstvu nezhodných produktov. Mechanické opotrebenie vplyvom korózie a zvýšené trenie súčastok majú za následok rýchlejšie poškodenie komponentov, vyššiu poruchovosť a neplánované odstávky, ktoré znižujú produktivitu a zvyšujú náklady na opravy. Okrem technických problémov má nedostatočná údržba aj vážne dôsledky na bezpečnosť a zdravie zamestnancov. Hromadenie mastného prachu a nečistôt v kombinácii s prehrievaním môže spôsobiť požiar, pričom zanedbané pracovné prostredie zvyšuje riziko pošmyknutia a úrazov. Prachové častice a výpary môžu spôsobovať dýchacie problémy zamestnancov, čím sa znižuje ich pracovná pohoda a zdravie. Všetky tieto faktory zvyšujú celkové bezpečnostné riziká na pracovisku a môžu viesť k vážnym nehodám či finančným stratám pre podnik. Preto je pravidelná autonómna údržba nevyhnutná na zabezpečenie spoľahlivosti, efektívnosti a bezpečnosti výrobných procesov.

7.3 Optimalizácia úrovne autonómnej údržby na vybranom stroji v priemyselnom podniku

Autonómna údržba je jedným zo základných pilierov Totálne produktívnej údržby (TPM) a zohráva kľúčovú úlohu pri zvyšovaní spoľahlivosti a efektivity výrobných zariadení. Jej hlavným cieľom je zapojiť operátorov priamo do procesu údržby, čím sa znižuje závislosť od špecializovaných údržbárskych tímov a predchádza sa tak neplánovaným prestojom. V rámci TPM autonómna údržba zabezpečuje pravidelné čistenie, mazanie, vizuálnu kontrolu a jednoduché opravy, čím sa predchádza predčasnému opotrebovaniu a poruchám zariadení.

Cieľom zavedenia autonómnej údržby na automatickej linke na delenie tyčového materiálu je predovšetkým zapojenie obsluhy linky do údržbárskych činností, a tým zvýšenie celkovej efektívnosti zariadenia (OEE) pri súbežnej eliminácii nežiaducich porúch a prestojov, ktoré sú popísané v predchádzajúcej kapitole.

Zavedenie autonómnej údržby je postupný proces, ktorý si vyžaduje zapojenie zamestnancov, podporu manažmentu a systematickú implementáciu. V nasledujúcich kapitolách je opísaný proces zavádzania autonómnej údržby na vybranej automatickej linke na delenie tyčového materiálu na základe 7. krokov uvedených a opísaných v kapitole 7.1.3.1.

7.3.1 Prvý krok autonómnej údržby: Počiatočné čistenie

Prvým krokom autonómnej údržby je *dôkladné vyčistenie stroja a odstránenie zdrojov znečistenia*, akými sú prach, mastnota, či korózia. Operátori pritom kontrolujú jednotlivé časti automatickej linky na delenie tyčového materiálu a identifikujú možné poruchy, ktoré môžu viesť k opotrebovaniu alebo zvýšenej potrebe údržby.

Doterajšie znečistenie reťazového dopravníka SKB-T190, zásobníka tyčí a nožníc masným prachom a koróziou sťažovalo prácu údržby a mohlo spôsobovať prehrievanie,

vibrácie alebo uvoľnenie komponentov. Analýza súčasného stavu odhalila výrazné znečistenie linky, ako aj vysokú hlučnosť (>90 dB) a vibrácie.

Na Obr. 7.11 je znázornený stav reťazového dopravníka SKB-T190 pred a po čistení. Po odstránení hrubej vrstvy prachu a mastnoty pomocou stlačeného vzduchu a ručného dočistenia handrou sa potom skontrolovali aj možné defekty, ktoré mohli byť spôsobené znečistením masným prachom.



Obr. 7.11. Vyčistenie reťazového dopravníka SKB-T190 (Jurčová, 2024)
a – stav pred vyčistením, b – stav po vyčistení

7.3.2 Druhý krok autonómnej údržby: Eliminácia zdrojov znečistenia

Druhým krokom autonómnej údržby je *eliminácia zdrojov znečistenia*, ktorej cieľom je predísť opätovnému hromadeniu nečistôt a zabezpečiť dlhodobú čistotu a správnu funkčnosť stroja. Po dôkladnom vyčistení zariadenia je potrebné identifikovať a odstrániť príčiny znečistenia, ako sú netesnosti mazacieho systému, nesprávne nastavené kryty, nahromadený prach či úniky oleja. Ak sa znečistenie vytvára nadmerne, je potrebné zhodnotiť možnosti jeho minimalizácie zmenou technologického postupu alebo pracovných podmienok.

Pri procese čistenia a kontroly je dôležité, aby boli zistené nedostatky riadne zaznamenané a opísané. Na Obr. 7.12 je uvedený formulár, ktorého cieľom je opis zistených nezrovnalostí, príčiny ich vzniku a konštrukčná časť deliaceho stroja (profilových nožníc), kde bola zaznamenaná abnormalita. Formulár budú mať k dispozícii operátori výroby priamo na pracovisku a v prípade výskytu problému do neho zapíšu potrebné informácie. Tento formulár sa môže využiť aj pri školení alebo tréningu zamestnancov s cieľom predchádzať podobným poruchám v budúcnosti.

ZOZNAM ZISTENÝCH NEDOSTATKOV NA DELIACOM STROJI				
P. č.	OPIS NEDOSTATKU:	PRÍČINA VZNIKU:	KONŠTRUKČNÁ ČASŤ:	NÁPRAVNÉ OPATRENIE:
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				
6.				
7.				
8.				
9.				
10.				
11.				
12.				
13.				
14.				
15.				
Dátum:		Vypracoval:		Schválil:

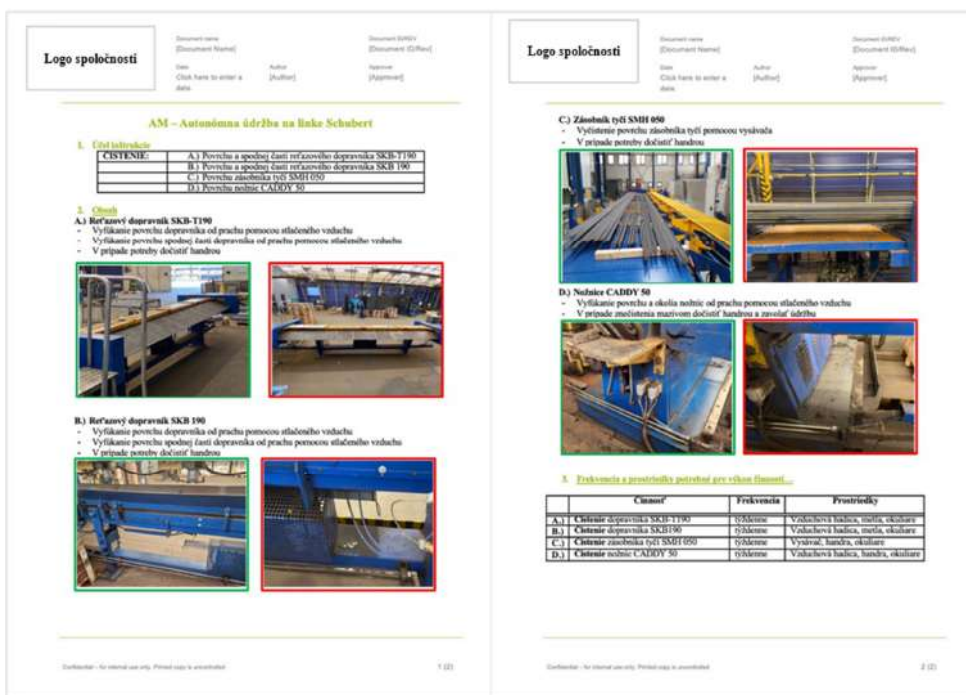
Obr. 7.12. Formulár zistených nedostatkov na profilových nožniciach (Jurčová, 2024)

7.3.3 Tretí krok autonómnej údržby: Normy čistenia a mazania

Po odstránení nečistôt a identifikácii zdrojov znečistenia je potrebné definovať štandardizované postupy údržby, aby sa zabránilo ich opätovnému hromadeniu a minimalizovalo sa opotrebenie komponentov. Tretí krok autonómnej údržby tak zahŕňa vytvorenie dočasných *štandardov na čistenie, mazanie a kontrolu na deliacom stroji (profilových nožniciach)*. Dodržiavaním týchto štandardov sa predchádza neplánovaným poruchám, zvyšuje sa spoľahlivosť zariadenia a predlžuje jeho životnosť. Zavedené štandardy zároveň uľahčujú operátorom ich pravidelnú údržbu a prispievajú k vyššej efektívnosti výroby.

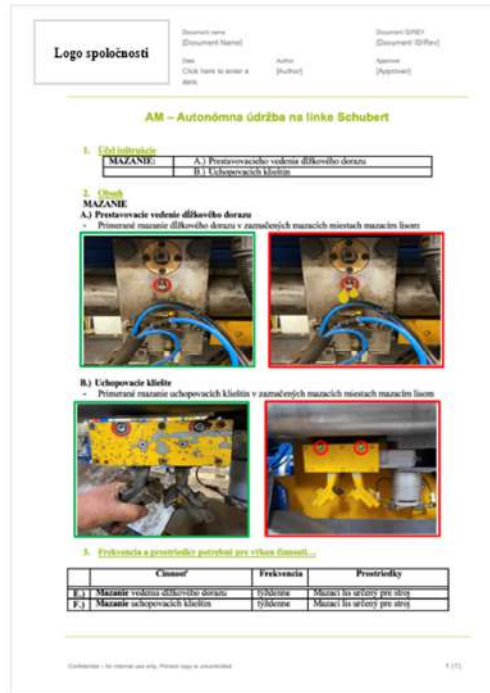
Normy čistenia zahŕňajú presné metódy, frekvenciu a zodpovednosti za čistenie jednotlivých častí stroja. Určuje sa, aké nástroje a prostriedky sa používajú, aké kritické miesta si vyžadujú zvýšenú pozornosť a ako sa zaznamenáva priebeh čistenia. Normy mazania definujú správne typy mazív, intervaly premazávania a kritické body mazania, aby sa zabezpečil plynulý chod zariadenia. Správne mazanie predchádza nadmernému treniu, prehrievaniu a predčasnému opotrebovaniu pohyblivých častí stroja. Obsluha strihacieho stroja musí byť s jednotlivými úkonmi dôkladne oboznámená a musí porozumieť ich významu a dôsledkom. Spolupráca s technickým manažérom, operátormi a pracovníkmi oddelenia údržby v analyzovanom podniku viedla k vypracovaniu nasledujúcich štandardov:

- **Štandard na čistenie** – vypracovaný vizuálny štandard na čistenie je uvedený na Obr. 7.13. a pozostáva z troch hlavných častí, a to: *Účel inštrukcie, Obsah a Frekvencia a prostriedky potrebné pre výkon činností*. Uvedené obrázky vizuálne poukazujú na nežiadúci stav (NOK, červený obrys obrázku) a požadovaný stav (OK, zelený obrys obrázku) čistoty povrchu jednotlivých častí výrobnej linky.

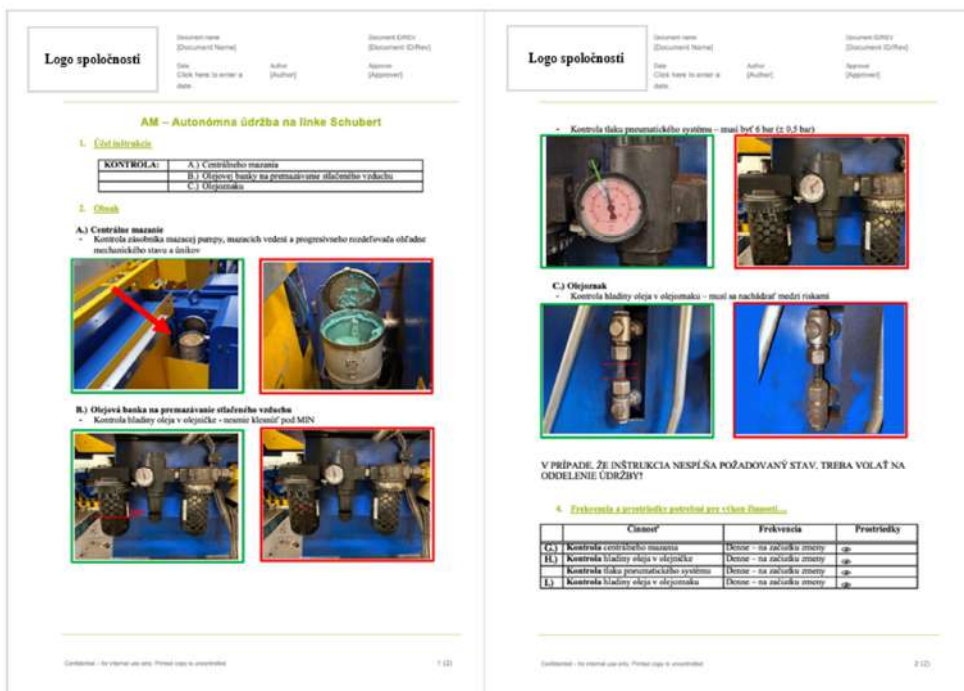


Obr. 7.13. Vizuál štandardu na čistenie (Jurčová, 2024)

- **Štandard na mazanie** – vizuálny štandard na mazanie, uvedený na Obr. 7.14 bol vypracovaný na základe odporúčaní výrobcu deliaceho stroja a mazacieho plánu. Obsluha bola počas TPM workshopu poučená o správnom postupe mazania, umiestnení mazacích bodov, optimálnom množstve maziva a použití vhodného typu maziva.
- **Štandard na kontrolu** – vizuálny štandard uvedený na Obr. 7.15 obsahuje účel inštrukcie, presne definované pracovné miesta, fotografie správneho (OK) a nesprávneho (NOK) stavu, frekvenciu kontroly a zoznam potrebných pracovných prostriedkov. Jeho hlavným cieľom je zabezpečiť kontrolu centrálneho mazania, pneumatickej sústavy a indikátora hladiny oleja, ktoré musia byť skontrolované každé ráno na začiatku zmeny. V prípade, že inštrukcia nespĺňa požadovaný stav, operátor nesmie sám dopĺňať mazivo ani vykonávať úpravy. Je povinný upozorniť na túto skutočnosť pracovníkov oddelenia údržby.



Obr. 7.14. Vizual štandardu na mazanie (Jurčová, 2024)



Obr. 7.15. Vizual štandardu na kontrolu (Jurčová, 2024)

7.3.4 Štvrtý krok autonómnej údržby: Všeobecná kontrola

Obsahom štvrtého kroku autonómnej údržby v rámci TPM je **všeobecná kontrola**, ktorá rozširuje zručnosti operátorov v oblasti diagnostiky stroja a identifikácie potenciálnych problémov formou školenia. Po zavedení štandardov čistenia a mazania sa operátori učia systematicky kontrolovať stroj z hľadiska mechanických, elektrických a bezpečnostných aspektov.

Školenie v analyzovanom podniku vykonáva poverený zamestnanec s dostatočnými skúsenosťami so strihacím strojom. Operátori sú školení, aby rozpoznali abnormality včas a dokázali ich správne hlásiť alebo odstrániť jednoduchými zásahmi, čím sa znižuje riziko neočakávaných porúch. Zároveň netreba opomenúť aj osvetu ohľadom dôležitosti autonómnej údržby ako jedného z hlavných pilierov TPM, ktorá sa výrazne podieľa na eliminácii porúch. Z tohto dôvodu bol vytvorený návrh plagátu (Obr. 7.16), ktorý by zamestnancov podniku jednoducho a prehľadne informoval o spomínaných výhodách a krokoch autonómnej údržby.



Obr. 7.16. Návrh plagátu na osvetu autonómnej údržby (Jurčová, 2024)

7.3.5 Piaty krok autonómnej údržby: Autonómna kontrola

Autonómna kontrola je kľúčovým krokom autonómnej údržby, pri ktorom operátori preberajú väčšiu zodpovednosť za pravidelnú diagnostiku a údržbu svojho zariadenia. Po zvládnutí základných činností, ako je čistenie, mazanie a všeobecná kontrola, sa operátori učia vykonávať pokročilejšie kontrolné úkony a identifikovať potenciálne problémy ešte skôr, než spôsobia poruchy alebo prestoje. V tomto kroku sa zavádzajú podrobné kontrolné zoznamy (checklisty), ktoré operátorom pomáhajú systematicky preverovať stav stroja. Kontrolujú sa napríklad vibrácie, rizikové teploty, úrovne mazív, opotrebenie dielov,

uvoľnené spoje a iné kritické parametre. Operátori sa zároveň učia analyzovať získané údaje a rozhodovať, kedy je potrebné vykonať zásah alebo privolať odbornú údržbu.

Týždeň	ČISTENIE dopravníka SKB-T190	ČISTENIE dopravníka SKB 190	ČISTENIE zásobníka tyčí SMH 050	ČISTENIE nožnic CADDY 50	MAZANIE vedenie dĺžkového doražu	MAZANIE uchopovacích klieštín	KONTROLA centrálneho mazania	KONTROLA hladiny oleja v olejníčke	KONTROLA tlaku pneumatického systému	KONTROLA hladiny oleja v olejozisku	Vykonal:
Pondelok	podpis	n/a									
Utorok											
Streda											
Štvrtok											
Piatok											

Obr. 7.17. Checklist vykonávania autonómnej údržby (Jurčová, 2024)

Na základe konzultácií s technickým manažérom, operátormi a pracovníkmi oddelenia údržby bol vytvorený návrh vizuálneho štandardu autonómnej údržby, ktorý presne definuje jednotlivé úlohy operátorov výroby. Tento štandard zahŕňa pracovné činnosti, ktoré je potrebné pravidelne vykonávať v rámci denného plánu autonómnej údržby, a je znázornený na Obr. 7.18. Pracovné úlohy boli navrhnuté v spolupráci s hlavným pracovníkom oddelenia údržby, ktorý sa pravidelne stará o strihací stroj. Vizuálny štandard obsahuje podrobné inštrukcie na vykonávanie jednotlivých úloh, vrátane fotografií zariadení, na ktorých sa majú práce realizovať. Obsluha deliaceho stroja bude zaznamenávať vykonané úlohy do checklistu výkonu autonómnej údržby (Obr. 7.17), ktorá predstavuje týždenný kontrolný plán aktivít autonómnej údržby. Zodpovedný pracovník eviduje, či boli všetky predpísané úlohy riadne vykonané. Je nevyhnutné pravidelne kontrolovať, či autonómna údržba prebieha v súlade so stanovenými štandardmi a či sú všetky záznamy riadne evidované. Túto kontrolu by mal vykonávať člen tímu, ktorý sa podieľal na implementácii autonómnej údržby.

7.3.6 Šiesty krok autonómnej údržby: Organizácia a poriadok

V tomto kroku sa operátori sústreďujú na *zavedenie a udržiavanie systematického poriadku v pracovnom prostredí*, čím sa zabezpečí efektívnejšia údržba a prevádzka zariadenia. Hlavným cieľom je minimalizovať plytvanie časom, zvýšiť produktivitu a predísť vzniku porúch spôsobených neporiadkom alebo nesprávnym usporiadaním pracoviska. Operátori označujú a usporadúvajú náradie, náhradné diely a spotrebný materiál tak, aby boli vždy na správnom mieste a ľahko dostupné.

Kľúčovým prvkom šiesteho kroku autonómnej údržby v analyzovanom podniku je správne usporiadanie a umiestnenie vytvorených štandardov pre čistenie, mazanie a kontrolu tak, aby boli pre obsluhu strihacieho stroja ľahko dostupné. Tieto štandardy môžu byť umiestnené na nástenke pri strihacom stroji, ktorá je viditeľná a prístupná pre všetkých zamestnancov. Nástenka slúži na prehľadné zobrazenie všetkých dôležitých informácií týkajúcich sa autonómnej údržby a zabezpečuje, že pracovníci majú k dispozícii aktuálne a presné inštrukcie. Návrh nástenky štandardov a kontroly autonómnej údržby je znázornený na Obr. 7.19.

Logo spoločnosti	Oblasť podnikania (Business Area)	Dokument číslo (Document ID/Ver)
	Dátum (Date)	Podpis (Signature)
	Oblasť podnikania (Business Area)	Podpis (Signature)
	Dátum (Date)	

AM – Automatizovaná držiaka na linka Schenker

1. Objednávka

OBJEDNÁVKA

A.1. Poručba, a spôsob, (čas) na montáž držiaka SKB-1100

B. Poručba, a spôsob, (čas) na montáž držiaka SKB-1100

C. Poručba, skúšobná typ SKB-1100

D. Poručba linka CAGST 50

E. Poručba, skúšobná, systémy držiaka držiaka

F. J. Objednávka skúšobná

KONTROLA:

G. Kontrola montáže

H. Objednávka, (čas) na montáž skúšobná, skúšobná

I. Objednávka

2. Objednávka

OBJEDNÁVKA

A.1. Refakčný držiak SKB-1100

- Vykazuje poruchu držiaka na prahu montáže skúšobná
- Vykazuje poruchu spôsob, (čas) držiaka na prahu montáže skúšobná
- V prípade potreby, (čas) držiaka




B.1. Refakčný držiak SKB-1100

- Vykazuje poruchu držiaka na prahu montáže skúšobná
- Vykazuje poruchu spôsob, (čas) držiaka na prahu montáže skúšobná
- V prípade potreby, (čas) držiaka

3. Objednávka

OBJEDNÁVKA

A.1. Refakčný držiak SKB-1100

- Vykazuje poruchu držiaka na prahu montáže skúšobná
- Vykazuje poruchu spôsob, (čas) držiaka na prahu montáže skúšobná
- V prípade potreby, (čas) držiaka




Stránka 1 z 1

1

Logo : po levo črtnici	Opisovanje stroja (Description of Machine)	Docena stroja (Machine ref. Code)
	Ime (Click here to enter a name)	Ime stroja (Machine ref.)

C.3 Zastavala tipa SMD 080

- Vplavljeni perneči s zidovino tebi potopnosti vstavlja
- V prilozi potopnosti določiti lastnosti




B.3 Naloga CADOV 80

- Vplavljeni perneči s zidovino tebi potopnosti vstavlja
- V prilozi potopnosti določiti lastnosti s zidovino tebi




MAKANER

L.1 Prostor za vložitev določene določene

Prostor za vložitev določene določene s zidovino tebi potopnosti vstavlja




Logo spoločnosti		Ročník výroby (Document Year)	Ročník vydání (Document Year)
Oprava (Repair)		Název (Name)	Název (Name)
Dátum (Date)		Podpis (Signature)	Podpis (Signature)
F.) Vytváření kufříku - Přeměna motoru a odspárování kufříku v zkušebních motorch s motorovou hřídelí  			
KONTROLA C.) Kontrola motoru - Kontrola elektrické izolace motoru, motoru ke volání a propojeního rozvodu elektrického motoru ke volání a izolace  			
H.) Ověření funkce na přeměnitelném elektrickém motoru - Kontrola motoru elektrického motoru (motor elektrického motoru)  			

[illegible]

Obr. 7.18. Vizuál štandardu autonómnej údržby na deliacom stroji (Jurčová, 2024)



Obr. 7.19. Tabuľa autonómnej údržby (Jurčová, 2024)

7.3.7 Siedmy krok autonómnej údržby: Rozvoj autonómnej údržby

V poslednom kroku autonómnej údržby je kľúčové, aby bola táto metóda už plne *implementovaná a integrovaná do každodenných pracovných postupov*. Životne dôležitým aspektom fungujúceho systému autonómnej údržby je neustále sledovanie a zaznamenávanie zistených nedostatkov či abnormalít do zoznamu nedostatkov na deliacom stroji. Úspešná implementácia autonómnej údržby sa prejavuje tým, že obsluha strihacieho stroja pristupuje k zariadeniu s vysokou mierou zodpovednosti. Operátor autonómne vykonáva pravidelné kontroly, preventívne opatrenia a jednoduché údržbárske úkony, čím neustále rozvíja svoje schopnosti a odborné znalosti. Na podporu neustáleho zlepšovania majú pracovníci možnosť predkladať vlastné návrhy prostredníctvom Kaizen formulára (Obr. 7.20). Vyplnené formuláre sa vkladajú do Kaizen schránky umiestnenej pri strihacom stroji. Následne vedenie spoločnosti alebo poverený zamestnanec posúdi návrhy a rozhodne o ich schválení. Aby boli pracovníci motivovaní k aktívnej účasti na zlepšovaní procesov a prevádzky automatickej linky na delenie tyčového materiálu, je nevyhnutné zaviesť systém odmeňovania za schválené návrhy. Odmeny môžu byť finančné, pričom ich výška závisí od rozhodnutia vedenia spoločnosti, alebo nefinančné, ako napríklad deň voľna, hodnotné darčeky (hodinky, poukážky a pod.). Výsledkom tohto kroku je efektívnejšia a systematickejšia autonómna údržba, ktorá prispieva k dlhodobej spoľahlivosti strojov, znižuje výskyt neplánovaných odstávok a zvyšuje celkovú produktivitu podniku.

KAIZEN FORMULÁR		Logo spoločnosti
Základné informácie: Meno a priezvisko zamestnanca: _____ Číslo zamestnanca: _____ Pracovisko: _____		
Popis aktuálneho stavu: 	Popis návrhu zlepšenia: 	
Kategória: ☐ Zlepšenie procesu ☐ Úspora nákladov ☐ Zvýšenie kvality ☐ Dočasná oprava ☐ Dlhodobá oprava ☐ Bezpečnosť ☐ Zákaznícky servis ☐ Iné: _____		
Dátum podania formulára: _____ Dátum prevzatia formulára: _____ Formulár prevzal: _____ Podpis: _____ ☐ Schválené ☐ Neschválené Odôvodnenie: _____ 		

Obr. 7.20. Kaizen formulár (Jurčová, 2024)

Záver

Autonómna údržba bola na deliacom stroji v analyzovanom priemyselnom podniku zavedená v rámci opätovného zavádzania metódy TPM. Autonómna údržba, ako jeden zo základných pilierov TPM, zabezpečuje pravidelné čistenie, mazanie, vizuálnu kontrolu a jednoduché opravy, čím sa predchádza predčasnému opotrebovaniu a poruchám zariadení. Pravidelná starostlivosť o výrobné zariadenia pomáha udržiavať ich optimálnu výkonnosť, čím sa znižuje výskyt chýb vo výrobe a zlepšuje sa kvalita produkcie. Okrem toho prispieva k zvýšeniu bezpečnosti na pracovisku, pretože operátori dokážu včas identifikovať potenciálne riziká, ako sú úniky oleja, opotrebenie komponentov alebo hromadenie nečistôt, ktoré by mohli viesť k úrazom alebo požiarom. Autonómna údržba zároveň podporuje angažovanosť zamestnancov a rozvoj ich technických zručností, pretože sa učia lepšie rozumieť fungovaniu strojov a identifikovať problémy v počiatočnom štádiu. Vďaka tomu sa znižujú náklady na opravy a zvyšuje sa celková efektivita výrobného procesu. Tento prístup zároveň prispieva k zlepšeniu kultúry neustáleho zlepšovania (Kaizen) a tímovej spolupráce, čím sa podnik stáva flexibilnejším a konkurencieschopnejším. V konečnom dôsledku autonómna údržba v rámci TPM prináša dlhodobé výhody v podobe spoľahlivejšej výroby, nižších nákladov na údržbu a vyššej spokojnosti zákazníkov.

Zavádzanie autonómnej údržby v analyzovanom priemyselnom podniku prebiehalo na vybranom strihacom stroji na základe siedmych krokov. Obsahom každého kroku, bola aj tvorba potrebných dokumentov a formulárov, ktoré v podniku doteraz chýbali. Absencia týchto dokumentov sa prejavila na značnom počte prestojov, spôsobených poruchami,

ktorých spoločným menovateľom bola nedostatočné čistenie, mazanie a kontrola analyzovaného strihacieho stroja.

V prvom kroku bol vypracovaný formulár zistených nedostatkov na deliacom stroji, ktorý umožňuje systematickú evidenciu problémov, ich príčin a potenciálnych riešení. Je možno ho použiť aj pri školení zamestnancov, kde poslúži pri tvorbe preventívnych opatrení reálnych chýb. V rámci ďalších krokov boli vypracované vizuálne štandardy na čistenie, kontrolu a mazanie, ktoré podrobne opisujú vykonávanie jednotlivých činností, ktoré sú nevyhnutné na bezporuchovú činnosť výrobného zariadenia.

V rámci osvetvy autonómnej údržby bol vytvorený plagát, ktorý nenásilným spôsobom informuje výrobných zamestnancov o dôležitosti a krokoch autonómnej údržby ako súčasti TPM. Osveta medzi zamestnancami pri zavádzaní TPM je kľúčová pre úspešnú implementáciu tejto stratégie v podniku. TPM si vyžaduje nielen aktívnu účasť oddelenia údržby, ale aj zapojenie všetkých zamestnancov, preto je dôležité, aby rozumeli jeho významu a prínosom. Keď zamestnanci chápu, prečo je TPM dôležité, sú viac angažovaní a ochotní prevziať spoluzodpovednosť za stav strojov a zariadení. To vedie k rýchlejšej identifikácii problémov, čím sa znižujú neplánované prestoje a poruchy a zároveň sa zvyšuje bezpečnosť na pracovisku, keďže správna starostlivosť o zariadenia pomáha predchádzať možným úrazom. Angažovanosť pracovníkov sa prejavuje aj počtom zlepšovacích návrhov, ktoré môžu zamestnanci podniku spracovať do vytvoreného Kaizen formulára, za ktorý budú aj náležite odmenení.

Bez dôkladnej osvetvy a zapojenia pracovníkov by zavádzanie TPM v podniku mohlo opäť zlyhať, pretože bez ich pochopenia a aktívnej účasti nie je možno dosiahnuť dlhodobé výsledky. Preto je nevyhnutné venovať dostatočnú pozornosť školeniam a komunikácii, aby si zamestnanci osvojili správne postupy a vnímali TPM ako nástroj, ktorý im pomáha zlepšovať ich každodennú prácu.

Zoznam bibliografických odkazov

AHUJA, I. P. S. and KHAMBA, J. S. 2008. Total productive maintenance: literature review and directions. *International Journal of Quality & Reliability Management*, V. 25, Number 7, 2008, Pages 709-756. ISSN 0265-671X. [online] [cit. 2024-12-11] Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1108/02656710810890890>.

BOLEDOVIČ, Ľ. 2017a. *Autonómna údržba*. [online] [cit. 2024-12-11]. Dostupné na internete: <https://www.ipaslovakia.sk/clanok/autonomna-udrzba>.

BOLEDOVIČ, Ľ. 2017b. *CEZ (OEE)*. [online] [cit. 2025-03-20]. Dostupné na internete: <https://www.ipaslovakia.sk/clanok/cez-oeo>.

ČERVEŇAN, A. 2015. *Systém údržby*. Bratislava 2015: CKV Consult, spol. s r. o. 68 s. ISBN 978-80-971986-0-2.

CHEAH, CH. K., PRAKASH, J. and ONG, K. S. 2020. Overall equipment effectiveness: a review and development of an integrated improvement framework In. *International Journal of Productivity and Quality Management (IJPQM)*. V. 30, No. 20. ISSN: 1746-6474. [online] [cit. 2025-03-20]. DOI:10.1504/IJPQM.2019.10020889.

DRAHŇOVSKÝ, J. 2011. *TPM in Slovakia*. Trnava: Vydavateľstvo STU MTF. 121 s. ISBN 978-83-7729-113-9.

EAST-GATE 2024. *KPIs v systéme údržby*. [online] [cit. 2024-12-05]. Dostupné na internete: <https://www.east-gate.eu/sk/maintenance/kpi>.

FESTO 2024. *Ako zlepšiť KPI údržby pomocou CMMS*. [online] [cit. 2024-12-05]. Dostupné na internete: https://www.festo.com/sk/sk/e/o-spolocnosti-festo/blog/innovation/kpi-udrzby-s-cmms-id_1933169/.

GREŇČÍK, J., a kol. 2020. *Manažérstvo údržby II*. Košice 2020: BEKI Design. 630 s. ISBN 978-80-553-3539-1.

HAMASHA, M. M., BANI-IRSHID, A. H., AL-MASHAQBEH, S., SHWAHEEN, G., AL-QADRI, L., SHBOOL, M., MUATHEN, D., ABABNEH, M., HARFOUSH, S., ALBEDOOR, Q. and AL-BASHIR, A. 2023. Strategical selection of maintenance type under different conditions. In *Scientific Report*. Volume 13, 2023, 15560. ISSN 2045-2322. [online] [cit. 2024-12-05]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42751-5>.

JURČOVÁ, S. 2024. Návrh zlepšenia úrovne autonómnej údržby v podniku Peikko Slovakia spol. s r. o. Trnava: STU MTF. 87s. Diplomová práca. 2024.

PAČAIOVÁ, H., HIJJ, J., DARVAŠI, P. a FIRMENTOVÁ, K. 2020. Manažérstvo údržby – základné princípy. *Údržba 1-2*. 12. ISSN 2729-8396.

PLONKA, D. 2014. *Technická diagnostika*. [online]. [cit. 2025-01-18]. Dostupné na internete: <https://slideplayer.cz/slide/2451946/>.

Predictive maintenance. 2023. *What is predictive maintenance (PdM)?*. [online]. [cit. 2023-12-05]. Dostupné na internete: <https://fixsoftware.com/maintenance-strategies/predictive-maintenance/>.

RÁZGOVÁ, B. 2018. *Prediktivní systém údržby výrobních stroju ve strojírenské praxi*. Fakulta strojírenského inženýrství, Vysoké učení technické v Brně. Bakalárska práca [online]. [cit. 2025-01-13]. Dostupné na internete: https://theses.cz/id/6mkve5/2018_BP_Razgova_Benedikta_183831.pdf?lang=cs.

SOUALHI, M. 2021. Contribution to intelligent monitoring and failure prognostics of industrial systems. Doktorandská práca. [online]. [cit. 2025-12-01]. Dostupné na internete: <https://theses.hal.science/tel-04169311/>.

Ukážka školiacich materiálov. 2013. *TPM a Autonómna údržba*. [online]. [cit. 2024-12-05]. Dostupné na internete: <https://www.slideshare.net/slideshow/autonmna-drba/27382874#1>.

Pod'akovanie

Tento príspevok vznikol v rámci projektu: *Implementácia inovatívnych foriem učenia a praktického tréningu do vzdelávania v oblasti výrobných technológií a výrobného manažmentu s cieľom zvýšiť atraktivnosť štúdia a podporiť rozvoj prierezových kompetencií absolventov (026STU-4/2023)*, s podporou agentúry KEGA MŠVVaŠ SR.

8 KOMBINOVANIE PASÍVNEJ A AKTÍVNEJ METÓDY TRIANGULÁCIE PRI 3D DIGITALIZÁCI

MOROVÍČ, L.

Úvod

V oblasti 3D digitalizácie sa v posledných rokoch významne zlepšili metódy, ktoré umožňujú zachytávanie a rekonštrukciu rozmerných objektov s vysokou presnosťou. Medzi najpoužívanjšie prístupy patrí fotogrametria (pasívna triangulácia) a metóda merania štruktúrovaným svetlom (aktívne triangulácia). Tieto technológie, aj keď sú účinné samostatne, sa čoraz častejšie kombinujú, čím vznikajú hybridné metódy, ktoré umožňujú efektívnejšiu 3D digitalizáciu aj tvarovo zložitejších a rozmernejších objektov.

Význam 3D digitalizácie navyše rastie aj v súvislosti s rozvojom aditívnej výroby (*Additive Manufacturing – AM*) a technológií pre rýchlu výrobu nástrojov (*Rapid Tooling – RT*) (Morovič, 2003), kde presné digitálne modely zohrávajú kľúčovú úlohu pri tvorbe funkčných prototypov, hotových výrobkov a foriem.

Cieľom tejto kapitoly je stručne uviesť kombinované metódy triangulácie pri 3D digitalizácii objektov, pričom pozornosť bude venovaná najmä spojeniu fotogrametrie a meraniu štruktúrovaným svetlom. Táto kombinácia prináša výhody v oblasti presnosti a flexibility, čo je kľúčové pri zachytávaní geometrických detailov aj v prípade objektov s neštandardnými tvarmi a väčšími rozmermi (ako napr. blatník historického motorového vozidla – pozri kapitolu 8.5).

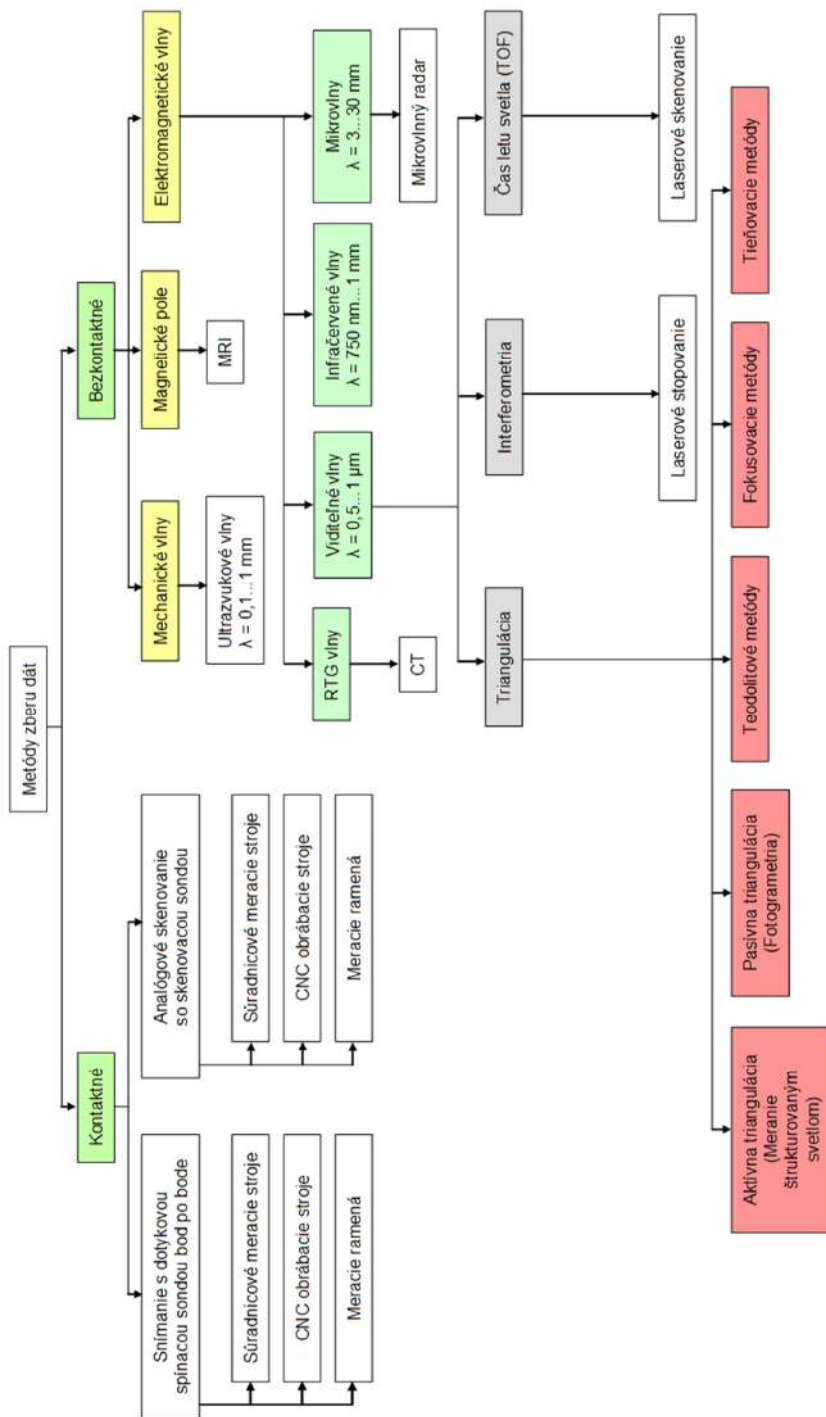
Okrem teoretických základov týchto metód sa kapitola bude zaoberať aj praktickým využitím kombinovaného prístupu pri reverznom inžinierstve karosárskeho dielu historického motorového vozidla. Ako konkrétny príklad bude slúžiť 3D digitalizácia ľavého zadného blatníka historického motorového vozidla, čo umožní aplikovať získané poznatky na skutočný reálny problém. Postup digitálneho zachytenia tvaru a detailov tohto dielu, vrátane analýzy a spracovania získaných údajov, bude podrobne opísaný v kontexte jeho aplikácie pri rekonštrukcii a oprave historických vozidiel.

Táto kapitola si kladie za cieľ poskytnúť pohľad na možnosti kombinovaných metód 3D digitalizácie a ukázať, ako môžu tieto technológie prispieť k záchrane a reštaurovaniu historických artefaktov, pričom zároveň ponúka cenné informácie o praktických aspektoch ich implementácie v reálnych projektoch.

8.1 Metódy zberu dát súradníc bodov

Na Obr. 8.1 je znázornené rozdelenie metód zberu dát súradníc bodov. Pri tomto rozdelení autor Morovič (2013) vychádzal z rôznych známych klasifikácií, ako sú práce autorov Várady, Martin a Cox (1997); Luhmann a kol. (2006) a Pham a Hieu (2008).

Existuje viacero prístupov na získanie digitálneho modelu fyzických objektov, pričom každá metóda využíva špecifický mechanizmus alebo jav na interakciu s povrchom či objemom digitalizovaného predmetu. V prípade kontaktných metód je povrch skenovaného objektu zaznamenávaný pomocou mechanickej sondy pripevnenej napr. na konci meracieho ramena, zatiaľ čo bezkontaktné metódy využívajú mechanické vlny, magnetické pole alebo elektromagnetické vlny na zber dát o súradniciach bodov (Várady, Martin a Cox, 1997; Morovič, 2007).



Obr. 8.1. Metódy zberu dát súradnic bodov podľa Moroviča (2013)

8.2 Hybridné prístupy v 3D digitalizácii

V oblasti 3D digitalizácie objektov existuje široká škála 3D digitalizačných technológií, z ktorých každá má svoje výhody, nevýhody a špecifické oblasti použitia. V reálnych podmienkach sa však často stretávame s objektmi alebo prostrediami, ktoré kladú zvýšené nároky na presnosť, rozsah, detailnosť alebo vernosť farebného záznamu. V takýchto prípadoch sa jednotlivé technológie ukazujú ako nedostatočné – či už z hľadiska rozsahu pokrytia, presnosti merania, alebo robustnosti voči vonkajším vplyvom, ako sú svetelné podmienky, odrazy svetla či štruktúra skenovaného (meraného) povrchu.

Práve preto sa **čoraz častejšie uplatňujú hybridné prístupy**, ktoré sú založené na **kombinácii viacerých metód merania**. Cieľom týchto kombinovaných techník je využiť silné stránky jednotlivých technológií a zároveň kompenzovať ich obmedzenia. Takáto synergia umožňuje efektívne riešiť náročné situácie pri digitalizácii – napríklad rozsiahlych architektonických štruktúr, historických artefaktov, členitých terénov alebo technicky komplikovaných objektov. Kombináciou viacerých senzorických systémov sa zvyšuje flexibilita, presnosť, odolnosť voči problémovým povrchom a celková kvalita a využiteľnosť výstupného 3D modelu.

V ďalšej časti kapitoly sú uvedené najznámejšie **kombinácie** meranie pre 3D digitalizáciu.

8.2.1 Kombinácia pasívnej a aktívnej triangulácie

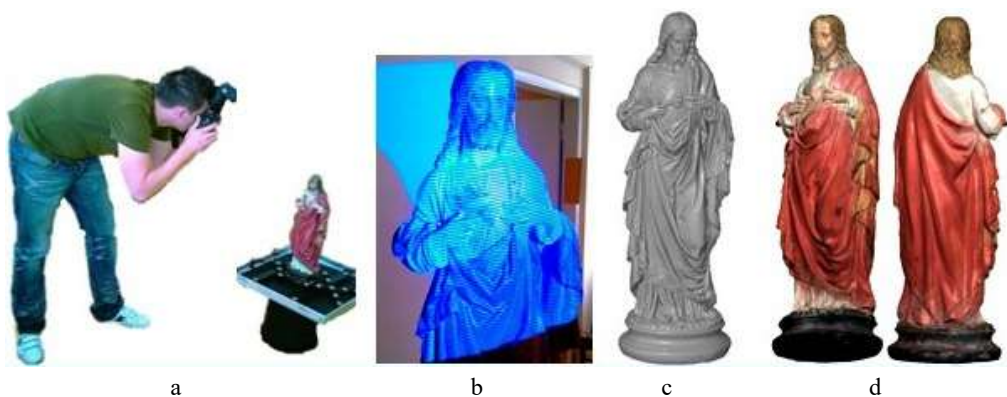
Jednou z najčastejších hybridných stratégií je prepojenie **pasívnej triangulácie** (t. j. fotogrametrie) s **aktívnou trianguláciou** (najčastejšie prostredníctvom štruktúrovaného svetla).

- **Fotogrametria** ako pasívna metóda využíva prirodzené osvetlenie a obrazové dáta na výpočet 3D informácie. Je vhodná pre väčšie objekty, kde je náročné aplikovať aktívne metódy na celý rozsah.
- **Štruktúrované svetlo** patrí medzi aktívne metódy, pri ktorých sa na objekt premieta vzor a na základe jeho deformácie sa určuje tvar povrchu. Poskytuje relatívne vysokú presnosť merania, najmä pri menších a detailných objektoch.

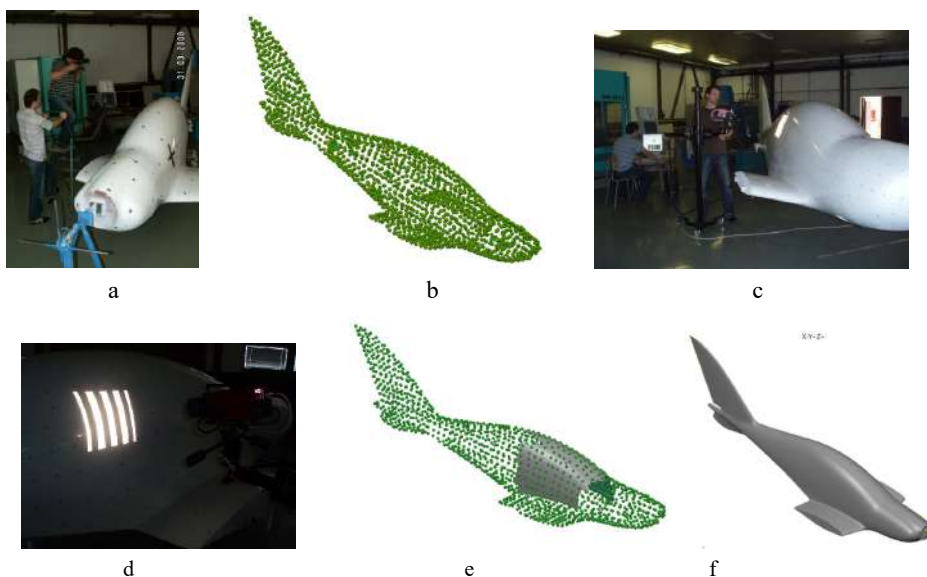
Táto kombinácia sa úspešne využíva pri 3D digitalizácii napr. **karosérie automobilu, trupu ultraľahkého lietadla, sochárskeho diela automobilu, rozmerných lisovacích nástrojov, rozmerných historických objektov, a pod.**, kde je potrebné zachytiť geometriu vo veľkom rozsahu (fotogrametria) a zároveň aj detaily skenovaného tvaru objektu (meranie štruktúrovaným svetlom). (Morovič, 2013)

V kap. 8.3 je predstavená fotogrametria, v kap. 8.4 meranie štruktúrovaným svetlom a v kap. 8.5 prípadová štúdia kombinácie 3D digitalizácie blatníka historického motorového vozidla s vyššie uvedenými metódami merania.

Na Obr. 8.2 a Obr. 8.3 sú uvedené výsledky meraní realizovaných na MTF STU so sídlom v Trnave **kombináciou fotogrametrie** (fotogrametrickým systémom GOM TRITOP) a **štruktúrovaného svetla** (3D skenerom GOM ATOS).



Obr. 8.2. Farebná 3D digitalizácia sochy Ježiša Krista (Grübel, 2011; Morovič, 2013)
 (příklad 3D digitalizácie kombináciou meracích metód fotogrametrie a štruktúrovaného svetla
3D digitalizácia zložitého tvaru sochy s farebnou textúrou povrchu)
 a – fotogrametrické meranie referenčných bodov spolu s farebnou textúrou povrchu sochy systémom GOM TRITOP – digitálny fotoaparát Nikon D300s, b – detail na vzory modrého svetla premietnuté na objekt (štruktúrované svetlo – fringe projection) 3D skenerom GOM ATOS II TripleScan SO MV 320, c – jednofarebný .STL model sochy, d – pohľad na finálny výsledok farebného skenovania sochy



Obr. 8.3. 3D digitalizácia trupu ultraľahkého lietadla SHARK (Morovič, 2013)
 (příklad 3D digitalizácie kombináciou meracích metód fotogrametrie a štruktúrovaného svetla
3D digitalizácia rozmerného objektu (dĺžka trupu lietadla približne 6,7 m)
 a – fotogrametrické meranie so systémom GOM TRITOP – digitálny fotoaparát Fujifilm FinePix S3 Pro, b – zobrazené zmerané nekódované referenčné body, c – 3D skenovanie trupu 3D skenerom GOM ATOS I 350, d – detail na premietaný vzor na trup lietadla pri 3D skenovaní, e – pohľad na časť zdigitalizovaného trupu, f – zdigitalizovaný 3D model celého trupu

8.2.2 Kombinácia laserového 3D skenovania (LiDAR) a fotogrametrie

Ďalším rozšíreným hybridným riešením je spojenie metódy s názvom „*Light Detection and Ranging*“ (LiDAR) (nazývaný tiež ako laserový 3D skener) s fotogrametrickými metódami. LiDAR generuje hustý a presný mrak bodov, často však bez informácie o farbe povrchu. Fotogrametria tento nedostatok kompenzuje tým, že poskytuje kvalitnú farebnú textúru, ktorú je možno naviazať na geometriu získanú LiDAR meracím zariadením. Výsledný 3D model má presnú geometriu a zároveň realistickú vizuálnu podobu.

Tento prístup je obzvlášť využívaný v oblastiach ako:

- geodézia a kartografia,
- dokumentácia kultúrneho dedičstva (napr. mestské časti, sakrálne objekty),
- geografické informačné systémy (*Geographic Information System – GIS*) – je systém na zber, ukladanie, analýzu, správu a vizualizáciu priestorových (geografických) údajov,
- informačné modelovanie budov (*Building Information Modeling – BIM*) – je prístup, ktorý umožňuje digitálne vytvárať, spravovať a zdieľať informácie o stavbe počas celého jej životného cyklu – od návrhu, cez výstavbu, až po údržbu alebo demoláciu.

S vyššie uvedenou problematikou kombinácie LiDAR a fotogrametrie sa zaoberajú autori Maskeliūnas a kol. (2025); Zhou (2020) a Kang a kol. (2023).

8.2.3 Kombinácia laserového 3D skenovania a štruktúrovaného svetla

V niektorých prípadoch je žiaduce spojiť výhody dvoch **aktívnych** meracích metód – **štruktúrovaného svetla** a **laserového skenovania**. Laserový skener, obvykle statický, poskytuje globálne rozmery objektu, zatiaľ čo štruktúrované svetlo zachytáva jemné povrchové detaily s vysokým rozlíšením. Typické využitie:

- umelecké diela, kde je potrebné zachytiť celkový tvar aj detaily (napr. reliéfy),
- technické súčiastky, kde sa kombinuje presná kontrola s dokumentáciou vzhľadu.

S vyššie uvedenou problematikou kombinácie laserového 3D skenovania a fotogrametrie sa zaoberajú autori Zanuttigh a kol. (2016) a Agresti a Zanuttigh (2019).

8.2.4 Kombinácia časovo-ofsetových metód a triangulácie

Kombinácia časovo-ofsetových metód a triangulácie kombinuje **Time-of-Flight (ToF)** metódu, ktorá meria vzdialenosť na základe času návratu svetelného impulzu, s **trianguláciou** (najčastejšie so štruktúrovaným svetlom), ktorá vychádza z **geometrického usporiadania** senzora a projektora. Obe metódy sú fyzikálne rozdielne – ToF je **časová metóda**, triangulácia je **geometrická**.

Aj keď sa kombinácia laserového 3D skenovania (LiDAR) a fotogrametrie (*kapitola 8.2.2*) a kombinácia laserového 3D skenovania a štruktúrovaného svetla (*kapitola 8.2.3*) môžu na prvý pohľad podobať kombinácii časovo-ofsetových metód a triangulácie (*kapitola 8.2.4*), ide o technicky odlišné prístupy.

Kombinácia časovo-ofsetových metód a triangulácie predstavuje pokročilý hybridný prístup v oblasti 3D digitalizácie, ktorý spája dve rôzne technológie merania: **Time-of-Flight (ToF)** a **geometrickú trianguláciu**. Tento prístup je čoraz populárnejší v prípadoch,

kde je potrebné efektívne skĺbiť **rýchlosť snímania s vysokou presnosťou a rozlíšením výstupných dát.**

Time-of-Flight (ToF) je aktívna metóda, pri ktorej zariadenie vyšle svetelný impulz (napr. infračervený lúč) a meria čas, za ktorý sa lúč odrazí od objektu späť k senzoru. Výhodou tejto technológie je veľmi **rýchle snímanie** hĺbky aj na väčšie vzdialenosti, pričom sa dobre uplatňuje aj v rôznych svetelných podmienkach. Na druhej strane, ToF poskytuje spravidla **nížšie rozlíšenie a presnosť** v porovnaní s triangulačnými metódami.

Geometrická triangulácia, ktorá sa v tejto kombinácii využíva najčastejšie vo forme **štruktúrovaného svetla**, pracuje na princípe premietania známeho vzoru (napríklad pruhov alebo bodovej mriežky) na povrch objektu. Kamera potom zaznamenáva, ako sa vzor deformuje, a na základe známeho geometrického rozloženia projektora a kamery sa pomocou triangulácie vypočíta presná poloha bodov v 3D priestore. Táto metóda je známa svojou **vysokou presnosťou a schopnosťou zachytiť jemné detaily**, no má obmedzenia v rýchlosti a rozsahu snímania.

Kombináciou oboch metód možno získať **komplexné 3D dáta**, kde ToF poskytne rýchlu orientačnú hĺbkovú mapu celej scény, zatiaľ čo triangulačný systém s vyššou presnosťou doplní detailné informácie o geometrii vybraných častí objektu. Výsledné údaje sa softvérovo zlúčia, čím sa dosiahne vysoká kvalita skenu aj pri zachovaní efektivity a flexibility merania.

Časté oblasti využitia vyššie uvedenej kombinácie metód 3D merania sú:

- v robotike a automatizovanej výrobe sa využíva na presné rozpoznávanie objektov v reálnom čase,
- v priemyselnej kontrole kvality umožňuje rýchlo a presne snímať a analyzovať povrchové vady,
- v oblasti 3D skenovania osôb sa používa napríklad v módnom alebo zdravotníckom priemysle, kde je dôležité presné nasnímanie tvaru tela,
- v mobilných zariadeniach a rozšírenej realite (*Augmented Reality – AR*) za účelom vytvárania realistických 3D modelov v reálnom čase.

S vyššie uvedenou problematikou časovo-ofsetových metód a triangulácie sa zaoberajú autori Geng (2011) a Bamji a kol. (2022).

8.2.5 Multisenzorové systémy a senzorová fúzia

Najmodernejšie systémy dnes často integrujú viaceré senzory naraz – **RGB kamery** (*Red – Green – Blue* kamery), **infračervené senzory** (*Infrared – IR*), **štruktúrované svetlo**, **ToF senzory**, **IMU jednotky** (*Inertial Measurement Unit* – inerciálne meracie jednotky) a ďalšie. Takéto systémy majú veľký potenciál v oblasti mobilného mapovania, robotiky a pod.

Tieto systémy využívajú:

- senzorovú fúziu – kombináciu dát z rôznych sensorov v reálnom čase,
- súčasné mapovanie a lokalizáciu v priestore (*Simultaneous Localization and Mapping – SLAM*).

Výsledkom je schopnosť:

- digitalizácia v reálnom čase (*real-time*) rozsiahlych alebo zložitých priestorov (napr. jaskyne, podzemia, industriálne komplexy),
- automatického sledovania pohybu senzora bez nutnosti externej referencie.

Vyššie uvedenou problematikou kombinácie multisenzorových systémov sa zaoberajú autori Lou a kol. (2023); Mai a kol. (2021); Berrio a kol. (2022) a Li a kol. (2022).

Využitie hybridných metód v oblasti 3D digitalizácie prináša celý rad významných benefitov. Tieto prístupy umožňujú kombinovať vysokú presnosť merania, verné zachytenie textúry povrchov a rozsiahle pokrytie objektov, čo výrazne zvyšuje kvalitu výsledného digitálneho modelu. Vďaka svojej flexibilitě sú hybridné systémy vhodné na nasadenie v rôznych podmienkach, pri práci s objektmi rozličných veľkostí, tvarov či materiálov. Osvedčili sa najmä v prípadoch, kde samostatná technológia zlyháva – napríklad pri skenovaní lesklých, tmavých alebo zle osvetlených povrchov.

Na druhej strane, implementácia hybridných riešení so sebou prináša aj viacero výziev. Medzi hlavné technické náročnosti patrí integrácia a kalibrácia viacerých senzorov, ktoré sa často líšia nielen technológiou snímania, ale aj formátom a štruktúrou generovaných dát. Zlúčenie údajov s rozdielnou hustotou bodov a presnosťou si vyžaduje pokročilé algoritmy a znalosť spracovania dát v softvérových nástrojoch. V neposlednom rade je potrebné zohľadniť aj zvýšenú časovú a finančnú náročnosť spojenú s prípravou, samotným skenovaním aj následným spracovaním dát.

Hybridné prístupy v 3D digitalizácii predstavujú **pokročilé, no čoraz dostupnejšie riešenia**, ktoré reflektujú rastúce nároky na kvalitu výstupu, všestrannosť a presnosť. Ich efektívne využitie si vyžaduje dôkladné pochopenie vlastností jednotlivých metód, dobré plánovanie zberu dát a skúsenosť so softvérovým spracovaním.

V budúcnosti sa očakáva ešte výraznejší posun smerom k **automatizovaným, multisenzorovým systémom**, ktoré umožnia digitalizáciu komplexných scenérií s minimálnym zásahom operátora a v reálnom čase.

8.3 Pasívna triangulácia – fotogrametria

Pasívna triangulácia v sebe zahŕňa predovšetkým rôzne prístupy fotogrametrie, pri ktorých sa priestorové súradnice vybraných bodov na povrchu objektu určujú na základe analýzy snímok získaných z viacerých uhlov pohľadu. Tieto zábery môžu byť vytvorené jednou alebo viacerými kamerami. Kým v minulosti sa využívali analógové fotoaparáty, v súčasnosti sú štandardom digitálne zariadenia s CCD snímačmi. Charakteristickým znakom pasívnej triangulácie je absencia externého aktívneho osvetlenia – povrch objektu nie je osvetľovaný projektorom alebo štruktúrovaným svetlom, ako je to typické pri aktívnych metódach triangulácie (napr. pri skeneroch so štruktúrovaným svetlom). (Morovič, 2013)

Témou fotogrametrie sa podrobne zaoberá viacero odborných zdrojov a publikácií, medzi inými práce autorov ako Luhmann a kol. (2006); Zhang (2012); Tsai (1987); Bartoš a Fraštia (2010); Kraus a Waldhäusl (1993); Kraus, Jansa a Kager (1997); Luhmann a Müller (2010); Koch a Kaehler (2009); Mada a kol. (2003) a Morovič (2013). V kontexte aplikácie fotogrametrie na digitalizáciu kultúrneho dedičstva sa tejto problematike venuje napr. autor Marčiš (2019).

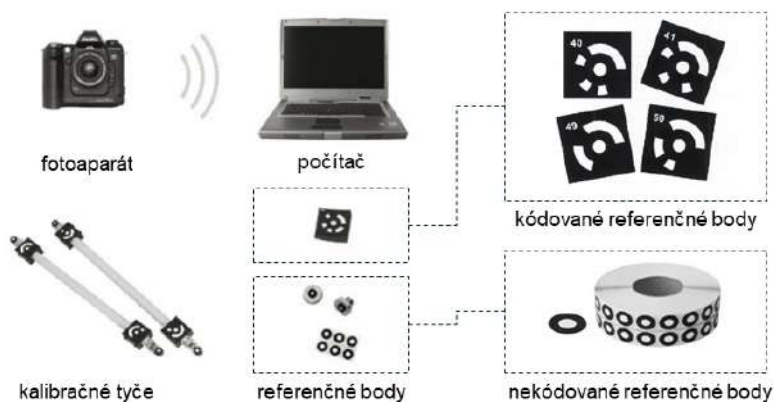
8.3.1 Bezkontaktný súradnicový merací stroj GOM TRITOP

GOM TRITOP (Obr. 8.4) je profesionálny merací systém založený na princípe fotogrametrie (Tabuľka 8.1), ktorý sa využíva na presné určovanie priestorových súradníc objektov. Jeho základné komponenty tvoria digitálna jednooká zrkadlovka, výpočtový počítač, kalibračné tyče a súprava referenčných bodov – kódovaných aj nekódovaných.

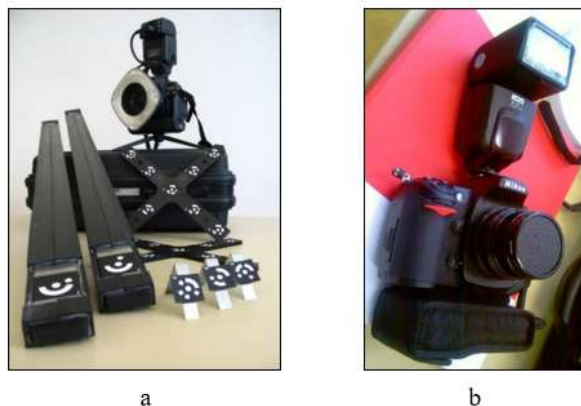
Tabuľka 8.1. Technické parametre fotogrametrických meracích systémov GOM TRITOP
(FUJIFILM, 2004; NIKON, 2011; Morovič, 2013; Morovič a Kuruc, 2024)

	Fujifilm FinePix S3 Pro	Nikon D300s
Typ fotoaparátu	Digitálna jednooká zrkadlovka (SLR)	Digitálna jednooká zrkadlovka (SLR)
Typ optického senzora	CCD	CMOS
Total pixels	12 900 000 pixelov	13 100 000 pixelov
Efektívne rozlíšenie senzora	12 300 000 pixelov	12 300 000 pixelov
Rozmery optického senzora	23,0 x 15,5 mm	23,6 x 15,8 mm
Objektív	Nikon Nikkor 24 mm f 2,8	Titanar 24 mm f 2,8
Blesk	Kruhový makroblesk Sunpark	Externý blesk Metz 50 AF-1 digital

Jednotlivé verzie systému GOM TRITOP uvedené v Tabuľke 8.1 sa od seba líšia najmä použitým modelom fotoaparátu a jeho príslušenstvom. Rozdiely možno nájsť v type objektívu, konfigurácii blesku (kruhový vs. bodový typ) a vo výkone kondenzátora blesku. Systém vybavený fotoaparátom Fujifilm FinePix S3 Pro (Obr. 8.5a) využíva na prenos snímok do počítača čítačku pamäťovej karty, zatiaľ čo verzia s fotoaparátom Nikon D300s (Obr. 8.5b) pracuje s bezdrôtovým Wi-Fi prenosom. (Morovič, 2013)



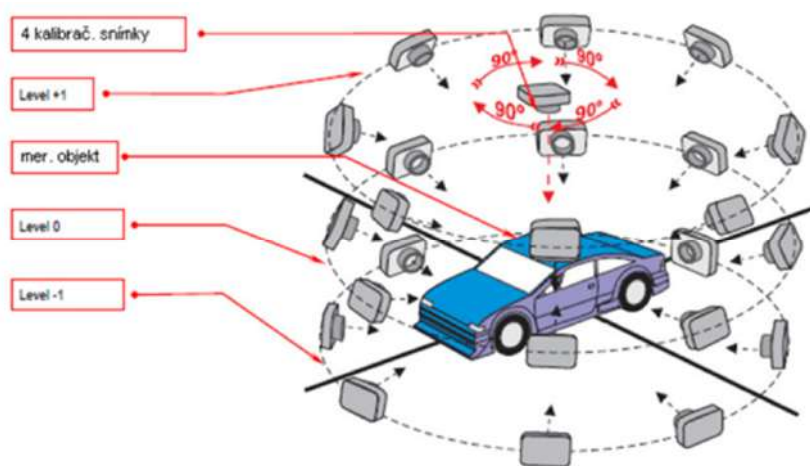
Obr. 8.4. Fotogrametrický merací systém GOM TRITOP (Blaško, 2009)



Obr. 8.5. Fotogrametrické meracie systémy GOM TRITOP v Centre excelentnosti 5-osového obrábania MTF STU v Trnave (Morovič, 2013; Morovič a Kuruc, 2024)

a – fotoaparát Fujifilm FinePix S3 Pro meracieho systému GOM TRITOP, kalibračné tyče, kalibračný kríž a kódované referenčné body, b – fotoaparát Nikon D300s meracieho systému GOM TRITOP

Rozvrhnutie snímok pri meraní systémom GOM TRITOP je uvedené na Obr. 8.6.



Obr. 8.6. Rozvrhnutie snímok pri meraní systémom GOM TRITOP (Blaško, 2009; GOM, 2011b)

8.3.2 Príklady aplikácie bezkontaktného súradnicového meracieho stroja GOM TRITOP

Systém GOM TRITOP sa využíva hlavne v týchto štyroch oblastiach: (Morovič a Kuruc, 2024)

- **samostatne na meranie diskretných bodov v priestore** (bezdotykové súradnicové meracie stroje),
- **samostatne na meranie deformácií** (meranie statických deformácií),

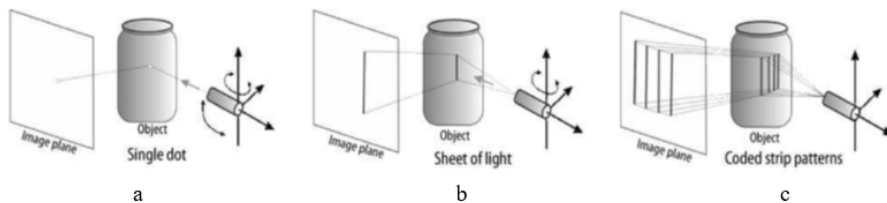
- v kombinácii so systémom GOM ATOS pri meraní rozmerných objektov (na zvýšenie presnosti 3D skenovania (GOM TRITOP (pasívna triangulácia) + GOM ATOS (aktívna triangulácia)) (Obr. 8.3),
- v kombinácii so systémom GOM ATOS pri farebnom 3D skenovaní (na zvýšenie presnosti 3D skenovania (GOM TRITOP (pasívna triangulácia) + GOM ATOS (aktívna triangulácia)) (Obr. 8.2).

Príklady konkrétnych aplikácií bezkontaktného súradnicového meracieho stroja GOM TRITOP pre vyššie uvedené 4 oblasti sú uvedené v literatúre Morovič a Kuruc (2024).

8.4 Aktívna triangulácia – meranie štruktúrovaným svetlom

Metóda aktívnej triangulácie pracuje na princípe získavania priestorových súradníc bodu na povrchu objektu tým, že sa tento povrch nasvieti a súčasne sníma. Rôzne svetelné vzory používané na nasvietenie povrchu objektu sú znázornené na Obr. 8.7: (Kalová a Horák, 2005; Page, Koschan a Abidi, 2008; Morovič, 2013; Morovič a Kuruc, 2024)

- **svetelný bod** (1-D triangulácia; single point, single dot),
- **svetelná čiara** (2-D triangulácia; sheet of light),
- **štruktúrovaný svetelný zväzok** (3-D triangulácia; prúžok (strip), mriežka (grid) alebo zložené komplikované kódované svetlo (complex coded light).



Obr. 8.7. Rôzne svetelné vzory použité pri meraní štruktúrovaným svetlom (Pham a Hieu, 2008)
a – svetelný bod, b – svetelná čiara, c – štruktúrovaný svetelný zväzok

Na premietanie svetelného bodu alebo čiary na povrch objektu sa využíva laserový svetelný zdroj. V prípade štruktúrovaného svetla na premietanie sa používa svetelný projektor, ktorý na povrchu meraného objektu vytvára rôzne vzory – ako sú prúžky, mriežky alebo komplexné kódované svetlo. (Page, Koschan a Abidi, 2008)

Z hľadiska počtu použitých snímačov typu CCD alebo CMOS existujú dve hlavné verzie aktívnej triangulácie: (Pham a Hieu, 2008)

- a) systém s jednou CCD (alebo CMOS) kamerou,
- b) systém s dvoma CCD (alebo CMOS) kamerami (Obr. 8.8 a Obr. 8.9).

Metóda aktívnej triangulácie umožňuje rýchle získavanie súradníc bodov povrchu meraného objektu. Presnosť tohto merania závisí predovšetkým od rozlíšenia snímača (CCD alebo CMOS čipu) a vzdialenosti medzi snímačom a povrchom objektu (Várády, Martin a Cox, 1997). Výsledky merania ovplyvňujú aj optické vlastnosti materiálu meraného objektu. Pri použití 3-D verzie aktívnej triangulácie je možno zachytiť naraz väčšiu časť meraného povrchu objektu než pri 1-D alebo 2-D systémoch. (Morovič, 2013)

3D skenery využívajúce aktívnu trianguláciu sa typicky používajú na meranie objektov s objemom do 3 až 4 m³. Dosahujú presnosť približne 0,02 mm. Tieto skenery sú dostupné ako kompletne systémy vrátane statívu, alebo ako samostatné skenovacie hlavice, ktoré sa dajú upevniť na meracie ramená, súradnicové meracie stroje (CMM) alebo na CNC frézovacie stroje. (Pham a Hieu, 2008; Morovič 2013)

Téme aktívnej triangulácie sa venujú autori Caspi, Kiryati a Shamir (1998); Salvi, Pagès a Batlle (2004); Kovačovský (2012); Furukawa a kol. (2012) a Morovič (2013).

8.4.1 3D skenery GOM ATOS

GOM ATOS II TripleScan SO (Obr. 8.2, Obr. 8.8, Obr. 8.9 a Obr.8.14) predstavuje novšiu generáciu meracieho zariadenia v porovnaní s predchádzajúcim modelom **GOM ATOS I 350** (Obr. 8.3 a Obr. 8.8). Skratka „SO“ v názve skenera znamená „Small Objects“.

Skenovacia hlavica tohto 3D skenera umožňuje namontovanie kamier do dvoch rôznych polôh, ako znázorňuje Obr. 8.9 (pozícia kamier 400, pozícia kamier SO). Model **TripleScan** označuje systém, pri ktorom výrobca ponúka pre **GOM ATOS II** (kde „II“ značí rozlíšenie kamier 5 Mpx; model **GOM ATOS III** má rozlíšenie 8 Mpx) rôzne meracie objemy.

Pre konfiguráciu SO je k dispozícii päť rôznych **meracích objemov** (MV – Measuring Volume): **MV 320, MV 170, MV 100, MV 60 a MV 38**. Pre polohu s označením 400 (vzdialenosť medzi kamerami v mm) sú dostupné objemy **MV 1500, MV 1000, MV 560, MV 320 a MV 170** (čísla označujú približnú dĺžku meracieho priestoru v milimetroch (Tabuľka 8.2).

Číselné označenie **400** pri tomto modeli, podobne ako **350** pri modeli **GOM ATOS I 350**, udáva približnú vzdialenosť medzi kamerami v milimetroch. Každý merací objem predstavuje špecifickú konfiguráciu, ktorá zahŕňa dvojicu objektívov pre kamery, zodpovedajúci objektív pre projektor a príslušný kalibračný prvok – ten môže byť vo forme kalibračnej dosky alebo kríža, v závislosti od konkrétneho MV. (Morovič, 2013)

Oba skenery, **GOM ATOS I 350** a **GOM ATOS II TripleScan SO**, fungujú na rovnakom princípe. Hlavný rozdiel medzi nimi spočíva v rozlíšení kamier – GOM ATOS I 350 má snímače s rozlíšením **0,8 Mpx**, zatiaľ čo GOM ATOS II TripleScan SO používa kamery s rozlíšením **5,0 Mpx**. Vyššie rozlíšenie snímača umožňuje zaznamenať povrch objektu s väčšou hustotou bodov, čím sa vytvára hustejší mrak bodov. Výsledkom je detailnejší digitálny model objektu. Treba však poznamenať, že vysoké rozlíšenie nie je vždy nutné – záleží na konkrétnom účele, na ktorý má byť digitálny model. (Morovič, 2013)

Je tiež dôležité si uvedomiť, že pri zmene MV v rámci jedného kamerového systému (napr. pri GOM ATOS II TripleScan SO s rozlíšením 5,0 Mpx) sa zmení aj vzdialenosť medzi jednotlivými bodmi v bodovej mriežke. Táto vzdialenosť sa odvíja od zvoleného meracieho objemu (Tabuľka 8.3). (Morovič, 2013)

Tabuľka 8.2. Technické parametre senzornej jednotky 3D skenera GOM ATOS I 350 (GOM, 2005a) $2b = 350 \text{ mm}$

Merací objem (DxŠxV) (mm ³)	Rozlíšenie senzora kamery (px)	Vzdialenosť nameraných bodov (mm)	Ohnisková vzdialenosť kamery (mm)	Ohnisková vzdialenosť projektora (mm)	Referenčné body (mm)	Uhol kamier α (°)	Meracia vzdialenosť (mm)
250 x 200 x 200	800 000	0,25000	12	16	Ø 3,0	29	650

Tabuľka 8.3. Technické parametre senzornej jednotky 3D skenera GOM ATOS II TripleScan SO (GOM, 2011a), $2b = 240 \text{ mm}$

Merací objem (DxŠxV) (mm ³)	Rozlíšenie senzora kamery (px)	Vzdialenosť nameraných bodov (mm)	Ohnisková vzdialenosť kamery (mm)	Ohnisková vzdialenosť projektora (mm)	Referenčné body (mm)	Uhol kamier α (°)	Meracia vzdialenosť (mm)
MV 320 320 x 240 x 240	5 000 000	0,12393	12	30	Ø 1,5	28	490
MV 170 170 x 130 x 130	5 000 000	0,07059	23	60	Ø 0,8	28	490
MV 100 100 x 75 x 70	5 000 000	0,04509	35	80	Ø 0,8	28	490
MV 38 38 x 29 x 15	5 000 000	0,01470	80	150	Ø 0,4	28	490

Tabuľka 8.4. Technické parametre senzornej jednotky 3D skenera GOM ATOS CompactScan 5M (GOM, 2012), $2b = 300 \text{ mm}$

Merací objem (DxŠxV) (mm ³)	Rozlíšenie senzora kamery (px)	Vzdialenosť nameraných bodov (mm)	Ohnisková vzdialenosť kamery (mm)	Ohnisková vzdialenosť projektora (mm)	Referenčné body (mm)	Uhol kamier α (°)	Meracia vzdialenosť (mm)
600 x 450 x 450	5 000 000	0,25000	8	6	Ø 3,0	25	590

Okrem rozdielného rozlíšenia kamier sa **GOM ATOS I 350** a **GOM ATOS II TripleScan SO** odlišujú aj v použitom type svetla na premietanie vzorov na povrch objektu. Model ATOS I 350 využíva projektorovú lampu, ktorá vyžaruje **biele svetlo**, zatiaľ čo ATOS II TripleScan SO používa **LED technológiu**. LED generuje tzv. **studené svetlo** a v porovnaní s klasickou lampou má výrazne dlhšiu životnosť. Pri skenovaní sa používa **modré svetlo**, ktoré je výhodné najmä preto, že má menšiu náchylnosť na rušenie okolitým osvetlením, čím sa zlepšuje kvalita digitalizácie. (Morovič, 2013)

Model ATOS II TripleScan SO umožňuje **nastavenie expozičného času** pred samotným skenovaním, čo je veľmi užitočné pri snímaní problémových povrchov, ako sú napríklad **lesklé kovové časti**. Z pohľadu používateľa je praktickým doplnkom pri tomto skeneri aj použitie **dvoch červených laserových lúčov**. Tie sú umiestnené vedľa kamier a premietajú sa na skenovaný objekt. Správna vzdialenosť skenovacej hlavice od objektu je dosiahnutá

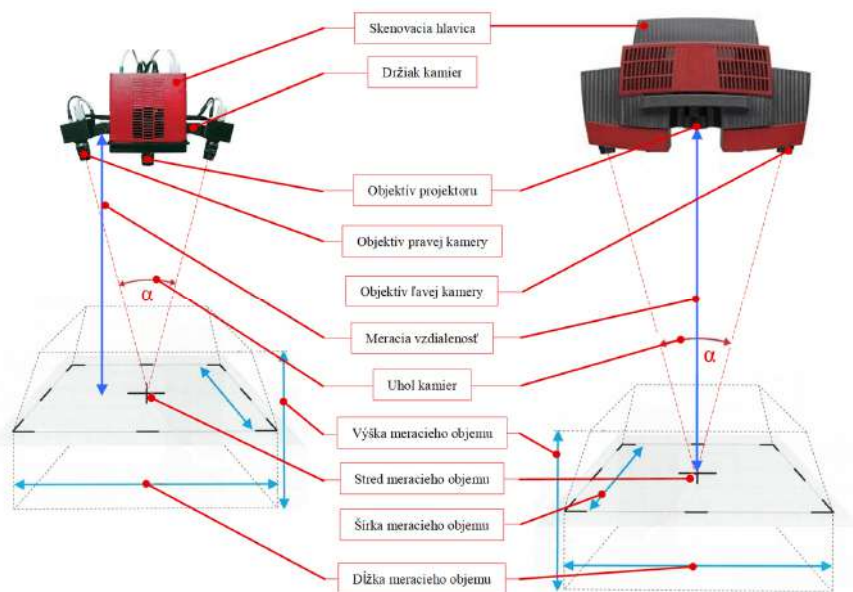
v momente, keď sa laserové body pretnú v jednom bode – čo výrazne zjednodušuje nastavenie správnej vzdialenosti skenovacej hlavice od povrchu meraného objektu. (Morovič, 2013)

Ďalší podstatný rozdiel medzi 3D skenermi GOM ATOS I 350 a GOM ATOS II TripleScan SO spočíva v použitom **softvéri**. Starší model ATOS I 350 využíval softvér **GOM ATOS v6.0.0-1a**, zatiaľ čo novší ATOS II TripleScan SO je ovládaný prostredníctvom softvéru **GOM ATOS Professional v7.5**. Na povrch objektu sa lepia **nekódované referenčné body**, ktoré slúžia na spojenie jednotlivých skenov do jedného celku. Softvér GOM ATOS vyžaduje, aby **minimálne tri referenčné body** boli spoločné medzi dvomi susednými skenmi, čo umožňuje ich presné zarovnanie. Skenovanie sa vykonáva buď **pohybom skenovacej hlavice** (ktorá je uchytená na statíve s kolieskami) okolo objektu, alebo **otáčaním samotného objektu**, napríklad pomocou rotačného taniera. Týmto spôsobom sa postupne nasníma celý povrch.

Pre väčšie objekty je možno využiť aj kombináciu systému **GOM ATOS** so systémom **GOM TRITOP**, čo býva vo viacerých prípadoch veľmi efektívne riešenie (pozri kap. 8.5).

Príklady praktickej aplikácie 3D skenera GOM ATOS v rôznych oblastiach sú podrobnejšie uvedené v literatúre (Morovič, 2016) a (Morovič a Kuruc, 2024).

Pôvodne spoločnosťou GOM vyvinuté 3D skenery radu ATOS, sú v súčasnosti vyrábané a distribuované pod značkou ZEISS, ktorá integrovala tieto produkty do svojho portfólia metrologie (ZEISS, 2025).

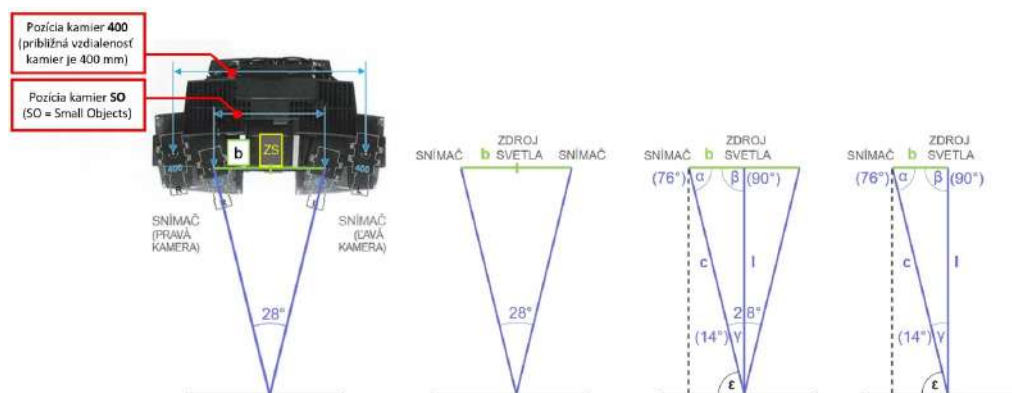


Obr. 8.8. Skenovacia hlavica 3D skenera GOM ATOS I 350 a GOM ATOS II TripleScan (GOM, 2005a; GOM, 2011a)

8.4.2 Približný výpočet vzdialenosti senzorovej jednotky 3D skenera od skenovaného povrchu

Ako to znázorňuje Obr. 8.9, snímač (najčastejšie s CCD alebo CMOS čipom), zdroj svetla, a bod na povrchu objektu tvoria trojuholník. Triangulačná báza (b) je tvorená spojnicou medzi snímačom a zdrojom svetla. Uhol β , ktorý je pri svetelnom zdroji, zostáva konštantný, zatiaľ čo uhol α pri snímači sa mení v závislosti od polohy osvetleného bodu na CCD (CMOS) čipe. (Morovič, 2013)

Ak sú známe hodnoty uhlov α a β , dĺžka strany b a parametre snímača – ako rozmery CCD čipu, jeho rozlíšenie (počet pixelov) a ohnisková vzdialenosť objektívu – dá sa vypočítať vzdialenosť l . (Kalová a Lisztwan, 2006; Morovič, 2013)



$$180^\circ = \alpha + \beta + \gamma$$

$$\gamma = 180 - (\alpha + \beta)$$

$$180^\circ = \varepsilon + \gamma + 90^\circ$$

$$180^\circ = \varepsilon + \beta - \alpha + 90^\circ$$

$$180^\circ = \varepsilon + 90^\circ - \alpha + 90^\circ$$

$$\varepsilon = \alpha$$

$$\frac{\sin \gamma}{b} = \frac{\sin \beta}{c} \rightarrow c = \frac{b \cdot \sin \beta}{\sin \gamma}$$

$$\sin \varepsilon = \frac{l}{c} \rightarrow l = c \cdot \sin \varepsilon = c \cdot \sin \alpha$$

$$l = \frac{b \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta}{\sin \gamma} = \frac{b \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta}{\sin(180^\circ - (\alpha + \beta))}$$

$$l = \frac{120 \cdot \sin 76^\circ \cdot \sin 90^\circ}{\sin 14^\circ}$$

$$l = 481,3 \text{ mm}$$

Obr. 8.9. Približný výpočet vzdialenosti senzorovej jednotky 3D skenera od skenovaného povrchu (upravený na základe (Morovič a Kuruc, 2024))

8.5 Prípadová štúdia kombinovania pasívnej a aktívnej metódy triangulácie pri 3D digitalizácii

Pri 3D digitalizácii rozmerných objektov, ako sú karosérie automobilov, trupy lietadiel či veľké sochy, sa z dôvodu zabezpečenia vyššej presnosti bežne využíva kombinácia meracích systémov **GOM TRITOP** a **GOM ATOS**. Táto kombinácia eliminuje potrebu aplikovať štandardnú sekvenčnú stratégiu skenovania (typické pri skenovaní s 3D skenerom GOM ATOS bez kombinácie so systémom GOM TRITOP), pri ktorej musia byť na dvoch po sebe nasledujúcich skenoch viditeľné minimálne tri spoločné nekódované referenčné body.

Proces prebieha tak, že sa na skenovaný objekt najskôr aplikujú kódované aj nekódované referenčné body. Potom sa pomocou systému GOM TRITOP určia ich presné 3D súradnice (X, Y, Z) v jednotnom súradnicovom systéme. Po tomto kroku sa kódované body odstránia a nasleduje samotné 3D skenovanie povrchu objektu zariadením GOM ATOS. Keďže poloha nekódovaných bodov je už presne známa, softvér GOM ATOS ich využíva ako „oporné“ body pre presné zarovnanie jednotlivých skenov, bez potreby dodržiavania pravidiel o spoločných 3 bodoch medzi skenmi.

V prípade, že by sa skenovanie realizovalo výlučne systémom GOM ATOS, bez predchádzajúceho merania GOM TRITOP, každý sken by mal svoj vlastný súradnicový systém, pričom ich následné zjednotenie by vyžadovalo viditeľnosť minimálne troch nekódovaných referenčných bodov na každom nasledujúcom zábere.

Praktickým príkladom tejto metódy je digitalizácia trupu ultraľahkého lietadla **SHARK** (dĺžka 6,7 m), vyrobeného v Senici, ktorá bola realizovaná v roku 2008 na Materiálovotechnologickej fakulte STU v Trnave (kompletnú 3D digitalizáciu, úpravu dát, tvorbu farebnej mapy a farebných rezov odchýlok na naskenovanom trupu ultraľahkého lietadla realizovali Ladislav Morovič a Ivan Buranský) (Obr. 8.3). Kombinovaný prístup GOM TRITOP a GOM ATOS umožnil skenovanie bez obmedzení týkajúcich sa postupnosti snímok – napr. skenovanie mohlo začať na nose trupu a pokračovať priamo na chvoste trupu, bez potreby zachovania vizuálnej kontinuity medzi jednotlivými skenmi.

Zásadnou výhodou kombinovaného postupu je, že všetky referenčné body sú vopred transformované do spoločného globálneho súradnicového systému, čím sa výrazne zvyšuje presnosť a flexibilita celého 3D skenovacieho procesu.

Predmetom ďalšej 3D digitalizácie bol ľavý zadný blatník automobilu **ŠKODA 1000 MB** (Obr. 8.10). Je to plechový diel a z dôvodu rozmerov súčiastky a obojstrannej 3D digitalizácie boli kombinované dve metódy merania, a to fotogrametrické meranie a meranie štruktúrovaným svetlom. Najprv objekt sa zmeral fotogrametriou (systémom GOM TRITOP). Toto meranie zaznamenával priestorové súradnice na objekt nalepených kódovaných aj nekódovaných referenčných bodov. Potom sa na získanie geometrie povrchu blatníka sa použil 3D skener **GOM ATOS**, ktorý využíva metódu aktívnej triangulácie a poskytuje hustý mrak bodov (*point cloud*) súčiastky.

Keďže tento blatník technológiou lisovania plechu sa už hromadne nevyrába, je často ťažké získať správnu technickú dokumentáciu alebo presné rozmery. Pomocou 3D digitalizácie a reverzného inžinierstva možno vytvoriť **rozmerovo presný CAD model**.

Problematickou reverzného inžinierstva a reverzného geometrického modelovania sa zaoberajú autori Buranský a Morovič (2021).



a

b

Obr. 8.10. Objekt 3D digitalizácie

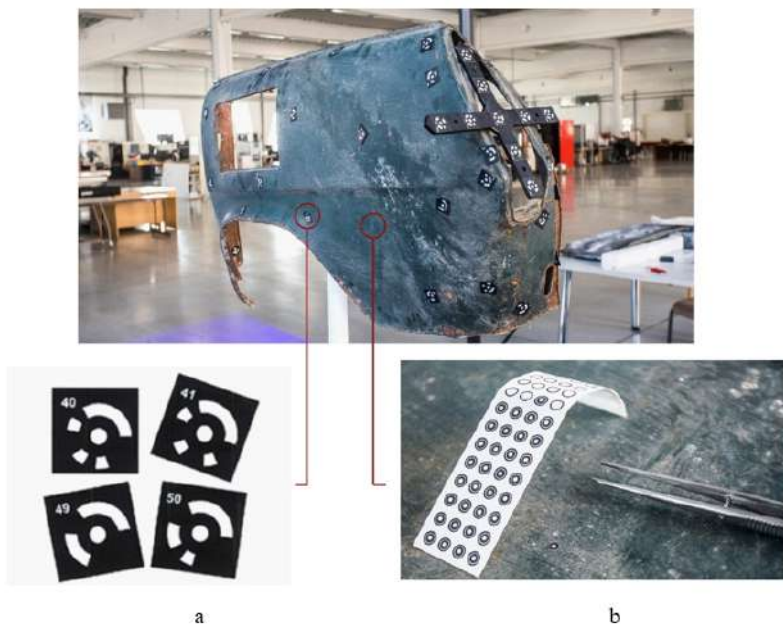
a – historické motorové vozidlo ŠKODA 1000 MB (Šturdík, 2023),

b – objekt 3D digitalizácie (ľavý zadný blatník) upevnený na prípravku pre 3D digitalizáciu (Urban, 2025)

8.5.1 Príprava objektu na 3D meranie

Objekt pred 3D meraním je potrebné očistiť. Po očistení na povrch objektu sa upevnia referenčné body (Obr. 8.11):

- **kódované referenčné body**, ktoré sú vo forme „diskrétnych bodov“ (tie sa upevnia magneticky na blatník) alebo sú umiestnené napevno na kríži (9 kusov),
- **nekódované referenčné body**, ktoré sa nalepia na povrch objektu.



a

b

Obr. 8.11. Referenčné body na meranom objekte

a – kódované referenčné body (Blaško, 2009; Morovič a Kuruc 2024),

b – nekódované referenčné body (Urban, 2025)

Počas 3D merania fotogrametrický systém rozpozná **kódované referenčné body** a softvér ich potom využíva na presné zarovnanie (spojenie) jednotlivých fotografií získaných z rôznych priestorových pozícií. Na úspešné spojenie snímok je potrebné, aby softvér rozoznal minimálne **päť spoločných kódovaných referenčných bodov** na po sebe nasledujúcich snímkach.

Počas merania, fotogrametrický systém okrem kódovaných referenčných bodov sníma priestorové pozície aj nekódovaných referenčných bodov, ktoré budú mať význam neskoršie pri 3D skenovaní geometrie (plochy) blatníka optickým 3D skenerom GOM ATOS (pozri aj vysvetlenie v druhom a treťom odseku kap. 8.5).

Referenčné body (kódované aj nekódované) sú dostupné v rôznych rozmeroch. Ich správny výber závisí od rozmerov skenovaného objektu (pre GOM TRITOP) a od zvoleného meracieho objemu (pre GOM ATOS Tabuľka 8.2 až Tabuľka 8.4).

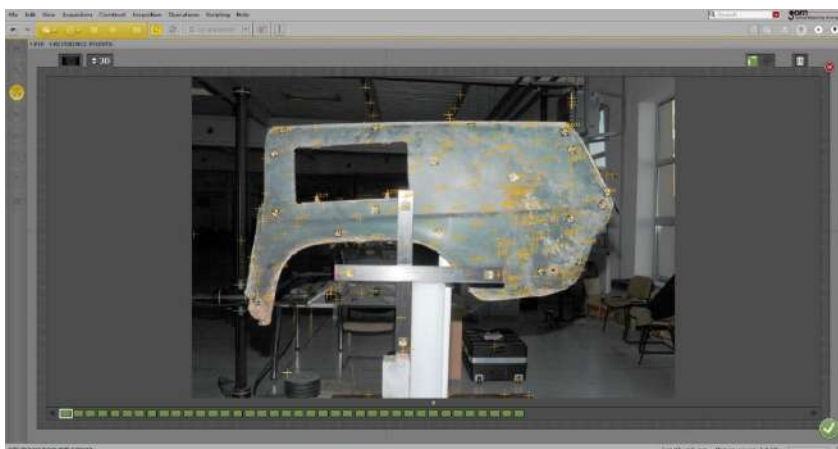
8.5.2 Fotogrametrické meranie

Počas fotogrametrického merania objekt sa nasníma z rôznych pozícií (znázorňujúce jednotlivé pozície počas merania – Obr. 8.6 a Obr. 8.12). Cieľom fotogrametrického merania je nasnímať všetky kódované a nekódované referenčné body umiestnené na povrchu meraného objektu. Spracovanie fotogrametrií sa uskutočňuje v softvéri **GOM ATOS Professional v7.5 SR2**.



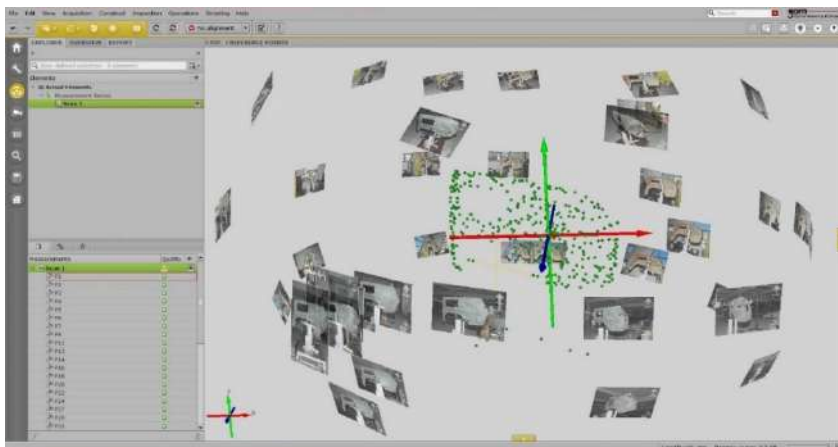
*Obr. 8.12. Realizácia fotogrametrického merania (GOM TRITOP – Nikon D300s)
– snímame kódovaných a nekódovaných referenčných bodov*

Na Obr. 8.13 možno vidieť, že väčšina nasnímaných fotografií má správnu expozíciu. Každá snímka (expozícia) je znázornená zeleným štvorcom. Ak dôjde k nesprávnemu nasvieteniu snímky (napr. podexponovaniu) alebo k jej rozmazaniu, štvorček sa zafarbí na červeno. To značí, že daný záber je potrebné buď zopakovať, alebo ho možno odstrániť – za predpokladu, že iné fotografie obsahujú dostatočný počet referenčných bodov. Počas fotogrametrického merania sa niekedy stávalo, že blesk fotoaparátu zlyhal, čo si vyžiadalo opakované snímanie, aby bolo možno zachytiť všetky potrebné referenčné body. Kľúčové je, aby sa na každej snímke nachádzalo aspoň päť kódovaných referenčných bodov – len tak ich softvér dokáže presne lokalizovať v 3D priestore a správne ich spojiť. (Urban, 2025)



Obr. 8.13. Rozpoznané referenčné body počas fotogrametrického merania (Urban, 2025)

Po ukončení snímania objektu digitálnym fotoaparátom (t. j. so systémom GOM TRITOP) softvér zobrazuje ich umiestnenie v priestore spolu s pozíciami referenčných bodov (Obr. 8.14). (Urban, 2025)



Obr. 8.14. Nasnímané obrázky pomocou fotogrametrie zobrazujúce priestorové pozície fotografií (t. j. pozície snímania z rôznych uhlov objektu) a pozície referenčných bodov (Urban, 2025)

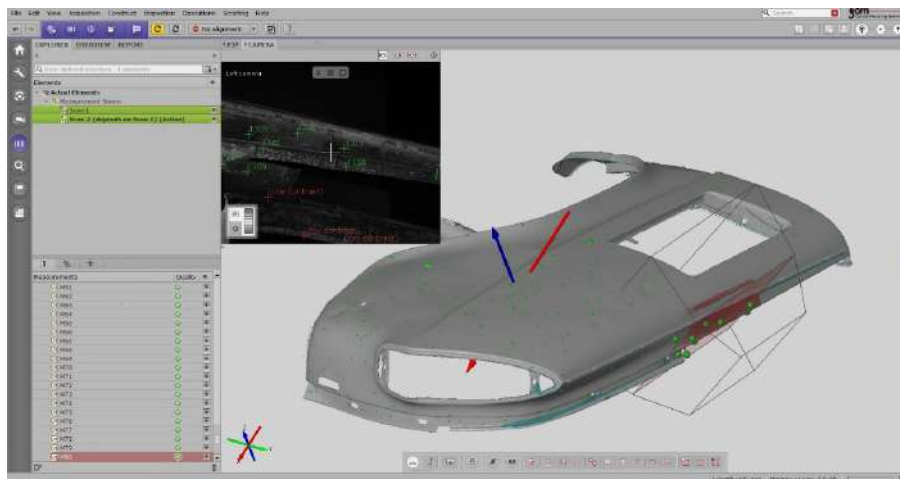
8.5.3 Meranie štruktúrovaným svetlom

Po zaznamenaní referenčných bodov fotogrametrickou metódou prešiel proces skenovania do nasledujúcej etapy, v ktorej sa realizovalo meranie pomocou štruktúrovaného svetla. Blatník zostal počas celého skenovania nehybný, rovnako ako pri predchádzajúcom kroku. Vzhľadom na jeho rozmery bolo praktickejšie pohybovať skenerom, ktorý je umiestnený na mobilnom stojane s kolieskami, čo umožnilo efektívne nastavovanie polohy. Počas digitalizácie bol 3D skener vedený okolo blatníka (Obr. 8.14). (Urban, 2025)



Obr. 8.14. 3D skenovanie blatníka metódou aktívnej triangulácie štruktúrovaným svetlom (GOM ATOS II TripleScan SO MV 320) (Urban, 2025)

Vzhľadom na veľkosť blatníka bolo potrebné postupne skenovať celú súčiastku, keďže skener dokáže pri jednej expozícii zachytiť len obmedzený objem priestoru. Obr. 8.15 znázorňuje priebeh merania v softvéri **GOM ATOS Professional v7.5 SR2** – červeno-nahodou farbou sú vyznačené aktuálne nasnímané oblasti (trojuholníková sieť) a oblasť, ktorú v danom momente sníma skener, je znázornená drôtovým rámom. (Urban, 2025)



Obr. 8.15. Softvérové rozhranie počas 3D skenovania (Urban, 2025)

Na dosiahnutie čo požadovaného výsledku bolo vykonaných 88 samostatných skenov, ktoré spolu pokrývajú všetky dostupné povrchy súčiastky. Niektoré časti sa kvôli optickým obmedzeniam skenera nedali nasnímať, no prioritou je presné zachytenie vonkajšieho obrysu, ktorý definuje tvar blatníka. V používateľskom rozhraní softvéru sa zároveň zobrazuje aj okno s rozpoznanými referenčnými bodmi. (Urban, 2025)

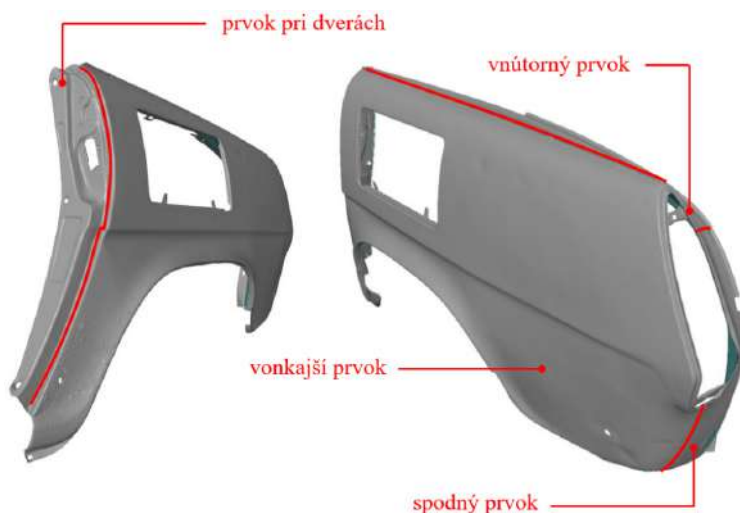
8.5.4 Polygonizácia mraku bodov

Po dokončení digitalizácie reálneho objektu nasleduje vytvorenie **polygónového** (mnohouholníkového) **modelu**, ktorý sa generuje z nasnímaných bodov (t.j. z mraku bodov). Polygónový model pozostáva z **trojuholníkových plôch**. Princíp polygonizácie (pri vytváraní trojuholníkov nazývaný aj ako triangulácia) je znázornený na Obr. 8.16. Proces polygonizácie bol vykonaný v softvéri GOM ATOS Professional v7.5 SR2.



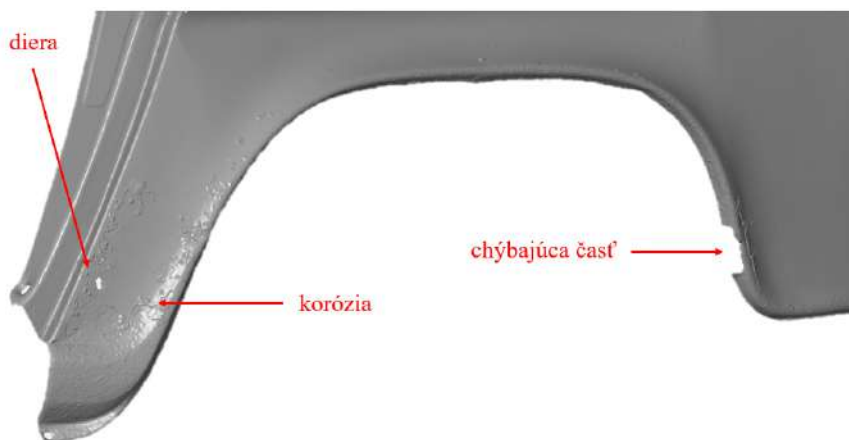
Obr. 8.16. Polygónová sieť vytvorená trianguláciou mraku bodov (3D Systems, 2014; Očenáš, 2015)

Digitalizovaný objekt pozostáva z jednotlivých častí (Obr. 8.17), ktoré sú z technologického hľadiska podstatné. Keďže blatník bol zložený a zvarovaný z viacerých komponentov, počas tvorby reverzného modelu je výhodné rozdeliť jeho sieť na menšie segmenty. Hoci ponechanie modelu v jednom celku uľahčuje presné prepojenie jednotlivých povrchov, na záverečné spracovanie a prípravu na výrobu je vhodné rozčleniť model (blatník) do viacerých samostatných častí. (Urban, 2025)



Obr. 8.17. Hlavné prvky blatníka, zvarové spoje sú vyznačené červenými krivkami (upravený na základe (Urban, 2025))

Fyzický stav blatníka mal vplyv na výslednú kvalitu 3D skenu. V dôsledku korózie sa na niektorých miestach vytvorili nerovnosti, či priamo diery a otvory v kovovom povrchu (Obr. 8.18). Aj keď by sa povrch dal zlepšiť pomocou brúsenia alebo pieskovania, tieto techniky neboli použité. Namiesto toho sa nedokonalosti riešili **digitálne**, t. j. úpravou sieťového modelu v softvéri. (Urban, 2025)



Obr. 8.18. Chyby na blatníku (upravený na základe (Urban, 2025))

Pôvodný 3D sken obsahoval približne **6,7 milióna bodov**, čo je pre ďalšie spracovanie zbytočne veľký objem dát. Aby sa znížila záťaž na počítač a zrýchlila práca so sieťovým modelom, bolo potrebné tieto dáta **optimalizovať a zmenšiť**. (Urban, 2025)

Pretože ide o **plechový diel s rovnomernou hrúbkou**, stačí v modeli zachytiť len **jednu jeho stranu** – tú, ktorá definuje tvar povrchu. **Vnútrorná strana blatníka** bola pokrytá hrubou **ochrannou vrstvou proti korózii**. Táto vrstva je bežne používaná aj na spodné časti áut a chráni ich pred mechanickým poškodením. Takýto náter však spôsobuje **nerovnosti a hrubý povrch**, čo sťažuje ďalšiu prácu s naskenovanou sieťou. Preto pre účely reverzného inžinierstva **odstránené boli polygóny**, ktoré túto vrstvu reprezentovali (Obr. 8.19). Tým sa podarilo **zmenšiť veľkosť siete na približne polovicu** pôvodných dát. (Urban, 2025)

V oblastiach, kde sa nachádzajú **funkčné prvky a otvory**, však boli zachované **obe strany siete**, aby sa na technicky významnej časti zachovala **maximálna kvalita modelu**. Dodatočne bola ešte vykonaná **redukcia veľkosti siete**, čo umožnilo **efektívnejšie prispôbenie povrchov pri ďalšom spracovaní**. (Urban, 2025)

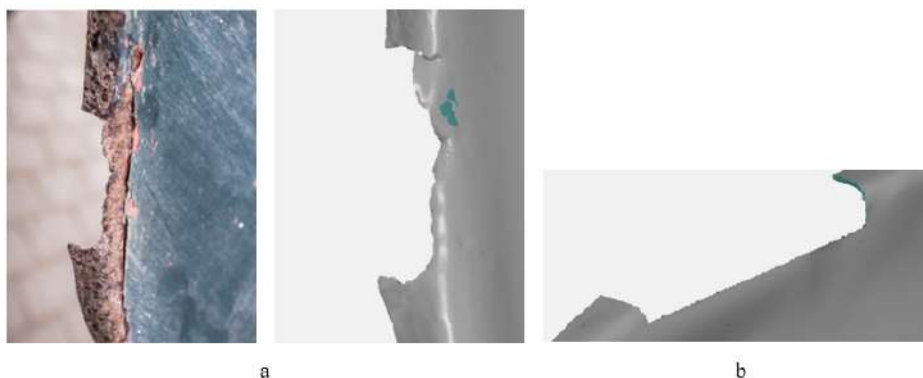


Obr. 8.19. Označené polygóny (červenou farbou) pre odstránenie (Urban, 2025)

Po naskenovaní blatníka nasledovala fáza opravy sieťového modelu, ktorý obsahoval viaceré chyby. Nerovnosti vznikli najmä v dôsledku korózie a mechanického poškodenia

kovu – typicky išlo o preliačiny alebo deformácie spôsobené počas používania dielu. Tieto chyby boli identifikované a následne upravované pomocou funkcie „**Repair mesh**“, ktorá umožňuje vyhladzovanie vybraných oblastí siete. Okrem vyhladzovania sa na zlepšenie kvality siete použili aj ďalšie nástroje ako „**Smooth mesh**“ na celkové zjemnenie povrchu a „**Close holes**“ na vyplnenie otvorov vzniknutých počas skenovania.

Osobitnou výzvou boli **chýbajúce alebo výrazne zdeformované časti blatníka**, ktoré bolo potrebné nielen opraviť, ale aj rekonštruovať tak, aby bol zachovaný pôvodný tvar dielu (Obr. 8.20a). Na menšie deformácie bola opäť použitá funkcia „**Repair mesh**“. V prípade chýbajúcich častí, napríklad v spodnej časti blatníka, sa otvory vyplnili pomocou funkcie „**Fill holes**“, dostupnej v softvéroch GOM Inspect aj InnovMetric PolyWorks. Pred samotným vyplňaním chýbajúcich častí na polygónovom modeli bolo často nutné **pripraviť okraje siete**, keďže zdeformované rohy mohli narušiť správnu rekonštrukciu chýbajúcich častí. Riešením bolo odstrániť širšiu oblasť okolo otvoru, čím sa vytvoril čistý a rovný priestor na vyplnenie (Obr. 8.20b). Týmto krokom sa zároveň odstránili zakrivené a poškodené hrany. (Urban, 2025)

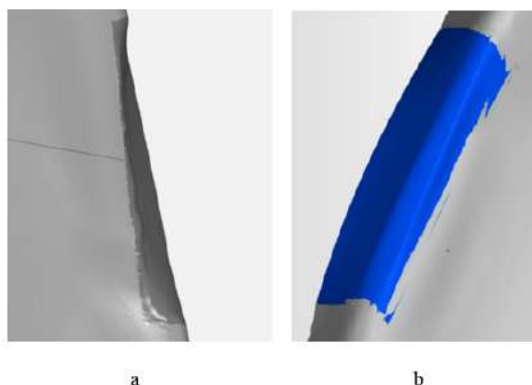


Obr. 8.20. Stav povrchu pred digitálnou rekonštrukciou (Urban, 2025)
a – korodovaná a chýbajúca časť (fotografia a digitálny model získaný 3D skenovaním),
b – pripravené okraje chýbajúcej časti na hrane blatníka na digitálne vyplnenie

Pri rekonštrukcii náročnejších oblastí, kde štandardné vyplnenie chýbajúcich častí nestačilo (Obr. 8.21a), sa v softvéri **InnovMetric PolyWorks** aplikovala metóda **napasovania (prispôsobenia) povrchu (surface fitting)**. Tento postup spočíva v umiestnení kotevných bodov na sieť, na základe ktorých softvér dopočíta hladkú plochu zodpovedajúcu pôvodnému tvaru dielu. Po vytvorení povrchu bola naň vygenerovaná nová sieť, čím sa výrazne zvýšila plynulosť a presnosť tvaru. V prípade potreby bolo možno výslednú geometriu ešte vylepšiť zahustením siete alebo dodatočným vyhladením povrchu (Obr. 8.21b). Tieto úpravy sa potom aplikovali aj na iné oblasti s poškodením, čím sa dosiahla **vizuálne aj geometricky spojitá sieť**, čo je dôležité najmä v oblastiach, kde sa očakáva plynulý prechod povrchov bez výrazných prechodov alebo skokov. (Urban, 2025)

Po ukončení všetkých korekcií bola sieť pripravená na reverzné modelovanie. Väčšina úprav bola vykonaná v softvéri **GOM Inspect**. Najmä pri rekonštrukcii tvarovo náročných oblastí modul **Modeler** softvéru **InnovMetric PolyWorks** bol použitý, ktorého nástroje boli využité pri riešení geometricky zložitejších častí modelu. Oba softvéry poskytujú porovnateľné základné funkcie, no výhodou softvéru InnovMetric PolyWorks je jeho

flexibilita pri riešení komplexných tvarových úloh. Vďaka kombinácii týchto nástrojov sa podarilo pripraviť kvalitný sieťový model vhodný pre ďalšie kroky reverzného inžinierstva. (Urban, 2025)



Obr. 8.21. Porovnanie metód digitálneho vyplnenia chýbajúcej časti na hrane blatníka (Urban, 2025)
a – konvenčné digitálne vyplnenie vykonané v softvéri GOM Inspect,
b – prispôsobený povrch na polygónovej mriežke pomocou softvéru InnovMetric PolyWorks.

8.5.5 Tvorba CAD modelov (CAD plôch) z polygónovej siete – reverzné modelovanie s využitím softvéru InnovMetric PolyWorks

Po optimalizácii polygónovej siete nasledoval proces reverzného modelovania, ktorého cieľom bola rekonštrukcia geometrie reálneho dielu v digitálnom prostredí. V prípade voľných tvarových plôch (free-form surfaces – FFS), aké sú typické pre karosárske komponenty, predstavuje využitie neuniformných racionálnych B-splajnov (Non-Uniform Rational B-Splines – NURBS) najvhodnejší prístup, nakoľko umožňuje verné zachovanie krivosti a celkového tvarového charakteru modelovaného objektu.

Pri digitálnej rekonštrukcii karosárskych častí je nevyhnutné dosiahnuť nielen rozmerovú presnosť, ale aj vizuálnu zhodu s originálom. Z tohto dôvodu bol kladený dôraz na korektné spracovanie vstupnej siete, aby sa pri jej editácii predišlo nežiaducim zásahom do dizajnových prvkov, ako sú charakteristické zakrivenia a prechody plôch. S ohľadom na konštrukčné riešenie skúmaného dielu – konkrétne fakt, že blatník pozostával z niekoľkých častí (pozri kap. 8.5.4 resp. Obr. 8.17) – bolo potrebné túto štruktúru reflektovať aj pri digitálnom modelovaní. (Urban, 2025))

Témou tvorby NURBS resp. CAD plôch na základe polygónového modelu sa zaoberá Csontos (2013) a Lecký (2016).

Reverzné inžinierstvo možno realizovať viacerými spôsobmi, v tomto prípade bol celý proces modelovania vykonaný pomocou softvérového balíka **InnovMetric PolyWorks MetrologySuite 2024 IR9** (v ďalšom texte označovaný ako InnovMetric PolyWorks). Ide o komplexné riešenie pre inžinierske aplikácie, ktoré zahŕňa nástroje na meranie, kontrolu rozmerov, ako aj moduly určené pre reverzné modelovanie. (Urban, 2025)

Využitý bol najmä modul **Modeler**, ktorý umožňuje nielen modelovanie na základe polygónových sietí, ale aj ich pokročilú editáciu. Základné operácie so sieťou boli realizované už v predchádzajúcej fáze v prostredí softvéru **GOM Inspect**, zatiaľ čo

pokročilé kroky boli potom vykonané v softvéri InnovMetric PolyWorks. Keďže modelovaný blatník pozostáva prevažne z voľných tvarových plôch, ako optimálne riešenie sa osvedčila technika „pokladania“ NURBS plôch na polygónový model. Softvér InnovMetric PolyWorks poskytuje flexibilné nástroje na generovanie tzv. NURBS segmentov plôch (*patches*), ktoré sa prispôbujú podľa požadovanej presnosti a technických požiadaviek.

Vzhľadom na to, že skenovaný diel bol zostavený z viacerých častí, aj digitálny model bol rozdelený podľa línií zvarov. Samotný proces vytvárania NURBS plôch v prostredí InnovMetric PolyWorks prebiehal v nasledovných krokoch: (Urban, 2025)

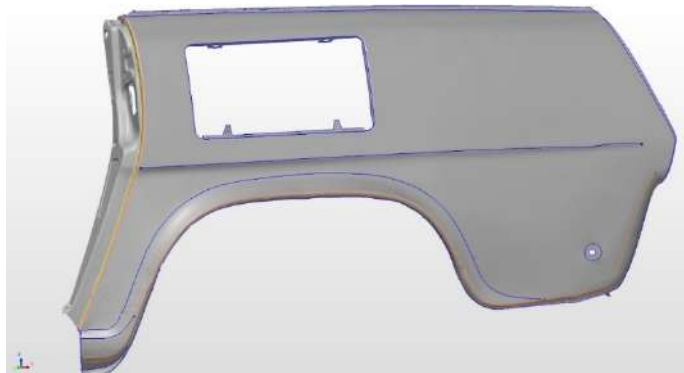
1. **Vytvorenie „magnetických kriviek“** (*magnetic curves*) na povrchu siete, ktoré definujú hranice oblastí určených na rekonštrukciu.
2. **Rozdelenie modelu pomocou ďalších magnetických kriviek**, čím sa určí členenie na menšie segmenty plôch (*patches*).
3. **Analýza a korekcia kriviek**, v prípade potreby sa upravujú na zabezpečenie plynulého a bezchybného modelovania.
4. **Generovanie NURBS segmentov plôch na základe kriviek**. V komplikovaných oblastiach (napr. v okolí otvorov, spojov zakrivení) sa segmenty plôch ďalej delia na menšie celky. V tomto kroku zatiaľ nedochádza k samotnému napasovaniu na sieť.
5. **Ďalšie napasovanie NURBS segmentov plôch na polygónový model**, čím sa premenia na plnohodnotné NURBS plochy. Počas tohto kroku možno nastavovať presnosť, toleranciu, či parametre zakrivenia. Vybrané plochy možno dodatočne upraviť alebo opätovne napasovať.
6. **Kontrola presnosti napasovania**, najmä odchýlok medzi NURBS povrchom a polygónovým modelom.
7. **Korekcie segmentov plôch alebo vymedzujúcich kriviek**, ak sú odchýlky mimo tolerancie – v tomto prípade je nutné segmenty plôch nanovo vygenerovať alebo opätovne napasovať.
8. **Využitie NURBS modelu v ďalších aplikáciách**, napr. pre konštrukčné spracovanie, simulácie alebo výrobu.

Výsledkom tohto pracovného postupu je tvorba tvarovo presných povrchov bez hrúbky materiálu – ide teda o povrchový model. Funkcia „offset“ umožňuje potom k týmto povrchom pridať materiálovú hrúbku, avšak len v prípade, že sú NURBS segmenty plôch bez chýb a ostrých prechodov. Preto bolo potrebné niektoré oblasti modelu dôkladne prepracovať, aby bolo možno vytvoriť plnohodnotný 3D model s hrúbkou materiálu. V tomto prípade výrazne napomáha fakt, že ide o plechový diel – teda postačuje vytvoriť model jednej strany, ku ktorej sa potom pridá definovaná hrúbka. (Urban, 2025)

V nasledujúcich kapitolách je opísaný proces reverzného modelovania jednotlivých častí blatníka, keďže každá z nich vykazovala špecifické geometrické a tvarové vlastnosti, ktoré si vyžiadali odlišný prístup pri modelovaní.

8.5.5.1 Reverzné modelovanie vonkajšieho prvku blatníka

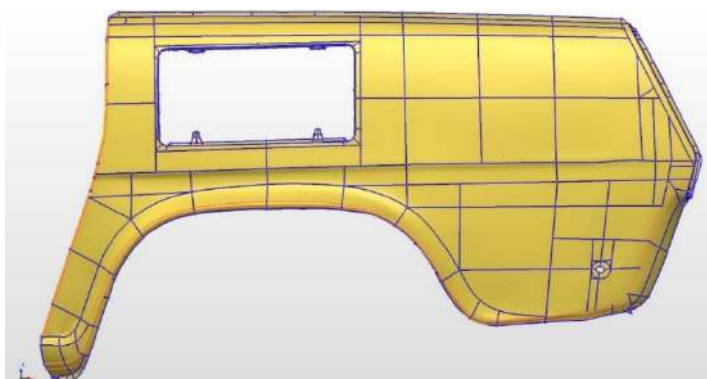
V úvodnej fáze modelovania boli na polygónovom modeli vytvorené základné vodiace krivky, ktoré definujú primárny tvar dielu. Na Obr. 8.22 je zobrazený vonkajší prvok blatníka so zvýraznenými okrajovými a hlavnými krivkami.



Obr. 8.22. Karosárska časť s ohraničujúcimi krivkami a krivkami označujúcimi zaoblenia (Urban, 2025)

Softvér **InnovMetric PolyWorks** dokáže automaticky identifikovať niektoré charakteristické prvky modelu, ako sú napr. hrany a zaoblenia. Dve oranžové krivky napríklad označujú konce zaoblenia a boli vygenerované automaticky. Ostatné, modré krivky boli buď ručne prispôsobené, alebo boli vytvorené na základe detegovaného stredú geometrického prvku – napríklad v oblasti obdĺžnikového otvoru softvér automaticky rozpoznal priebeh zakrivenia pozdĺž hrany zaoblenia a vygeneroval príslušnú krivku. (Urban, 2025)

Na základe týchto hlavných kriviek boli potom vytvorené tzv. **magnetické krivky**, ktoré slúžia na rozdelenie povrchu modelu do menších oblastí. V rámci týchto menších segmentov sa potom generujú jednotlivé NURBS segmenty plôch, ktoré tvoria finálnu geometriu povrchu (Obr. 8.23).

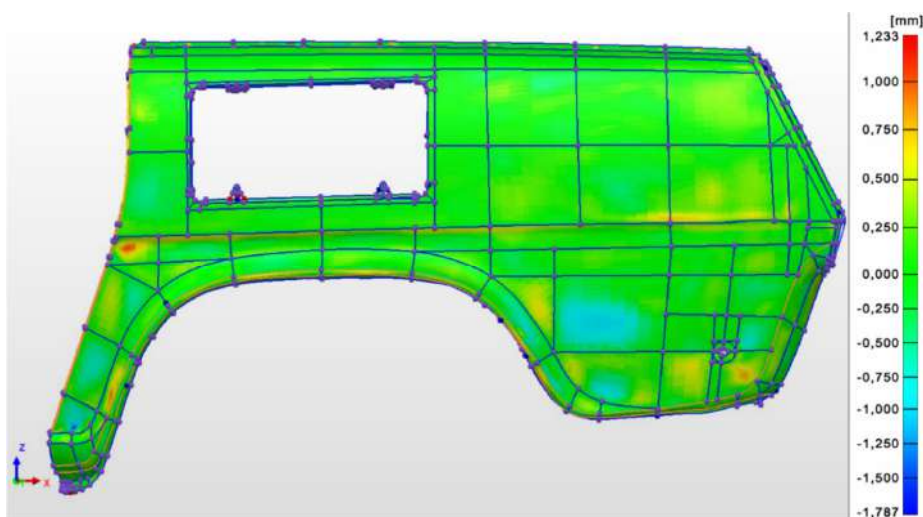


Obr. 8.23. Vygenerované/napasované NURBS segmenty plôch (NURBS patches) – modré krivky označujú hranice segmentov plôch (patches) (Urban, 2025)

Aj keď softvér umožňuje automatické generovanie segmentov plôch, táto metóda nebola použitá – dôvodom je, že pri zložitejších geometrických tvaroch by viedla k nadmernému množstvu segmentov plôch a zníženej kvalite povrchu.

Po napasovaní segmentov plôch na polygónový model môžu vzniknúť problémy s presnosťou – najmä v oblastiach so zmenami zakrivenia alebo v miestach, kde obsahuje polygónová sieť chyby, ktoré neboli predtým opravené. Na vyriešenie týchto problémov je vhodné použitie funkciu „**Custom Fit**“, ktorá umožňuje prispôbenie napasovania podľa požiadaviek. V tomto kroku bola povolená väčšia tolerancia prispôbenia, čo eliminovalo nežiaduce nerovnosti a viedlo k plynulejšiemu prechodu plochy. Hoci môže v niektorých miestach dôjsť k miernemu zníženiu geometrickej presnosti, výsledkom je plynulejšia krivka a lepšia kontinuita povrchu. Alternatívne možno použiť aj metódu napasovania s pevnejším (stabilnejším) charakterom, ktorá síce zachová vyššiu presnosť, no za cenu menej plynulého povrchu. Výber správneho spôsobu napasovania („fitting“) je zásadný, najmä v prípade, ak sa z povrchového modelu plánuje generovať hrúbka materiálu pomocou funkcie „offset“. Nevhodne napasované plochy môžu totiž spôsobiť výpočtové chyby pri generovaní plnohodnotného 3D modelu. (Urban, 2025)

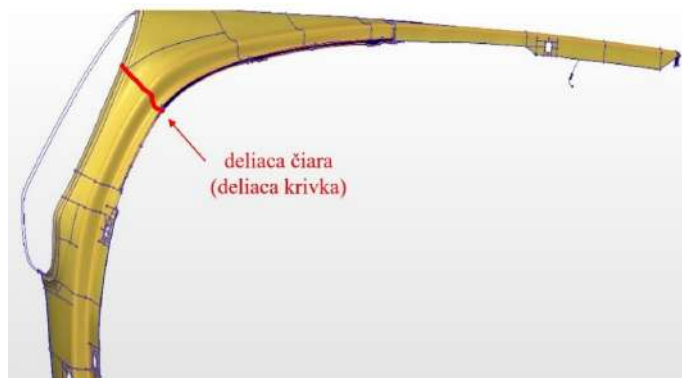
Na Obr. 8.24 sú znázornené chyby napasovania, pričom ide o zobrazenie rozdielov medzi polygónovým modelom a vygenerovanými NURBS plochami. Najväčšie odchýlky sa vyskytli v oblastiach, kde bola pôvodná plocha deformovaná alebo preliačená, no počas modelovania bola nahradená ideálne hladkým povrchom.



Obr. 8.24. Odchýlky prispôbenia povrchu na vonkajšom prvku blatníka (Urban, 2025)

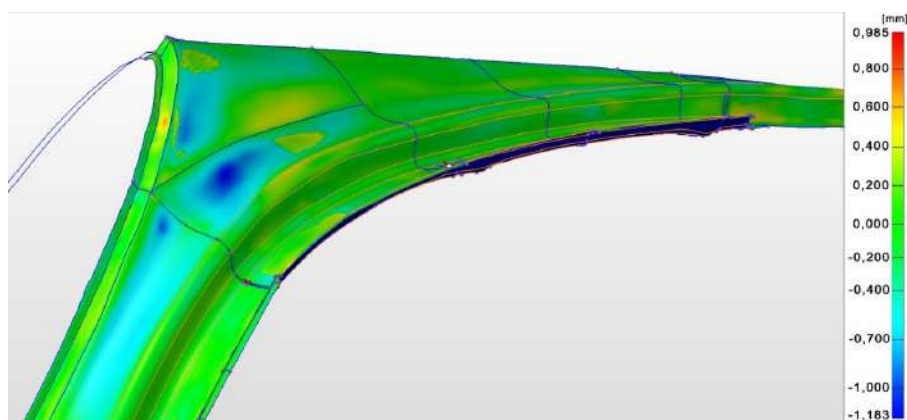
8.5.5.2 Reverzné modelovanie vnútorných prvkov blatníka

Pri vytváraní vnútorných častí blatníka boli použité rovnaké hlavné a ohraničujúce krivky ako pri vonkajšej časti, ale práca prebiehala v samostatnom súbore. Tento prístup znižuje nároky na hardvér počas práce. Na Obr. 8.25 sú znázornené vygenerované NURBS segmenty plôch, ktoré boli potom rozdelené do dvoch samostatných celkov — dolnej a hornej časti. (Urban, 2025)



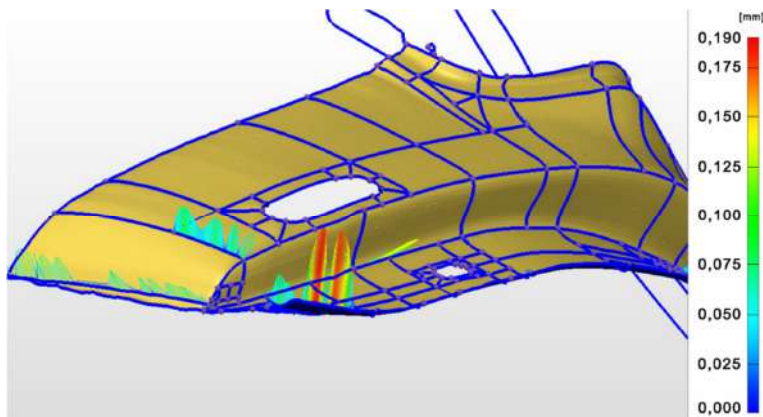
Obr. 8.25. Vygenerované segmenty plôch na vnútornom prvku blatníka (upravený na základe (Urban, 2025))

V oblastiach so zložitejšou geometriou, ako napr. v okolí zadného svetla, bolo výhodné ďalej rozdeliť plochy na menšie segmenty plôch. Obr. 8.26 zobrazuje odchýlky prispôbenia medzi polygónovým a NURBS modelom práve v týchto zložitejších oblastiach. (Urban, 2025)



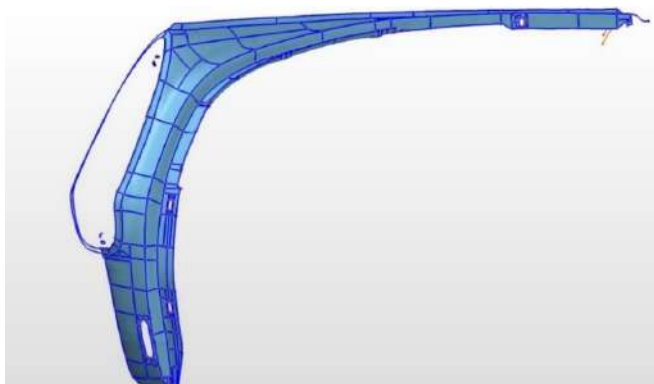
Obr. 8.26. Odchýlky prispôbenia medzi polygónovým a NURBS modelom (Urban, 2025)

Okrem odchýlok v samotnom prispôbení môžu vznikáť aj pozičné odchýlky (*positional deviations*) medzi segmentmi plôch — najmä tam, kde sa stretávajú. Väčšie rozdiely môžu spôsobovať problémy pri generovaní materiálovej hrúbky, keďže softvér nemusí presne identifikovať spoje medzi plochami. Tieto miesta sú zreteľne viditeľné na Obr. 8.27. Napriek tomu sa dosiahla dobrá presnosť bez potreby dodatočných korekcií. Väčšie odchýlky sa typicky vyskytovali tam, kde sa segmenty plôch stretávali v oblastiach so zmenou zakrivenia. V takýchto prípadoch bolo výhodnejšie pokryť danú oblasť jednou väčšou plochou a hranice medzi segmentmi plôch umiestniť do rovnejších úsekov. (Urban, 2025)



Obr. 8.27. Pozíčne odchýlky medzi jednotlivými segmentmi plôch (Urban, 2025)

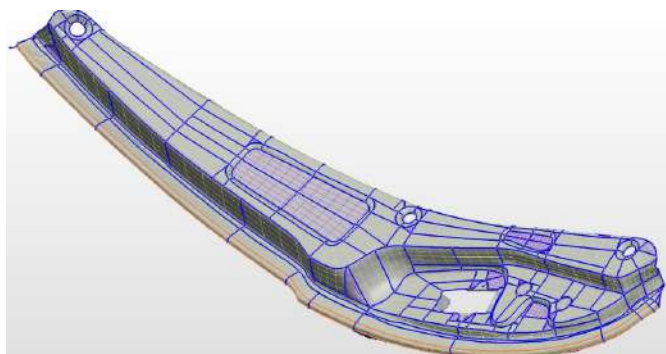
Po kontrole a vyhodnotení chýb bolo možno pridať hrúbku (t. j. „offset“) na NURBS povrchy. Vnútorňá časť blatníka mala menej chýb, keďže je tvarovo jednoduchšia než vonkajšia. Funkcia „offset“ bola použitá v dvoch krokoch: najprv bola vytvorená spodná časť a potom horná časť (ako je znázornené na Obr. 8.25). Výsledný NURBS model pripravený na export do formátu .IGES je zobrazený na Obr. 8.28. (Urban, 2025)



Obr. 8.28. Vygenerovaný NURBS model pripravený na export (Urban, 2025)

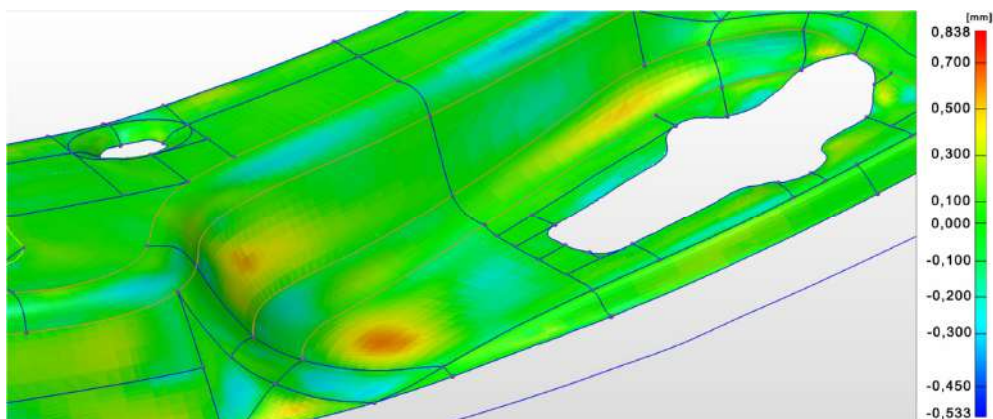
8.5.5.3 Reverzné modelovanie prvku pri dverách

Posledným krokom reverzného modelovania bolo modelovanie prvku pri dverách (Obr. 8.29). Vizualne možno tento prvok nevyzerá zložito, avšak obsahuje dôležité funkčné prvky (otvory a prelisy), ktoré bolo potrebné presne zrekonštruovať.



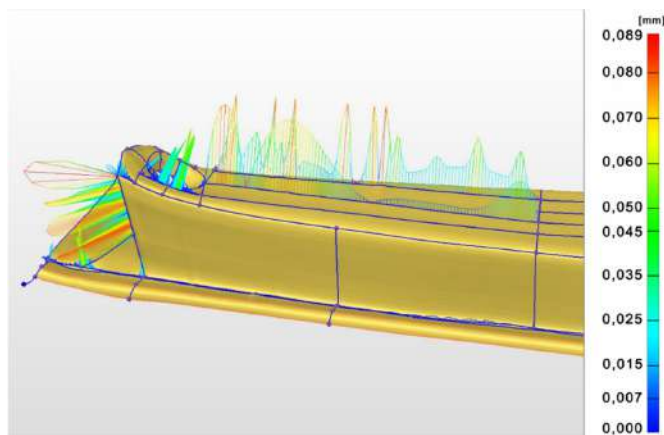
Obr. 8.29. NURBS segmenty plôch vytvorené na prvku pri dverách (Urban, 2025)

Vzhľadom na to, že funkcia „offset“ nedokáže správne pracovať s ostrými hranami, bolo dôležité generovať NURBS segmenty plôch tak, aby ich hrany mierne prekryvali ostré prechody. Toto sa ukázalo ako kľúčové najmä pri modelovaní prelisov (*dimples*), kde sa ostré hrany často vyskytujú (Obr. 8.30).



Obr. 8.30. Chyby prispôsobenia NURBS segmentov plôch na polygónovom modeli (Urban, 2025)

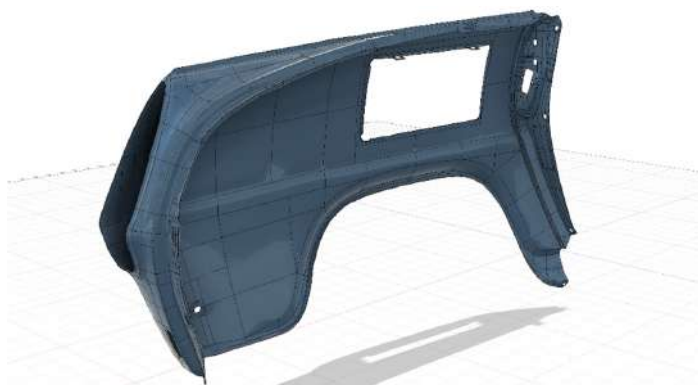
Najviac chýb sa vyskytovalo v oblastiach s výraznými zakriveniami. Najväčšie pozičné odchýlky boli zaznamenané pri trojstranných segmentoch plôch, ktoré však boli prevažne umiestnené na rovných plochách modelu. Vďaka tomu tieto odchýlky nemali výrazný negatívny vplyv na celkovú presnosť. Aj napriek týmto nepresnostiam bola presnosť v porovnaní s predchádzajúcimi časťami stále uspokojivá (Obr. 8.31). (Urban, 2025)



Obr. 8.31. Pozičné odchýlky v oblasti trojstranných segmentoch plôch (Urban, 2025)

8.5.5.4 Finálne digitálne spájanie prvkov blatníka

Všetky vygenerované NURBS modely boli exportované do neutrálneho formátu .IGES, čo umožňuje ich ďalšie spracovanie a využitie v rôznych CAD systémoch. Finálne digitálne zostavenie celého modelu prebehlo v prostredí softvéru Autodesk Fusion 360, ako znázorňuje Obr. 8.32. (Urban, 2025))



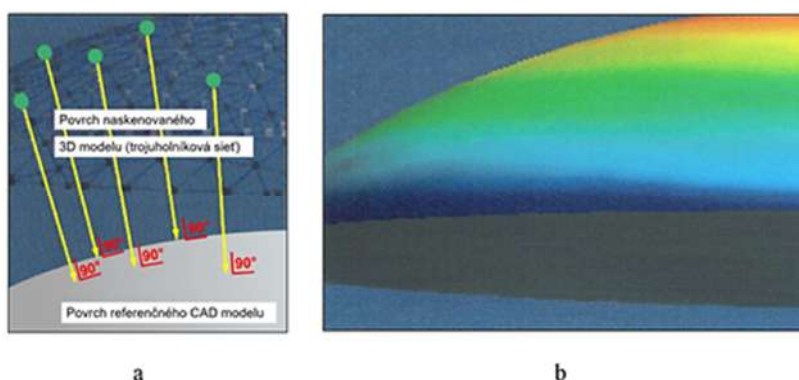
Obr. 8.32. Digitálne zostavený model blatníka vo finálnej podobe (Urban, 2025)

8.5.6 Farebné mapy odchýlok

Farebné mapy odchýlok predstavujú efektívny nástroj na vizualizáciu kvality spracovania a presnosti digitálnych modelov v rôznych fázach reverzného inžinierstva alebo výroby. Ich využitie umožňuje identifikovať nielen lokálne deformácie a chyby, ale aj celkové odchýlky, ktoré môžu ovplyvniť funkčnosť alebo estetiku finálneho dielu. Farby na týchto mapách sú zvolené tak, aby intuitívne vyjadrovali mieru odchýlok. Tento vizuálny prístup výrazne uľahčuje analýzu a rozhodovanie o ďalších krokoch opravy, optimalizácie alebo schválenia modelu, čím podporuje efektívnu komunikáciu medzi technikmi, inžiniermi a ďalšími zainteresovanými stranami.

V závislosti od kontrolnej úlohy možno v softvéroch GOM ATOS Professional, GOM Inspect alebo InnovMetric PolyWorks vytvoriť mapy odchýlok pre povrch (resp. povrchy) objektu (surface deviation maps, resp. surface deviation plots).

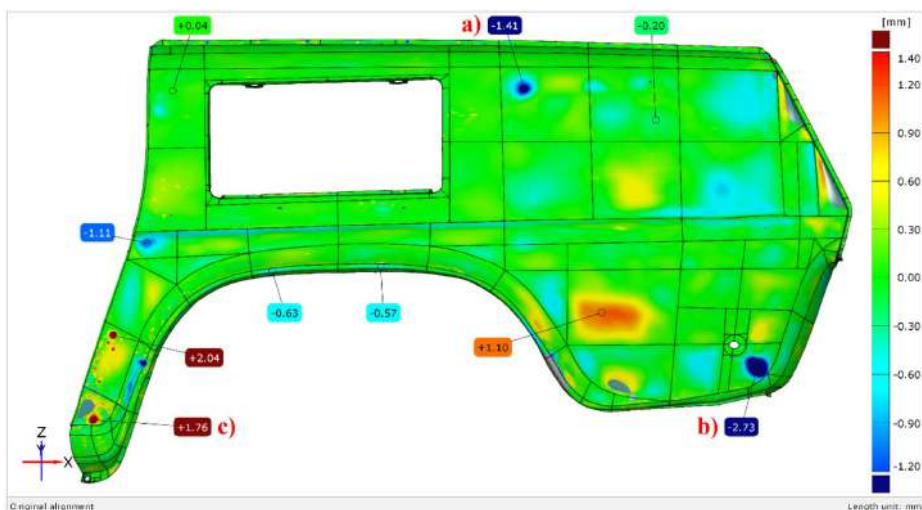
Na tomto porovnávacom princípe softvér určí odchýlku napr. medzi povrchom referenčného CAD modelu a naskenovaného 3D modelu. To znamená, že softvér vypočíta najkratšiu ortogonálnu vzdialenosť každého bodu nameraných dát od povrchu CAD modelu (Obr. 8.33a). Odchýlky sú zobrazené pomocou farebných máp odchýlok. Každý bod je zafarbený v závislosti od svojej odchýlky od CAD dát. Tieto mapy odchýlok môžu byť zobrazené ako farebné plochy (Obr. 8.33b), farebné rezy alebo farebné vektorové mapy odchýlok. (GOM, 2005b; Morovič, 2007)



Obr. 8.33. Mapa odchýlok pre povrch (GOM, 2005b)
a – ilustrácia princípu výpočtu odchýlky pre konkrétne body,
b – porovnanie zobrazené ako farebná mapa odchýlok

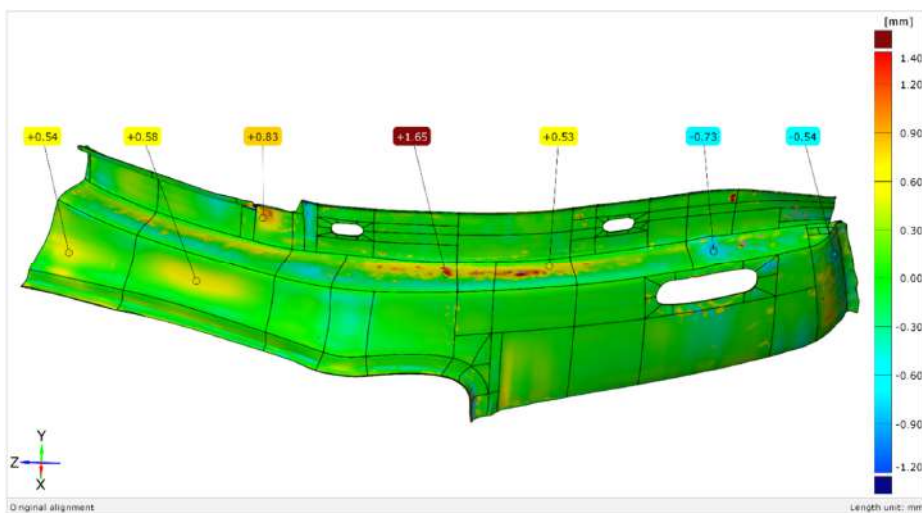
Farebné mapy odchýlok boli vytvorené medzi polygónovými sieťami (získané 3D skenovaním a ďalšou polygonizáciou mraku bodov) a NURBS modelmi vygenerovanými na základe týchto polygónových sietí. Ako vstup do porovnania boli použité neupravené modely polygónových sietí. Takéto porovnanie zároveň demonštruje možnosti nástrojov na úpravu sietí, konkrétne to, do akej miery možno opraviť poškodené alebo nerovné povrchy bez narušenia pôvodného tvaru digitalizovaného objektu. (Urban, 2025)

Na Obr. 8.34 až Obr. 8.37 sú zobrazené farebné mapy odchýlok povrchov modelov vytvorených v softvéri InnovMetric PolyWorks. Niektoré z týchto odchýlok sú označené štítkami (*labels*) s hodnotami v milimetroch. Označenia (a) a (b) poukazujú na preliačené časti povrchu. Výraznejšie odchýlky sa prejavili najmä v oblastiach postihnutých koróziou (označenie (c)), čo bolo zámerne ponechané ako súčasť kontroly – cieľom bolo ukázať, do akej miery možno model siete upraviť a zároveň zachovať jeho charakteristiky. (Urban, 2025)



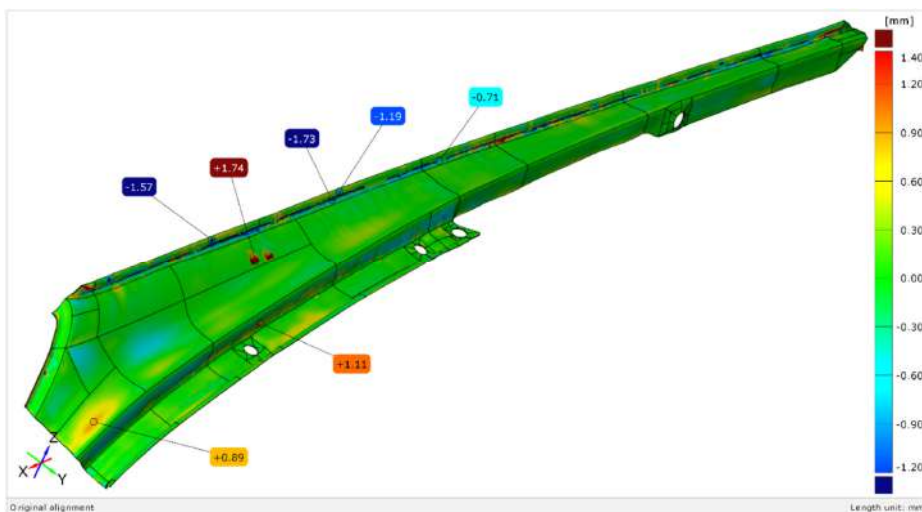
Obr. 8.34. Farebná mapa odchýlok – vonkajší prvok blatníka (Urban, 2025)

Merania boli vykonané aj na ďalších prvkoch (častiach) blatníka. Na Obr. 8.35 je spodný prvok blatníka. Väčšie odchýlky boli najmä v skorodovaných oblastiach.



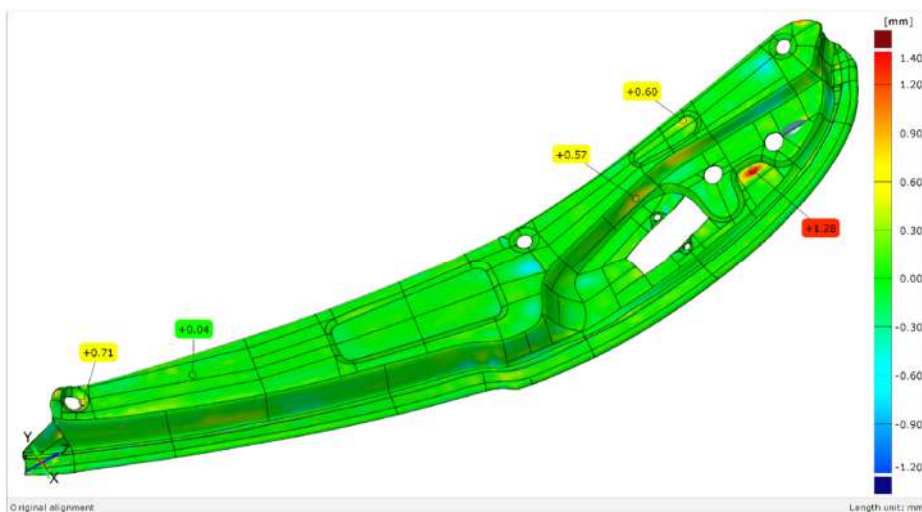
Obr. 8.35. Farebná mapa odchýlok – spodný prvok blatníka (Urban, 2025)

Vnútný prvok blatníka – horná časť blatníka – mal najvýraznejšie odchýlky v okolí zvarového lemu, keďže táto oblasť bola dodatočne zahladená (Obr. 8.36).



Obr. 8.36. Farebná mapa odchýlok – vnútorný prvok blatníka – horná časť blatníka (Urban, 2025)

Spomedzi všetkých prvkov bol najpresnejšie modelovaný prvok pri dverách – NURBS model sa tu najviac priblížil skutočnej polygónovej sieti (Obr. 8.37). Keďže tento diel bol prakticky bez deformácií, bolo možno ho vygenerovať bez nutnosti úprav pôvodnej siete.



Obr. 8.37. Farebná mapa odchýlok – prvok pri dverách (Urban, 2025)

8.5.7 Renderovanie blatníka

Renderovanie (t. j. fotorealistické zobrazenie) digitálneho modelu umožňuje nielen vizuálne zhodnotiť jeho tvar a detaily, ale aj simulovať materiálové vlastnosti povrchu, osvetlenie a tieňovanie, čím sa vytvára realistickejší dojem hotového dielu. Tento proces je kľúčový pre prezentáciu návrhov, ako aj pre overenie vizuálnej konzistencie pred samotnou výrobou alebo reštaurovaním daného diela. Využitie pokročilých renderovacích techník pomáha

odhaliť aj drobné nerovnosti či odchýlky na dieloch, ktoré môžu byť dôležité pre finálnu kvalitu výrobkov.

Okrem estetickej stránky slúži renderovanie aj ako nástroj pre lepšiu komunikáciu medzi technickými tímami a zadávateľmi projektu, pretože poskytuje zrozumiteľný vizuálny výstup, ktorý je často ľahšie pochopiteľný než technické výkresy alebo samotné 3D modely. Moderné softvéry, ako Autodesk 3ds Max, Autodesk Fusion 360, Blender Foundation Blender, Dassault Systèmes CATIA, Dassault Systèmes SolidWorks Visualize a pod. ponúkajú široké možnosti nastavenia svetelných podmienok, materiálov a perspektív, čo umožňuje detailné preskúmanie modelu z rôznych uhlov a pomáha pri rozhodovaní o ďalších úpravách či schválení dizajnu.

Na základe vytvoreného NURBS modelu so všetkými zostavenými prvkami boli pripravené aj digitálne vizualizácie (Obr. 8.38a). Renderované obrázky boli vytvorené v softvéri **Autodesk Fusion 360** z premodelovaného modelu vytvoreného v softvéri InnovMetric PolyWorks. Detailnejší pohľad z perspektívy je znázornený na Obr. 8.38b. Na modeli sú viditeľné aj drobné nepravidelnosti povrchu. Prvok pri dverách je detailne zobrazený na Obr. 8.38c, a to s cieľom zvýrazniť jeho presný geometrický tvar. (Urban, 2025)



Obr. 8.38. Renderovanie blatníka (Urban, 2025)

a – vyrenderovaný digitálne zostavený model blatníka vo finálnej podobe, b – vnútorná strana blatníka, c – prvok pri dverách – InnovMetric PolyWorks model

Záver

V predchádzajúcich kapitolách bolo predstavené reverzné inžinierstvo s využitím softvéru **InnovMetric PolyWorks**, ktorý predstavuje jedno z najkomplexnejších riešení pre rekonštrukciu 3D modelov. Osobitný dôraz bol kladený na proces vytvárania CAD modelov (CAD plôch) na základe dát získaných 3D skenovaním. Rekonštrukcia bola realizovaná pomocou NURBS modelovania, pričom sa využívali nástroje dostupné v module **Modeler** softvéru **InnovMetric PolyWorks**, ktoré sú špeciálne optimalizované pre reverzné modelovanie komplexných geometrických tvarov, resp. voľných tvarových plôch.

Jednou z významných výhod softvéru InnovMetric PolyWorks je schopnosť **automatického rozpoznávania geometrických prvkov**, ako sú hrany zaoblení a obrysových línií, čo výrazne uľahčuje proces vytvárania kriviek. Tieto krivky tvoria základ pre ďalšie generovanie NURBS plôch. Softvér InnovMetric PolyWorks umožňuje ich vytváranie **automaticky aj manuálne**, pričom intuitívne rozhranie umožňuje jednoduchú editáciu a prispôbenie podľa konkrétnych požiadaviek.

Dôležitým krokom bolo aj **porovnanie výsledných NURBS modelov (plôch) s pôvodnými polygónovými sieťami**, ktoré slúžia na overenie presnosti rekonštrukcie. Takýto postup je kľúčový najmä v prípadoch, kde je požadovaná vysoká rozmerová presnosť pre ďalšie výrobné alebo návrhové procesy.

Cieľom predchádzajúcich kapitol bolo ukázať praktickú aplikáciu softvéru InnovMetric PolyWorks pri vytváraní CAD modelu z polygónovej siete. Softvér poskytuje intuitívne prostredie a účinné nástroje pre efektívnu rekonštrukciu 3D dát, pričom jeho funkcie môžu byť v budúcnosti ešte výraznejšie rozšírené prostredníctvom umelej inteligencie. V spojení s trendmi digitalizácie, automatizácie a smart výroby sa **reverzné inžinierstvo** čoraz viac stáva strategickým prvkom v životnom cykle produktu – od prototypovania až po sériovú výrobu.

V súčasnosti je reverzné inžinierstvo stále viac ovplyvňované nástupom **umelej inteligencie (Artificial Intelligence – AI)**, ktorá postupne mení spôsob spracovania dát z 3D skenovania. Moderné algoritmy využívajúce **strojové učenie a neurónové siete** dokážu nielen zjednodušiť proces vytvárania NURBS plôch, ale zároveň zvyšujú presnosť, rýchlosť a automatizáciu celého pracovného postupu (Dong a kol., 2024; Li a kol., 2023; Liu a kol., 2024; Prasad a kol., 2022).

Už dnes existujú softvéry a riešenia, ktoré integrujú AI prvky do procesu rekonštrukcie geometrie (AUTODESK, 2024; AUTODESK, 2025; INNOVMETRIC SOFTWARE, 2025; LASER DESIGN, 2025):

- **Autodesk Fusion 360** – rozširuje svoje nástroje o návrhové algoritmy riadené umelou inteligenciou, ktoré dokážu optimalizovať CAD modely podľa požiadaviek a podporujú poloaautomatické generovanie dizajnu.
- **Geomagic Design X** – známy nástroj na konverziu polygónových sietí na CAD modely, ktorý už využíva inteligentné algoritmy pre detekciu plôch, prvkov a automatické generovanie NURBS geometrie.
- **Siemens NX a PTC Creo** – integrovali nástroje na automatické rozpoznávanie geometrických prvkov a poskytujú konštrukčné odporúčania založené na dátach z predchádzajúcich návrhov a AI modelov.

- **InnovMetric PolyWorks AI-enhanced workflows** – softvér InnovMetric PolyWorks začína pridávať moduly, ktoré sa učia z užívateľských operácií a odporúčajú najefektívnejšie postupy rekonštrukcie na základe predošlých pracovných krokov a analýzy geometrie.
- **Autodesk PowerShape** – výkonný nástroj určený pre prípravu modelov, ktorý však disponuje aj špecializovanými funkciami pre reverzné inžinierstvo, ako je spracovanie .STL dát, rozpoznávanie tvarových prvkov a tvorba plôch z polygónových modelov. Najnovšia verzia softvéru PowerShape integruje aj funkcie na poloautomatickú tvorbu NURBS plôch a inteligentnú segmentáciu mesh geometrie, ktoré možno považovať za nástrojovú podporu využívajúcu princípy umelej inteligencie.

V budúcnosti sa predpokladá, že **umelá inteligencia bude schopná generovať celé NURBS modely automaticky** len na základe vstupnej polygónovej siete a niekoľkých parametrických vstupov od používateľa. Okrem toho bude schopná identifikovať **konštrukčné zámery**, ktoré v súčasnosti ešte vyžadujú manuálnu interpretáciu (napr. detekcia symetrie, funkčných povrchov, montážnych plôch a pod.).

Vývoj v tejto oblasti smeruje k plnej **automatizácii a inteligentnému asistenčnému systému**, ktorý bude schopný spolupracovať s dizajnérom v reálnom čase, predvídať jeho kroky a navrhovať optimálne riešenia. To môže výrazne zmeniť nielen samotný proces reverzného inžinierstva, ale aj jeho uplatnenie v návrhu, vývoji a výrobe produktov.

Zoznam bibliografických odkazov

3D SYSTEMS. 2014. *3D SYSTEMS, Inc. Geomagic Design X Help.*

AGRESTI, G. and ZANUTTIGH, P. 2019. Combination of Spatially-Modulated ToF and Structured Light for MPI-Free Depth Estimation. In: Leal-Taixé, L., Roth, S. (eds) *Computer Vision – ECCV 2018 Workshops. ECCV 2018. Lecture Notes in Computer Science.* vol. 11129. Cham: Springer. [online] [cit. 2025-06-19]. Dostupné na internete: https://doi.org/10.1007/978-3-030-11009-3_21.

AUTODESK, Inc. 2024. *Generative Design in Autodesk Fusion 360: revolutionizing design with AI.* [online]. Publikované na portáli *AUTODESK BLOG (Bryce Heventhal)* dňa 2024-09-30. [online] [cit. 2025-06-19]. Dostupné na internete: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/generative-design-in-autodesk-fusion-revolutionizing-design-with-ai/>.

AUTODESK, Inc. 2025. *Generative Design overview. AUTODESK FUSION. AUTODESK HELP.* [online] [cit. 2025-06-19]. Dostupné na internete: <https://help.autodesk.com/cloudhelp/ENU/Fusion-GenerativeDesign/files/GD-OVERVIEW.htm>.

BAMJI, C., GODBAZ, J., OH, M., MEHTA, S., PAYNE, A., ORTIZ, S., NAGARAJA, S., PERRY, T. and THOMPSON, B. 2022. A Review of Indirect Time-of-Flight Technologies. In *IEEE Transactions on Electron Devices.* vol. 69, issue 6, pp. 2779–2793. ISSN 0018-9383. [online] [cit. 2025-06-19]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1109/TED.2022.3145762>.

BARTOŠ, P. a FRAŠTIA, M. 2010. *Fotogrametria I. Vybrané state z analytickej fotogrametrie.* Bratislava: Vydavateľstvo STU v Bratislave. ISBN 978-80-227-3374-8.

BERRIO, J. S., SHAN, M., WORRALL, S. and NEBOT, E. 2022. Camera-Lidar Integration: Probabilistic Sensor Fusion for Semantic Mapping. In *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, issue 7, pp. 7637–7652. ISSN 1524-9050. [online] [cit. 2025-06-19]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3071647>.

BLAŠKO, M. 2009. *Určenie presnosti systémov ATOS a TRITOP* [Diplomová práca]. Trnava: Slovenská technická univerzita v Bratislave; Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave; Ústav výrobných technológií; Katedra obrábania a montáže. 60 s. Vedúci práce: doc. Ing. Augustín Görög, PhD.

BURANSKÝ, I. a MOROVIČ, L. 2021. *Ateliér počítačovej podpory návrhu a výroby III : reverzné inžinierstvo a reverzné geometrické modelovanie*. 1. vyd. Trnava: AlumniPress. 93 s. Edícia skript. ISBN 978-80-8096-289-0.

CASPI, D., KIRYATI, N. and SHAMIR, J. 1998. Range Imaging with Adaptive Color Structured Light. In *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. vol. 20, issue 5, pp. 470-480. ISSN 0162-8828. [online] [cit. 2025-07-21]. Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/publication/3192841_Range_imaging_with_adaptive_color_structured_light.

CSONTOS, D. 2013. *Tvorba NURBS plôch na základe polygónového modelu* [Diplomová práca]. Trnava: Slovenská technická univerzita v Bratislave; Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave; Ústav výrobných technológií. 71 s. Vedúci diplomovej práce: Ing. Ladislav MOROVIČ, PhD.

DONG, Q., XU, R., WANG, P., CHEN, S., XIN, S., JIA, X., WANG, W. and TU, C. 2024. NeurCADRecon: Neural Representation for Reconstructing CAD Surfaces by Enforcing Zero Gaussian Curvature. *ACM Transactions on Graphics*. vol. 43, issue 3, article number 51, pp. 1-17. ISSN 0730-0301. [online] [cit. 2025-07-21]. Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/publication/382418990_NeurCADRecon_Neural_Representation_for_Reconstructing_CAD_Surfaces_by_Enforcing_Zero_Gaussian_Curvature.

FUJIFILM FinePix S3 Pro Digital Camera. 2004. Imaging and Information. Ref. No. EB-319E (SK-04-01-F1120-F9711). Minato-Ku, Tokyo, Japan: Fuji Photo Film Co., Ltd. [online] [cit. 2013-08-31]. Dostupné na internete: <http://www.dpreview.com/news/0402/PMA/Fujifilm/Fujifilm%20S3%20Pro%20brochure.pdf>.

FURUKAWA, R., SAGAWA, R., KAWASAKI, H., SAKASHITA, K., YAGI, Y. and ASADA, N. 2012. Entire Shape Acquisition Technique Using Multiple Projectors and Cameras with Parallel Pattern Projection. In *IPSJ (Information Processing Society of Japan) Transactions on Computer Vision and Applications*. vol. 4, pp. 40-52. ISSN 1882-6695 [online] [cit. 2013-08-06]. DOI: 10.2197/ipsjtcva.4.1. [online] [cit. 2013-08-31]. Dostupné na internete: [https://klab2.cvg.ait.kyushu-u.ac.jp/papers/2010_2012/3-\(1\)-22-CVA4.pdf](https://klab2.cvg.ait.kyushu-u.ac.jp/papers/2010_2012/3-(1)-22-CVA4.pdf).

GENG, J. 2011. Structured-light 3D surface imaging: A tutorial. *Advances in optics and photonics*. vol. 3, issue 2, pp. 128–160. ISSN 1943-8206.

GRÚBEL, M. 2011. *Farebná optická 3D digitalizácia* [Diplomová práca]. Trnava: Slovenská technická univerzita v Bratislave; Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave; Ústav výrobných technológií. 94 s. Vedúci diplomovej práce: Ing. Ladislav Morovič, PhD.

GOM. 2005a. GOM ATOS I / I SO. User Information - Hardware. Braunschweig: GOM mbH.

GOM. 2005b. GOM ATOS v.5. User Manual. Braunschweig: GOM mbH.

GOM. 2011a. GOM ATOS TripleScan. User Manual – Hardware. Braunschweig: GOM mbH.

GOM. 2011b. GOM TRITOP. User Manual – Hardware. Braunschweig: GOM mbH.

GOM. 2012. GOM ATOS CompactScan 5M, 2M. User Manual – Hardware. Braunschweig: GOM mbH.

INNOVMETRIC SOFTWARE, Inc. 2025. *PolyWorks|Modeler: reverse-engineering solution extracting curves, surfaces, sketches and features from polygonal models.* PolyWorks Europe. [online] [cit. 2025-06-19]. Dostupné na internete: <https://www.polyworkseuropa.com/en/products/polyworks-modeler>.

KALOVÁ, I. a HORÁK, K. 2005. Optické metody měření 3D objektů. In *Elektrorevue* [online]. 2005/23. ISSN 1213-1539. [online] [cit. 2013-08-07]. Dostupné na internete: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.htm>.

KALOVÁ, I. and LISZTWAN, M. 2006. Industrial Application of Triangulation Technique. In *FAC Workshop on Programmable Devices and Embedded Systems*. Brno, Czech Republic, 14 February 2006. pp. 258-263. VUT Brno. ISBN 80-214-3130-X.

KANG, J., KIM, D., LEE, C., KANG, J. and KIM, D. 2023. Efficiency Study of Combined UAS Photogrammetry and Terrestrial LiDAR in 3D Modeling for Maintenance and Management of Fill Dams. *Remote Sensing*. vol. 15, issue 8. ISSN 2072-4292. [online] [cit. 2013-08-07]. <https://doi.org/10.3390/rs15082026>.

KOCH, M. and KAEHLER, M. 2009. Combining 3D Laser-Scanning and Close-Range Photogrammetry – An Approach to Exploit the Strength of Both Methods. In *Proceedings / 37th International Conference Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA)*. Williamsburg, Virginia, USA, 22-26 March 2009. Oxford (USA): Archaeopress. ISBN 9781407305561.

KOVAČOVSKÝ, T. 2012. *SMISS – Scalable Multifunctional Indoor Scanning System* [Diplomová práce]. Bratislava: Univerzita Komenského v Bratislave; Fakulta matematiky, fyziky a informatiky; Katedra algebry, geometrie a didaktiky matematiky. Vedúci práce: Mgr. Ján Žižka.

KRAUS, K., JANSÁ, J. and KAGER, H. 1997. *Photogrammetry. Advanced Methods and Applications. Volume 2*. Bonn: Ferd. Dümmlers Verlag. ISBN 3-427-78694-3.

KRAUS, K. and WALDHÄUSL, P. 1993. *Photogrammetry. Fundamentals and Standard Processes. Volume 1*. Bonn: Ferd. Dümmlers Verlag. ISBN 3-427-78684-6.

LASER DESIGN, Inc. 2025. *4 Easy Steps to NURBS Surface Modeling in Geomagic Design X*. Laser Design. [online] [cit. 2025-06-19]. Dostupné na internete: <https://www.laserdesign.com/4-easy-steps-to-nurbs-surface-modeling-in-geomagic-design-x/>.

LECKÝ, Š. 2016. *Tvorba CAD plôch na základe polygónového modelu* [Diplomová práce]. Trnava: Slovenská technická univerzita v Bratislave; Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave; Ústav výrobných technológií. 103 s. Vedúci diplomovej práce: doc. Ing. Ladislav MOROVIČ, PhD.

LI, Y., YU, A. W., MENG, T., CAINE, B., NGIAM, J., PENG, D., SHEN, J., WU, B., LU, Y., ZHOU, D., LE, Q. V., YUILLE, A. and TAN, M. 2022. DeepFusion: Lidar-Camera Deep Fusion for Multi-Modal 3D Object Detection. *arXiv preprint* [online] [cit. 2025-05-11]. Dostupné na internete: <https://arxiv.org/abs/2203.08195>.

LI, P., GUO, J., ZHANG, X. and YAN, D. M. 2023. SECAD-Net: Self-Supervised CA D Reconstruction by Learning Sketch-Extrude Operations. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. pp. 16816–16826. [online] [cit. 2025-05-11]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1109/CVPR52729.2023.01613>.

LIU, Y., OBUKHOV, A., WEGNER, J. D. and SCHINDLER, K. 2024. Point2CAD: Reverse Engineering CAD Models from 3D Point Clouds. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2024)*. pp. 3763–3772. [online] [cit. 2025-05-11]. Dostupné na internete: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10657440>.

LOU, L., LI, Y., ZHANG, Q. and WEI, H. 2023. SLAM and 3D Semantic Reconstruction Based on the Fusion of Lidar and Monocular Vision. In *Sensors* [online]. vol. 23, issue 3, article number 1502. ISSN 1424-8220.

LUHMANN, T. and MÜLLER, Ch. 2010. *Photogrammetrie. Laserscanning. Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage*. Berlin: Verlag Wichmann, 2010. ISBN 978-3-87907-494-5.

LUHMANN, T., ROBSON, S., KYLE, S. and HARLEY, I. 2006. *Close Range Photogrammetry. Principles, Methods and Applications*. Dunbeath, Caithness: Whittles Publishing. ISBN 1-870325-50-8.

MADA, S. K., SMITH, M. L., SMITH, L. N. and MIDHA, S. 2003. Overview of Passive and Active Vision Techniques for Hand-Held 3D Data Acquisition. In *Proceedings / SPIE 4877: Opto-Ireland 2002: Optical Metrology, Imaging, and Machine Vision*. pp. 16-27. ISBN 97-808-194-465-89. [online] [cit. 2013-08-05] Dostupné na internete: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/4877/0000/Overview-of-passive-and-active-vision-techniques-for-hand-held/10.1117/12.463773.short>.

MAI, N. A. M., DUTHON, P., KHOUDOUR, L., CROUZIL, A. and VELASTIN, S. A. 2021. Sparse LiDAR and Stereo Fusion (SLS-Fusion) for Depth Estimation and 3D Object Detection. In: *International Conference of Pattern Recognition Systems (ICPRS 2021)*. Online conference, 17–19 March 2021. pp. 150–156. ISBN 978-183-953-430-0. [online] [cit. 2013-08-05] Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1049/icp.2021.1442>.

MARČIŠ, M. 2019. *Automatizované fotogrametrické metódy v procese digitalizácie kultúrneho dedičstva*. 1. vyd. Bratislava: Spektrum STU, 113 s., ISBN 978-80-227-4895-7. [online] [cit. 2013-08-05] Dostupné na internete: https://www.svf.stuba.sk/buxus/docs/dokumenty/skripta/Marcisautomatizovane_fotogrametrické_metódy_v_procese_digitalizácie_kultúrneho_dedícstva_konecna.pdf.

MASKELIŪNAS, R., MAQSOOD, S., VAŠKEVIČIUS, M. and GELŠVARTAS, J. 2025. Fusing LiDAR and Photogrammetry for Accurate 3D Data: A Hybrid Approach. *Remote Sensing*. vol. 17, issue 3, article number 443. ISSN 2072-4292. [online] [cit. 2013-08-05] Dostupné na internete: <https://doi.org/10.3390/rs17030443>.

MOROVIČ, L. 2003. *Od predstavy k prototypu (Rapid Prototyping a Rapid Tooling technológie)* [Diplomová práca]. Trnava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta v Trnave, Katedra obrábania a montáže. 80 s. Vedúci diplomovej práce: prof. Ing. Ján BÉKĚS, DrSc.

MOROVIČ, L. 2007. *Návrh metodiky bezdotykového 3D skenovania tvarovo zložitých plôch* [Dizertačná práca]. Trnava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta v Trnave, Ústav výrobných technológií. 159 s. (spolu s prílohami 209 s.) Školiteľ: prof. Dr. Ing. Jozef PETERKA.

MOROVIČ, L. 2013. *Návrh, obrábanie, meranie a skenovanie tvarovo zložitých plôch* [Habilitačná práca]. Trnava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta v Trnave, Ústav výrobných technológií. 133 s. (s prílohami 172 s.).

MOROVIČ, L. 2016. *Non-contact measurement of free-form surfaces*. 1. vyd. Plzeň: Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk, s.r.o. 89 s. ISBN 978-80-7380-628-6.

MOROVIČ, L. a KURUC, M. 2024. *Úvod do počítačovej podpory výrobných technológií*. 1. vyd. Trnava: Materiálovotechnologická fakulta STU, Vydavateľstvo AlumniPress. 271 s. ISBN 978-80-8096-304-0.

NIKON D300s Digital Camera. 2011. Code No. 6CE90051 (1104/D)K. Chiyoda-ku, Tokyo, Japan: NIKON CORPORATION. [cit. 2013-08-31]. Dostupné na internete: http://imaging.nikon.com/lineup/dslr/d300s/pdf/d300s_16p.pdf.

OČENÁŠ, M. 2015. *Audiovizuálna podpora pre tvorbu CAD modelov z polygómovej siete* [Diplomová práca]. Trnava: Slovenská technická univerzita v Bratislave; Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave; Ústav výrobných technológií. 96 s. Vedúci diplomovej práce: doc. Ing. Ladislav MOROVIČ, PhD.

PAGE, D., KOSCHAN, A. and ABIDI, M. 2008. Methodologies and Techniques for Reverse Engineering – The Potential for Automation with 3-D Laser Scanners. In: RAJA, V., FERNANDES, K. J., ed. *Reverse Engineering – An Industrial Perspective*. pp. 11-32. London: Springer, ISBN 978-1-84628-855-5. [online] [cit. 2013-08-05] Dostupné na internete: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-84628-856-2_2.

PHAM, D. T. and HIEU, L. C. 2008. Reverse Engineering–Hardware and Software, In *Reverse Engineering*. London: Springer London, pp. 33–70. doi: 10.1007/978-1-84628-856-2_3. [online] [cit. 2025-6-20] Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/publication/226348635_Reverse_Engineering-Hardware_and_Software.

PRASAD, A. D., BALU, A., SHAH, H., SARKAR, S., HEGDE, C. and KRISHNAMURT-HY, A. 2022. NURBS-Diff: A Differentiable Programming Module for NURBS. *Computer-Aided Design*. vol. 146, 103199. ISSN 0-010-4485. DOI: 10.1016/j.cad.2022.103199. [online] [cit. 2025-6-20] Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448522000045>.

SALVI, J., PAGÈS, J. and BATLLE, J. 2004. Pattern codification strategies in structured light systems. *Pattern Recognition*. vol. 37, issue 4, pp. 827-849. ISSN 0031-3203.

ŠTURDÍK, P. 2023. *Príbehy áut: Tomášova Škoda 1000 MB De Luxe. Krajšiu starú Škodovku neuvidíte. Nikde.* Publikované na portáli *VOLANT.TV* dňa 2025-06-19. [online] [cit. 2025-05-03]. Dostupné na internete: https://www.volant.tv/wp-content/uploads/2022/08/image_2022-08-16_114935230.png.

TSAL, R. 1987. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. In *Journal of IEEE - Robotics and Automation*. vol. 3, issue 4, pp. 323-344. ISSN 0882-4967.

URBAN, G. 2025. *Reverse Engineering of Free-Form Surfaces (Reverzné inžinierstvo voľných tvarových plôch)* [Diplomová práca]. Trnava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta v Trnave, Ústav výrobných technológií. 82 s. Vedúci diplomovej práce: doc. Ing. Ladislav MOROVIČ, PhD.

VÁRADY, T., MARTIN, R. R. and COX, J. 1997. Reverse Engineering of Geometric Models – An Introduction. *Computer-Aided Design*. V. 29, Issue 8, 2017. ISSN 0-010-4485. [online] [cit. 2025-05-03]. Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448596000541>.

ZANUTTIGH, P., MARIN, G., DAL MUTTO, C., DOMINIO, F., MINTO, L. and CORTELAZZO, G. M. 2016. *Time-of-Flight and Structured Light Depth Cameras. Technology and Applications*. Cham: Springer. ISBN 978-3-319-30971-2. [online] [cit. 2025-05-03]. Dostupné na internete: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-30973-6>.

ZEISS. 2025. *Industrial 3D scanning technology*. [cit. 2025-07-02]. Dostupné na internete: <https://www.zeiss.com/metrology/en/systems/optical-3d/3d-scanning/atos.html>.

ZHANG, G. 2012. Non-Cartesian Coordinate Measuring Systems. In: HOCKEN, R. J., PEREIRA, P. H., ed. *Coordinate Measuring Machines and Systems*. 2nd edition. pp. 467-513. Boca Raton: Taylor and Francis Group, LLC. ISBN 978-1-57444-652-4. [online] [cit. 2025-05-03] <https://www.taylorfrancis.com/chapters/mono/10.1201/b11022-20/non-cartesian-coordinate-measuring-systems-robert-hocken-paulo-pereira>.

ZHOU, K. 2020. *Combining LiDAR and Photogrammetry to Generate Up-to-date 3D City Models* [Dizertačná práca]. Delft: Delft University of Technology. 133 s. Školiteľ: Prof. Dr. Ir. R.F. HANSSEN, Dr. R.C. LINDENBERGH. ISBN 978-94-6366-278-9. [online] [cit. 2025-05-03]. <https://doi.org/10.4233/uuid:89466e36-b579-4943-b3da-b251dd52209f>.

Podakovanie

Tento príspevok vznikol v rámci projektu: *Implementácia inovatívnych foriem učenia a praktického tréningu do vzdelávania v oblasti výrobných technológií a výrobného manažmentu s cieľom zvýšiť atraktivnosť štúdia a podporiť rozvoj prierezových kompetencií absolventov* (026STU-4/2023), s podporou agentúry KEGA MŠVVaŠ SR.

**9 APLIKÁCIA REVERZNÉHO GEOMETRICKÉHO
MODELOVANIA PRI REKONŠTRUKCII SÚČIASTOK
VYROBENÝCH ADITÍVNOU TECHNOLOGIOU SLA A FDM**

BURANSKÝ, I. – DUBNIČKA, M.

Úvod

V kontexte súčasného strojárstva a priemyslu 4.0 predstavuje reverzné inžinierstvo (RI) kľúčovú metodológiu, ktorá premostňuje priepasť medzi fyzickým a digitálnym svetom. Jeho primárnym cieľom je systematická analýza existujúceho výrobku alebo súčiastky s cieľom získania a rekonštrukcie pôvodnej technickej dokumentácie. Táto metóda nachádza uplatnenie v širokom spektre aplikácií, od obnovy historických súčiastok bez dostupnej dokumentácie cez optimalizáciu dizajnu a kontrolu kvality až po vývoj nových produktov inšpirovaných existujúcimi fyzickými modelmi.

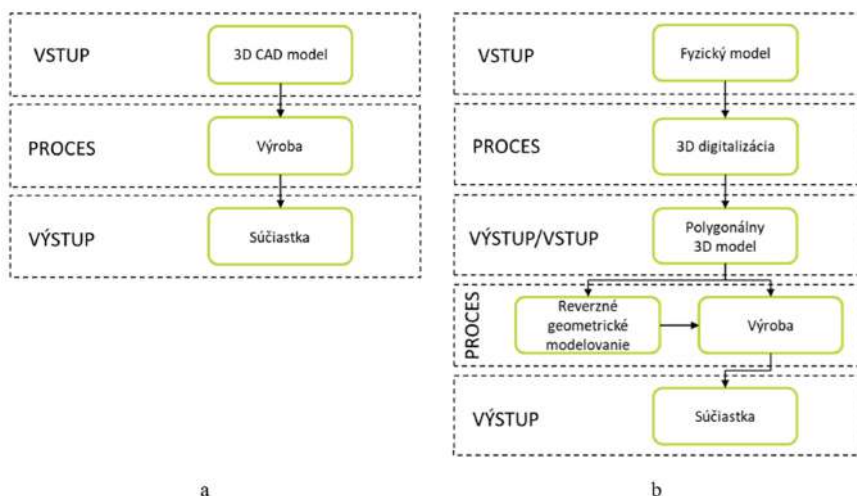
Táto štúdia sa zameriava na kritickú fázu reverzného inžinierstva, a to na reverzné geometrické modelovanie. S nárastom významu aditívnej výroby, ktorá umožňuje flexibilnú a komplexnú výrobu, rastie aj potreba efektívnej rekonštrukcie digitálnych modelov získaným 3D digitalizáciou. Hlavným vstupom do tohto procesu je mrak bodov alebo polygonálny model. Cieľom predloženej štúdie je komparatívna analýza a hodnotenie procesu rekonštrukcie súčiastok s ohľadom na rôzne technológie aditívnej výroby. Konkrétne sa štúdia zameriava na porovnanie výsledkov získaných zo súčiastok vyrobených technológiou Stereolithography (SLA) a Fused Deposition Modeling/Fused Filament Fabrication (FDM/FFF). Systematická metodika práce zahŕňa tri hlavné etapy:

- **3D digitalizácia** – súčiastky sú digitalizované s cieľom získať presné geometrické dáta vo forme mraku bodov alebo polygonálneho modelu.
- **Úprava polygonálneho modelu** – získané dáta sú upravené, spracované a pripravené na rekonštrukciu.
- **3D modelovanie** – na základe polygonálnej siete sú vytvárané plochy technikami 3D modelovania a vznikne finálny parametrický 3D CAD model (plošný alebo objemový), ktorý slúži ako základ pre ďalšie inžinierske aplikácie.

Výsledky tejto štúdie poskytujú detailný pohľad na metodologické výzvy a špecifické odchýlky, ktoré vznikajú v procese 3D digitalizácie a 3D modelovania – rekonštrukcie a prispievajú k hlbšiemu pochopeniu vplyvu zvolenej aditívnej technológie na presnosť a kvalitu rekonštruovaných digitálnych modelov.

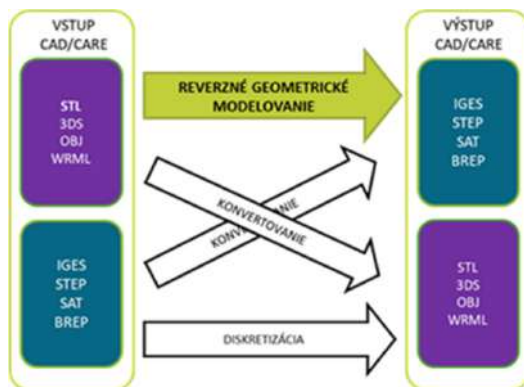
9.1 Reverzné inžinierstvo

Inžinierska činnosť je proces navrhovania, výroby, montáže a údržby výrobkov a systémov. Známe sú dva typy inžinierskej činnosti, a to: **dopredné inžinierstvo** (Forward Engineering) a **spätné inžinierstvo** (Reverse Engineering), (Raja a Fernandes, 2008; Bhatti, Syed a John, 2018). Výroba súčiastok sa rozdeľuje na klasický spôsob výroby a výrobu súčiastok použitím reverzného inžinierstva (Obr. 9.1). Pri klasickom spôsobe výroby súčiastok je vstupným formátom 3D CAD model vytvorený v CAD softvéri, ktorý je následne použitý pri výrobe. Pri výrobe súčiastok pomocou reverzného inžinierstva je rekonštrukcia polygonálneho 3D modelu kľúčovým krokom. Preto sa do procesu výroby súčiastok začlenil aj proces, ktorý zahŕňa spätné vytvorenie plošného alebo objemového 3D modelu z polygonálneho 3D modelu alebo polygonálnej siete. Tento proces sa nazýva **reverzné geometrické modelovanie**.



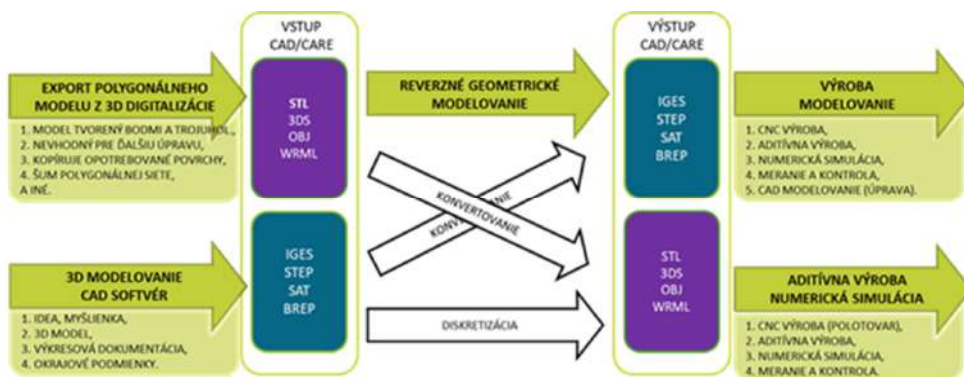
Obr. 9.1. Proces výroby súčiastok
 a – klasický spôsob výroby súčiastky (forward engineering),
 b – výroba súčiastky použitím reverzného inžinierstva (reverse engineering)

Reverzné inžinierstvo v kontexte geometrického reverzného modelovania predstavuje systematický proces transformácie dát získaných 3D digitalizáciou existujúcich fyzických objektov (súčiastok, produktov) do podoby geometrických 3D CAD modelov. Primárnym vstupom pre tento proces je typický mrak bodov získaný 3D digitalizáciou. Podľa Fhama a Hieua (2008) možno proces reverzného inžinierstva rozdeliť na dve kľúčové fázy. Prvá, hardvérová časť, zahŕňa metódy získavania dát z fyzických modelov, pričom sa využívajú kontaktné, bezkontaktné (napr. optické 3D skenovanie, priemyselná počítačová tomografia a iné.) metódy v špecifických prípadoch aj deštruktívne metódy. Výsledkom tejto fázy sú buď 2D obrázky alebo mrak bodov. Druhá, softvérová časť, nadväzuje na získané dáta a sústreďuje sa na ich transformáciu do finálneho geometrického 3D CAD modelu. Výstupom môže byť polygonálny 3D model (napr. STL), plošný model (napr. NURBS plochy) alebo objemový model (parametrický CAD model). Hlavným cieľom priemyselného reverzného inžinierstva je rekonštruovať digitálny model, či už kombináciou geometrických primitív z polygonálnej siete, alebo priamo z mraku bodov (Gauthier a kol, 2017; Bénéiere a kol., 2013). Obzvlášť dôležitou aplikáciou reverzného inžinierstva v strojárstve je vytvorenie presného digitálneho modelu strojných súčiastok z nadobudnutého mraku bodov alebo z polygonálneho 3D modelu, ako uvádzajú Kovács, Várady a Salvi (2015). Autor Bénéiere a kol. (2013) uvádza potrebu rekonštrukcie polygonálneho modelu, ktorý je vo formáte STL alebo OBJ z dôvodu, že v skutočnosti v 90 % prípadov je požiadavka na formát IGES alebo STEP (Obr. 9.2).



Obr. 9.2. Schéma konverzie 3D modelov (Bénière a kol., 2013)

Ak schéma na Obr. 9.2 sa rozšíri o vstupy a výstupy výsledkom je rozšírená schéma konverzie 3D modelov (Obr. 9.3), ktorá obsahuje informácie, aké rôzne typy vstupov môžu byť použité pri konvertovaní a diskretizácii 3D modelov v CAD (Computer Aided Design) alebo CARE (Computer Aided Reverse Engineering) softvéri. Taktiež zobrazuje výstupy a ich použitie pri výrobe, numerických simuláciách meraní, kontrole a v neposlednom rade aj pri aditívnej výrobe.



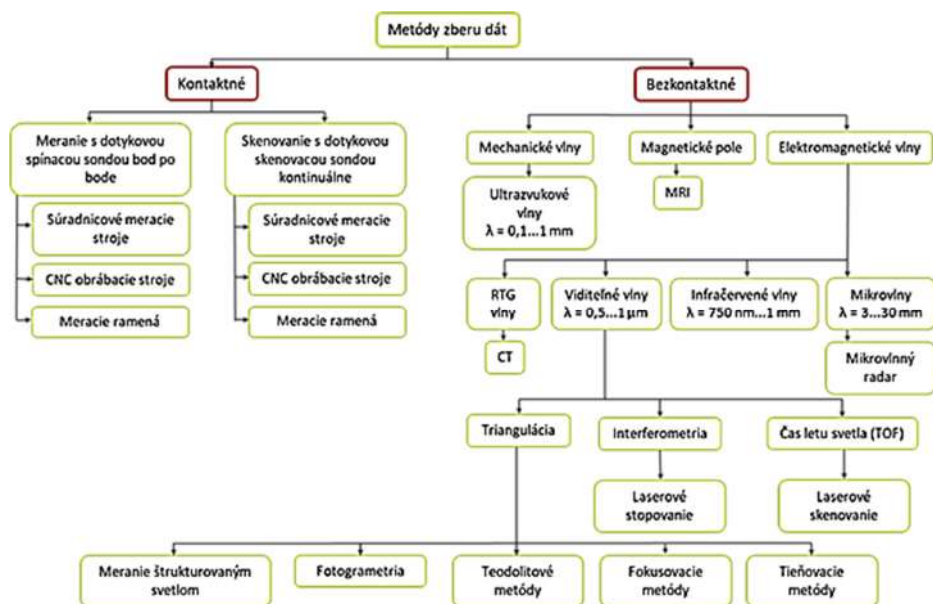
Obr. 9.3. Rozšírená schéma konverzie 3D modelov (Bénière a kol., 2013)

Norma VDI 5620 (2017) uvádza štandardy pre proces reverzného inžinierstva a norma pre optické 3D meracie systémy je VDI/VDE 2634 Part1, Part2 a Part3. Norma VDI 3405 (2014) je zameraná na procesy aditívnej výroby a rýchlej výroby. Ďalej norma uvádza, že rozlíšenie polygonálneho 3D modelu (veľkosť a počet trojuholníkov/polygonov) určuje, ako presne sa reprodukuje skutočná geometria povrchu súčiastky.

9.2 Získavanie údajov reálnych súčiastok

V rámci reverzného inžinierstva a tvorby 3D CAD modelov z existujúcich fyzických súčiastok je kritickým prvým krokom presného a komplexného zberu dát o ich geometrii. Metódy zberu dát ovplyvňujú presnosť, detailnosť ale určite aj zložitosť a náročnosť celého

procesu reverzného inžinierstva. Voľba vhodného typu 3D digitalizácie komponentov z veľkej časti ovplyvňuje aj aplikácia spôsobu rekonštrukcie polygonálneho 3D modelu, ktorú na danom komponente sa bude vykonávať. Tento zber dát sa tiež nazýva 3D digitalizácia. Na dosiahnutie vysokokvalitných výstupov je nevyhnutné siahnuť po pokročilých bezkontaktných metódach, ktoré dokážu zachytiť aj komplexné vnútorné a vonkajšie tvary reálnych objektov. Na efektívny a detailný zber údajov fyzických modelov sa najčastejšie používa priemyselná počítačová tomografia (CT) a merania štruktúrovaným svetlom (optické 3D skenovanie). Na Obr. 9.4 sú znázornené všetky dostupné metódy zberu dát.



Obr. 9.4. Rozdelenie kontaktných a bezkontaktných metód zberu dát (Morovič, 2013)

Priemyselná počítačová tomografia je mimoriadne cenná na získavanie informácií o tvare a rozmeroch súčiastky, vnútorných štruktúrach a skrytých defektoch, ktoré sú inými metódami nedostupné. Umožňuje nedeštruktívne analyzovať vnútornú geometriu, identifikovať vnútorné dutiny, zložité kanáliky alebo kompozitné materiály. Výstupom je mrak bodov alebo objemové dáta, ktoré možno priamo použiť na tvorbu polygonálnych modelov a následnú rekonštrukciu CAD modelu.

Meranie štruktúrovaným svetlom je ideálna metóda na rýchly a presný zber rozsiahlych povrchových dát. Je vhodná pre objekty s komplexnými tvarmi aj pre tie s ostrými hranami a detailami. Výsledkom je hustý mrak bodov povrchu objektu, z ktorého sa potom generuje polygonálny 3D model. Prehľad výhod a nevýhod kontaktných a bezkontaktných metód zberu dát je uvedený v Tabuľke 9.1.

Tabuľka 9.1. Výhody a nevýhody kontaktných a bezkontaktných metód zberu dát (Morovič, 2013)

	Kontaktné metódy zberu dát	Bezkontaktné metódy zberu dát
Výhody	▪ Vysoká presnosť. ▪ Nízka spúšťacia sila dotykového senzora. ▪ Pri analógových dotkových sondách vysoká hustota získaných dát. ▪ Možnosť skenovať reflexné plochy. ▪ Skenovanie kolmých plôch. ▪ Nie je potrebné sprejovať priesvitné a reflexné plochy objektu. ▪ Možnosť nastavenia dynamiky snímania.	▪ Rýchly zber dát. ▪ Vysoká hustota získaných dát. ▪ Absencia fyzického kontaktu medzi zariadením a objektom. ▪ 3D digitalizácia objektov z mäkkých materiálov. ▪ Možnosť skenovať tvarovozložené objekty. ▪ Mobilita 3D skenerov.
Nevýhody	▪ Pomalá rýchlosť získavania dát. ▪ Opatrenie snímača dotykovej sondy. ▪ Možnosť frakcie drieku snímača. ▪ Nemožno skenovať neprípustné miesta objektu a vnútornú geometriu.	▪ Nevhodné na 3D digitalizáciu priesvitných a reflexných plôch. ▪ Potreba povrchovej úpravy priesvitných a reflexných plôch. ▪ Nemožnosť skenovať neprípustné miesta objektu a vnútornú geometriu. ▪ Potreba lepenia reflexných nekódovaných (kódovaných) bodov.

Pri získavaní údajov reálnych súčiastok je potrebné poznať vstupy, procesy a výstupy. Reverzné inžinierstvo je systém spätného procesu projektovej činnosti. Reverzné inžinierstvo a reverzné geometrické modelovanie má taktiež svoje vstupy, procesy a výstupy. Dôležité sú aplikácie výstupov z reverzného inžinierstva. Obr. 9.4 znázorňuje procesy získavania údajov fyzických modelov v strojárstve pre reverzné inžinierstvo. Vstupom do procesu získavania údajov z fyzických modelov je fyzický model tzv. reálna súčiastka, ktorá je buď priestorová alebo plošná. Procesy, ktoré prebiehajú pri získavaní údajov fyzických modelov sa rozdeľujú na jednoduché a komplexné procesy.

Jednoduchý proces reverzného geometrického modelovania sa spolieha na tradičné ručné meranie súčiastok. Používajú sa jednoduché dĺžkové a uhlové meradlá, ako sú posuvné meradlá, mikrometre, hĺbkomery a uhlomery. Výstupom sú prevažne dĺžkové a uhlové rozmery súčiastky.

Komplexný proces reverzného geometrického modelovania (3D Digitalizácia) je oveľa obsiahlejší a zahŕňa prípravu súčiastky, kalibráciu meracích zariadení, spracovanie mraku bodov a úpravu polygonálneho 3D modelu. Potom sa tvoria 2D/3D elementy a prebieha 2D/3D meranie. Na získanie dát z fyzických modelov sa využívajú moderné kontaktné a bezkontaktné meracie zariadenia. Výstupom komplexného procesu sú nielen dĺžkové a uhlové rozmery, ale aj mrak bodov, polygonálny 3D model a 2D/3D elementy.

9.3 Reverzné geometrické modelovanie

Pre reverzné geometrické modelovanie existuje niekoľko definícií. Geometrické reverzné inžinierstvo možno opísať ako proces prichytenia plôch na mrak bodov a ich spájanie s topologicky definovaným CAD modelom. (Kjellander a Rahayem, 2009)

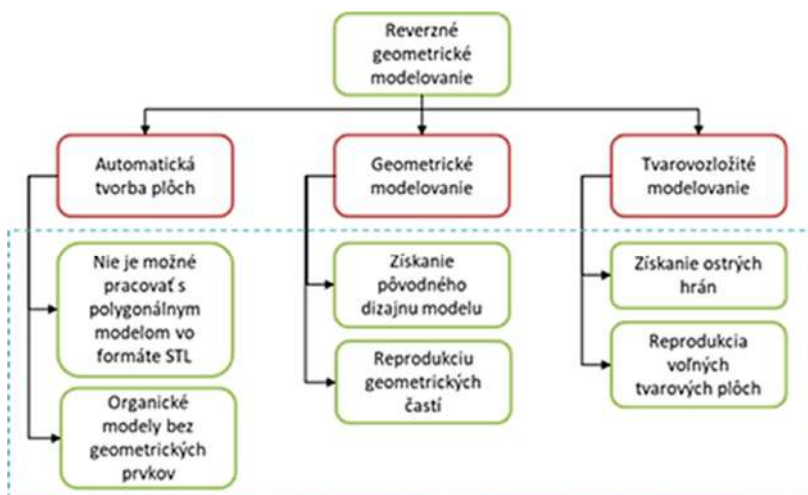
Proces reverzného geometrického modelovania pozostáva z mnohých krokov, ktoré možno kombinovať do troch hlavných etáp: *3D digitalizácia*, *rekonštrukcia tvaru* a *3D modelovanie*. Extrakcia geometrie z existujúceho produktu na rekonštrukciu 3D CAD modelu je najpoužívanejším prístupom pre geometrické reverzné inžinierstvo. (Anwer

a Mathieu, 2016) Na Obr. 9.5 sú znázornené tri hlavné etapy procesu reverzného geometrického modelovania, medzi ktorými prebieha iterácia.



Obr. 9.5. Tri hlavné etapy reverzného geometrického modelovania podľa (Anwer a Mathieu, 2016)

Pri spätnej tvorbe 3D modelu existujú tri prístupy reverzného geometrického modelovania. Patrí sem: *automatická tvorba plôch*, *geometrické modelovanie* a *tvarovozložené modelovanie*. (TertaVision, 2020). Obr. 9.6 znázorňuje prístupy reverzného geometrického modelovania a ich výhody.



Obr. 9.6. Prístupy reverzného modelovania

Medzi hlavné vlastnosti **automatickej tvorby plôch** sú presnosť, rýchlosť, strata ostrých hrán, model je tvorený množstvom malých plôch a možné chyby pri preklade údajov. Vytvorený model sa skladá z veľmi malých NURBS plôch. Tieto plochy kopírujú pôvodnú polygonálnu sieť. Preto vytvorený 3D CAD model je veľmi blízko pôvodnej polygonálnej sieti. 3D CAD model je generovaný veľmi rýchlo. Nie sú k dispozícii možnosti zmeny nastavení s cieľom zlepšiť výsledný 3D CAD model. Pri tomto spôsobe dochádza k strate malých detailov a ostrých hrán. (TertaVision, 2020)

Hlavné vlastnosti **geometrického modelovania** sú veľmi čistý model, rovné plochy a perfektné zaoblenia, jednoduchá úprava v iných CAD softvéroch. Pretože pri geometrickom modelovaní sa používajú iba geometrické tvary 3D CAD model, a teda je veľmi čistý a bude mať malú veľkosť súboru. Výsledný 3D CAD model je kompatibilný s inými CAD softvérmi. Pre tento typ modelu možno ľahko meniť geometriu. Ak sa používajú

iba dokonalé geometrické tvary, môže dôjsť k väčšej odchýlke od pôvodnej polygonálnej siete. (TertaVision, 2020)

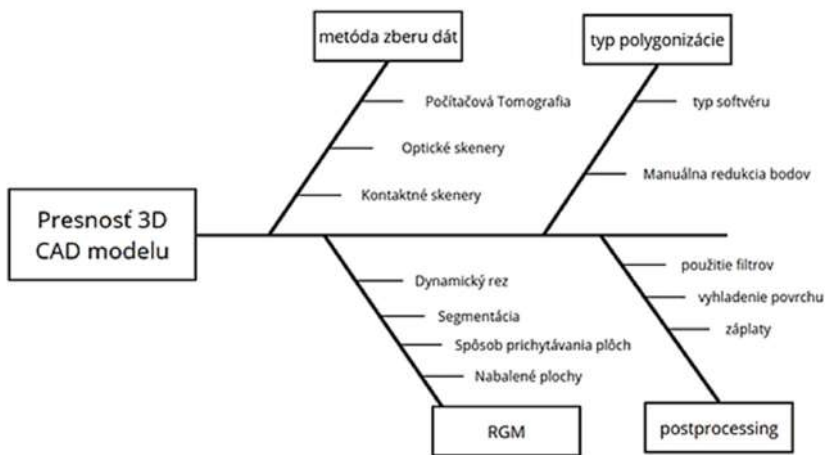
Pri **tvarovozložitom modelovaní** sa získava čistý model, NURBS plochy, sú potrebné relatívne jednoduché úpravy v iných CAD softvéroch. Pri tomto spôsobe reverzného modelovania sa zachytí zložitý tvar voľne tvarovaného objektu. V závislosti od zložitosti plôch je aj výsledná veľkosť súboru. Dostať sa k presnému výsledku je časovo náročné, niekedy je to pokus a omyl. (TertaVision, 2020)

Postup reverzného geometrického modelovania sa rozdeľuje na kroky, ktoré vedú k vytvoreniu 3D CAD modelu v CAD softvéri s modulom pre reverzné inžinierstvo. Úlohou je vytvorenie plošného alebo objemového 3D modelu z polygonálneho 3D modelu. Následný postup sa zameriava na sériu kľúčových fáz v procese reverzného geometrického modelovania:

- 1. Vstupný polygonálny 3D model:** Príprava a overenie počiatočných dát.
- 2. Vyrovnanie polygonálneho 3D modelu:** Optimalizácia orientácie a polohy modelu na ďalšie spracovanie.
- 3. Úprava polygonálneho 3D modelu:** Čistenie, redukcia a vyhladenie dát na zabezpečenie kvality.
- 4. Aplikácia funkcií reverzného geometrického modelovania:** Využitie špecifických nástrojov na rekonštrukciu plôch a elementov.
- 5. Techniky 3D modelovania:** Doplnenie a úprava modelu pomocou štandardných modelovacích postupov.
- 6. Kontrola kvality plôch a výsledného 3D modelu:** Overenie presnosti a splnenie požiadaviek na finálny model.
- 7. Výstupný plošný alebo objemový 3D model:** Export hotového modelu do požadovaného formátu CAD softvéru.
- 8. Výkresová dokumentácia:** Technická dokumentácia, obsahujúca dôležité rozmery.

Tento metodický prístup umožňuje systematické spracovanie polygonálnych dát s cieľom vytvoriť presný a funkčný 3D CAD model pre rôzne aplikácie.

Celkovú presnosť 3D CAD modelov, získavaných v procese reverzného inžinierstva ovplyvňuje veľa faktorov, kde každý z nich môže mať vplyv na výsledné geometrické parametre finálneho 3D modelu. Obr. 9.7 zobrazuje Ishikawa diagram, kde sú zobrazené hlavné oblasti, ktoré ovplyvňujú výsledný 3D CAD model vytvorený pomocou reverzného geometrického modelovania.



Obr. 9.7. Ishikawa diagram pre presnosť CAD modelu prostredníctvom reverzného geometrického modelovania

Presnosť 3D CAD modelu je dôležitý aspekt, ktorý ovplyvňuje celý výrobný proces. Na túto presnosť v procese reverzného inžinierstva vplyvajú viaceré faktory, ktoré je nutné zohľadniť na dosiahnutie optimálneho výsledku. Pri procese rekonštrukcie modelu vznikajú geometrické ako aj rozmerové chyby v každej fáze. Prvá fáza digitalizácie je spojená so zberom dát z fyzického modelu. Zvolenie metódy úzko súvisí s aplikáciou reverzného inžinierstva. Jedná sa o kontaktné metódy, ktoré sa radia medzi najpresnejšie metódy zberu dát, avšak ich limitácia spočíva v rýchlosti zberu dát a obmedzeným použitím pre tvarové plochy. Inou existujúcou skupinou sú bezkontaktné metódy, kde je možno sledovať nielen povrch súčiastok (optické metódy zberu dát), ale aj vnútornú štruktúru súčiastok (priemyselná počítačová tomografia). Fáza spracovania bodov nesie rovnako výrazný podiel na výslednej presnosti. Pri polygonizácii mraku bodov dochádza k redukcii bodov, ktorá ovplyvňuje celkovú štruktúru polygonálneho modelu. Programy na spracovanie mraku bodov (polygonálneho modelu) dokážu automaticky filtrovať nepotrebné body a redukovať tak veľkosť súboru, na ktorom sa vykonáva rekonštrukcia. Okrem redukcie bodov môže dochádzať aj k úprave polygonálneho modelu, t. j. realizuje sa vyhladenie povrchu alebo zaplätanie otvorov, pomocou algoritmov upravujúcich polygonálny 3D model, čím sa však zníži presnosť modelu určeného na reverzné geometrické modelovanie (rekonštrukciu).

9.4 Analýza polygonálneho modelu

Analýza polygonálnych 3D modelov je kľúčová na efektívne využitie funkcií reverzného geometrického modelovania v softvéroch CAD alebo CARE. Aby bolo možno správne rekonštruovať a analyzovať jednotlivé plochy, je potrebné polygonálny 3D model analyzovať.

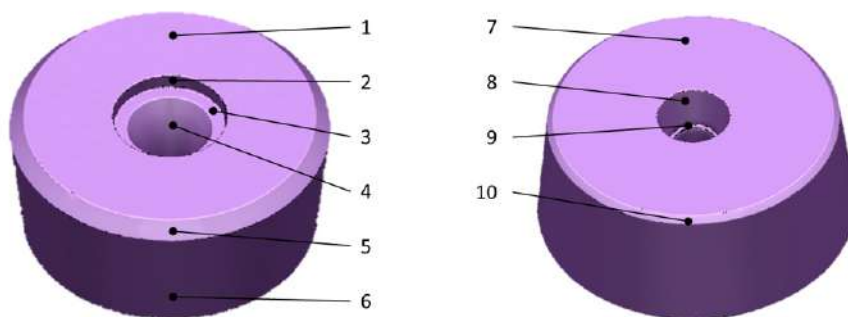
Polygonálny 3D model predstavuje v podstate výkresovú dokumentáciu. Využíva sa jeho topológia a geometria pre identifikovanie základných rozmerov, ktoré sa neskôr používajú ako vstupné údaje na vytvorenie prvotného 3D CAD modelu. Polygonálny model je tvorený rôznymi plochami, ktoré tvoria výslednú topológiu polygonálneho 3D modelu. Pri veľmi zložitých polygonálnych 3D modeloch možno takýto 3D model rozdeliť na jednoduchšie povrchy. Analýza by mala poskytnúť dostatočné informácie na vytvorenie počiatočného 3D

CAD modelu s menovitými rozmermi. 3D CAD model musí byť vytvorený tak, aby ho bolo možno použiť na opätovnú výrobu.

Existuje niekoľko prístupov na vytvorenie tohto počiatočného modelu z polygonálnej siete pomocou funkcií reverzného geometrického modelovania. Tieto funkcie možno kombinovať. Medzi základné funkcie patria:

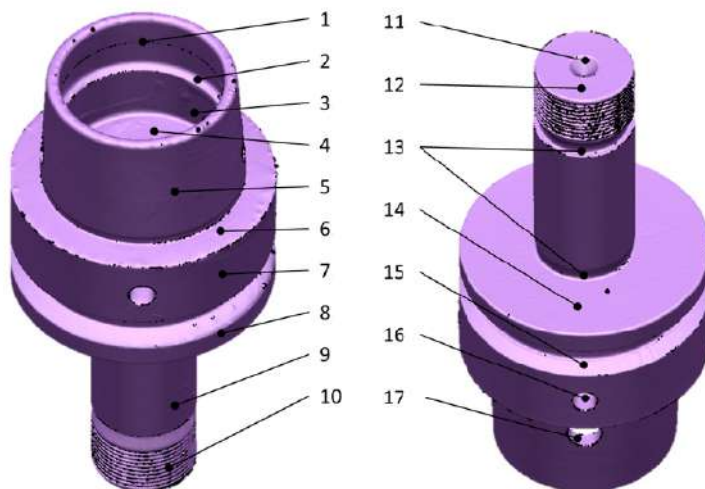
- Primitívne telesá, plochy alebo objekty.
- Základné primitíva a primitíva z bodov.
- Export elementov z CAQ softvéru.
- Rez (profil) a obrysová krivka.
- Prilepená krivka a prilepená plocha.
- Tvorba segmentov a segmentácia.
- Nabalená plocha.
- Konvertovanie polygonálnej siete na BREP.
- Quad surface.

Pri analýze polygonálneho 3D modelu je potrebné identifikovať plochy, ktoré vytvárajú a definujú tvar polygonálneho 3D modelu. Na Obr. 9.8 je zobrazený príklad identifikácie plôch na prievlaku, ktorý sa používa pri ťahaní bezšvových rúr. Prievlak je rotačná súčiastka, ktorá vznikne rotáciou profilu tvoreného z geometrických 2D entít okolo príslušnej osi (najčastejšie okolo osi Z).



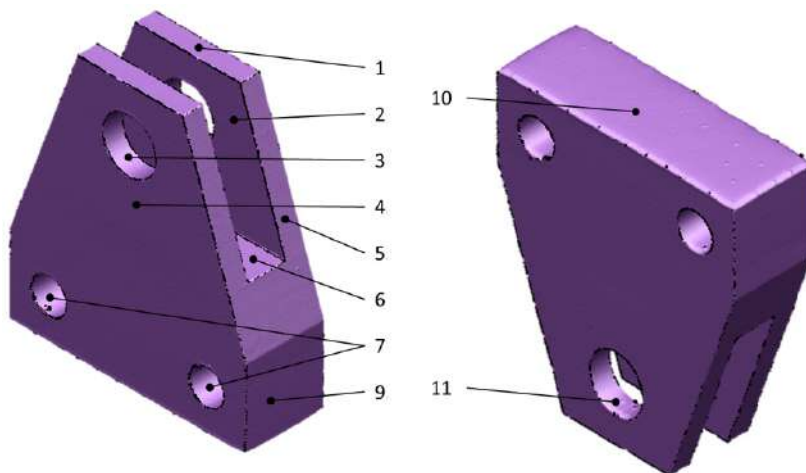
Obr. 9.8. Identifikácia plôch na polygonálnom 3D modeli prievlaku
 1 – rovinná plocha, 2 – valcová plocha, ktorá predstavuje zrazenie, 3 – rovinná plocha,
 4 – tvarovo zložitá plocha, ktorá predstavuje aktívnu časť prievlaku,
 5 – kužeľová plocha, ktorá predstavuje zrazenie, 6 – kužeľová plocha, 7 – rovinná plocha,
 8 – kužeľová plocha, 9 – rovinná plocha, 10 – kužeľová plocha, ktorá predstavuje zrazenie

Na Obr. 9.9 je zobrazený príklad držiaka brúsnych kotúčov tzv. tří na upínanie brúsnych kotúčov. Tak, ako v predchádzajúcom príklade, opäť sa jedná o rotačnú súčiastku. Preto pri analýze a ďalšej rekonštrukcii, súčiastka môže vzniknúť rotáciou profilu okolo príslušnej osi.

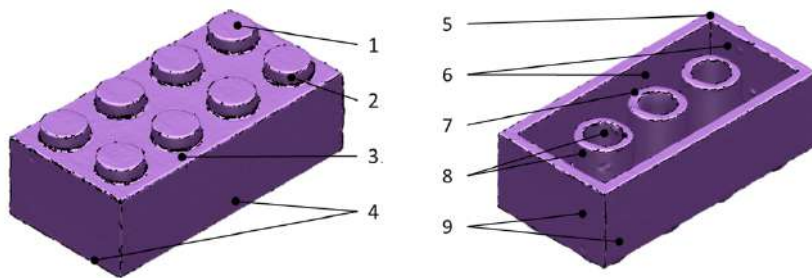


Obr. 9.9. Identifikácia plôch na polygonálnom 3D modeli trňa na upínanie brúsnych kotúčov
 1 – kužeľová plocha, 2 – rovinná plocha, 3 – valcová plocha, 4 – rovinná plocha, 5 – kužeľová plocha, 6 – rovinná plocha, 7, 8 a 9 – valcové plochy, 10 – valcová plocha, obsahujúca závit, 11 – kužeľová plocha, 12 – rovinná plocha, 13 – rotačná plocha so špeciálnym zápichom, 14 – rovinná plocha, 15 – kužeľová plocha, 16 a 17 – kužeľové plochy, ktoré predstavujú otvory

Pre skriňové súčiastky platia iné pravidlá vytvárania 3D modelu. Väčšinou sa začína tvorbou 2D geometrických entít, ktoré vytvárajú profil, ktorý je potom vytiahnutý do priestoru v smere príslušnej osi (najčastejšie v smere osi Z). Na Obr. 9.10 je znázornená skriňová súčiastka (závesná podpera). Pri identifikácii plôch si možno všimnúť, že väčšina plôch súčiastky je tvorená rovinnými plochami a niekoľkými otvormi. Na Obr. 9.11 je znázornená skriňová súčiastka (lego kocka).



Obr. 9.10. Identifikácia plôch na polygonálnom 3D modeli závesnej podpery
 3, 7 a 11 – otvor kruhového prierezu,
 1, 2, 4, 5, 6, 8, 9 a 10 – rovinné plochy, ktoré určujú topológiu súčiastky



Obr. 9.11. Identifikácia plôch na polygonálnom 3D modeli lego kocky
 2 – valcová plocha, ktorá sa na súčiastke nachádza 8-krát,
 1, 3, 4, 5, 6, 7 a 9 – rovinné plochy, 8 – kužeľová plocha

9.5 Analýza odchýlok v procese reverzného geometrického modelovania

Pri analýze odchýlok v procese reverzného geometrického modelovania sa vychádza zo zjednodušených modelov, ktoré pozostávajú z polygonálnej siete, menovitého rozmeru (nominálny rozmer) a skutočného rozmeru (aktuálny rozmer).

9.5.1 Porovnanie menovitého rozmeru so skutočnými rozmermi na polygonálnom modeli

Pri práci s polygonálnymi modelmi získanými reverzným inžinierstvom je nevyhnutné analyzovať, ako sa skutočne namerané rozmery líšia od pôvodne definovaných menovitých hodnôt. Polygonálny model, ktorý vzniká ako výstup procesu digitalizácie, zvyčajne obsahuje určité odchýlky spôsobené samotným meracím zariadením, ale aj ďalším spracovaním dát.

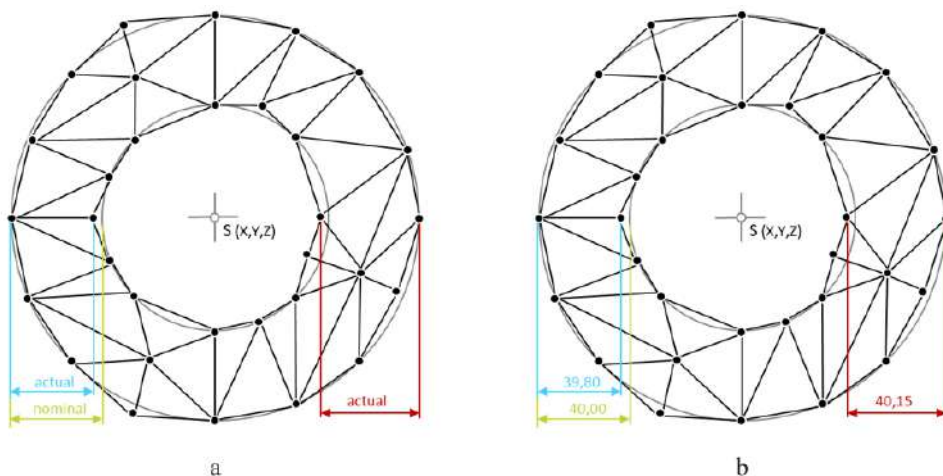
Obr. 9.12 znázorňuje rozdiel medzi menovitým (nominálnym) a skutočným (aktuálnym) rozmerom hrúbky steny v oblasti medzikružia na základe polygonálneho modelu získaného reverzným inžinierstvom. Na Obr. 9.12a,b je viditeľný priebeh triangulácie okolo vnútorného a vonkajšieho obrysu modelu s vyznačením meraných vzdialeností od spoločného referenčného bodu S (X,Y,Z). Na Obr. 9.12a sú farebne rozlíšené dva typy hodnôt, a to:

- Zelený rozmer (nominal): predstavuje požadovaný rozmer z návrhového modelu, tzv. menovitý rozmer.
- Červený a modrý rozmer (actual): znázorňuje skutočné rozmery získané na základe dát z polygonálnej siete.

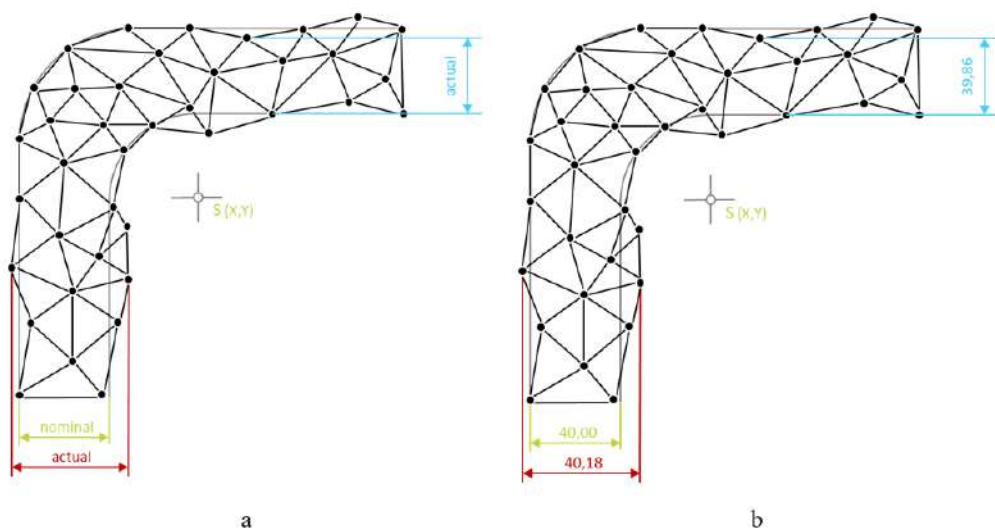
Obr. 9.12b zobrazuje konkrétne hodnoty, kde nominálna hodnota (40 mm) v porovnaní s aktuálnou hodnotou (39,80 mm a 40,15 mm) poukazuje na geometrickú odchýlku medzi nominálnym CAD modelom a polygonálnym modelom. Cieľom tohto porovnania je ilustrovať, ako sa líšia rozmery v závislosti od zvolenej metódy zberu dát, hustoty polygonálnej siete a samotnej presnosti digitalizácie. Tento typ analýzy je kľúčový pri hodnotení kvality reverzne získaných modelov.

Obr. 9.13 zobrazuje profil súčiastky, ktorej hrúbka steny je definovaná ako rovnaká v horizontálnom aj vertikálnom smere. Cieľom tohto príkladu je poukázať na to, že aj keď

má byť hrúbka konštrukčne rovnaká v oboch smeroch, pri výpočtoch na polygonálnom modeli môžu vznikať drobné odchýlky v dôsledku orientácie povrchu a spôsobu merania. Pri porovnaní nominálnej hodnoty (Obr. 9.13a) s aktuálnymi hodnotami (Obr. 9.13b) získanými z polygonálnej siete je dôležité vyhodnotiť, či hrúbka steny zostáva konzistentná bez ohľadu na smer výpočtu.



Obr. 9.12. Možné rozmery hrúbky steny pre medzikružie
a – identifikácia menovitej hodnoty (nominal) a možných variant hodnôt (actual)
b – požadovaná hodnota (nominal – zelená) a získané hodnoty (actual – červená, modrá)



Obr. 9.13. Možné rozmery hrúbky steny
a – identifikácia menovitej hodnoty (nominal) a možných variant hodnôt (actual)
b – požadovaná hodnota (nominal – zelená) a získané hodnoty (actual – červená, modrá)

Z jednotlivých príkladov je zrejmé, že vplyvom polygonizácie vznikajú odchýlky medzi nominálnymi rozmermi a aktuálnymi hodnotami, ktoré môžu byť významné najmä pri

presnejších aplikáciách. Tieto rozdiely nevznikajú len v dôsledku samotnej geometrie polygonálnej siete, ale aj v závislosti od spôsobu merania. Odchýlky nemusia nutne znamenať chybu v geometrii dielu, ale môžu byť dôsledkom spôsobu výpočtu, orientácie povrchu alebo zvolenej hustoty siete.

9.5.2 Porovnanie menovitého priemeru so skutočnými priemerom vzhľadom na spôsob prichytenia

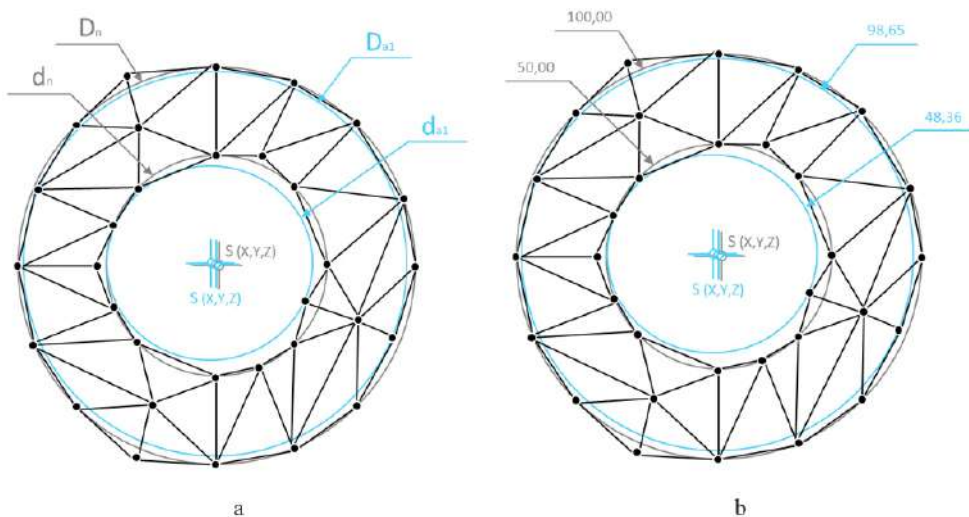
Pri hodnotení rozmerovej presnosti súčiastok vytvorených reverzným geometrickým modelovaním je dôležité brať do úvahy aj spôsob, akým sa definuje plocha na výpočet geometrických prvkov, ako je napr. priemer valcovej časti. Jedným z kľúčových faktorov, ktorý tento výpočet ovplyvňuje, je spôsob prichytenia plochy (funkcia, ktorou disponujú softvéry určené na rekonštrukciu plôch) – konkrétne vnútorné, vonkajšie alebo stredné prichytenie. Každý z týchto prístupov pracuje s inou časťou povrchu reverzovanej súčiastky a teda aj s inou množinou bodov polygonálnej siete, ktorá reprezentuje reálnu geometriu súčiastky. Z toho vyplýva, že výber spôsobu prichytenia priamo ovplyvňuje vypočítaný priemer a teda aj výslednú odchýlku od menovitej hodnoty. Táto kapitola sa zameriava na objasnenie problematiky spôsobu prichytenia a na to, ako tento spôsob prichytenia dokáže ovplyvniť výsledný rozmer CAD modelu.

Na Obr. 9.14 je znázornený princíp *vnútorného prichytenia* pri určovaní priemeru valcovej súčiastky z polygonálnej siete. Tento spôsob prichytenia vychádza z predpokladu, že sa analýza vykonáva len na bodoch, ktoré ležia na najvzdialenejších miestach od stredu vo vnútornej oblasti medzikružia. Na Obr. 9.14a je zobrazená menovitá hodnota priemeru (sivá kružnica), ku ktorej sa vzťahuje skutočná geometria povrchu (menovitý rozmer). Na základe zvoleného spôsobu prichytenia sú vybrané konkrétne body polygonálnej siete, z ktorých sa určuje aktuálna hodnota priemeru (modrá kružnica). Obr. 9.14b znázorňuje konkrétne porovnanie medzi nominálnou hodnotou priemeru a získanou (aktuálnou) hodnotou priemeru.

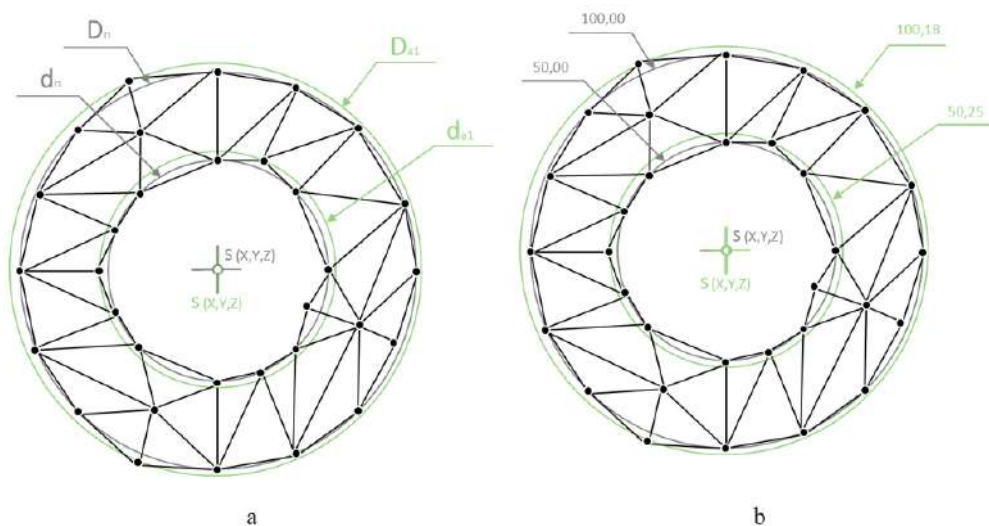
Obr. 9.15 znázorňuje princíp výpočtu rozmerov pri použití tzv. *vonkajšieho prichytenia*, kde je geometrický tvar, v tomto prípade kružnica, definovaný tak, aby prechádzal cez najvzdialenejšie body polygonálneho modelu.

Z tohto príkladu je zrejmé, že výber spôsobu, akým je definovaná geometria, má priamy vplyv na získané rozmery. Vonkajšie prichytenie môže viesť k miernemu nadhodnoteniu priemerov, čo je potrebné zohľadniť pri ďalšom spracovaní dát a rekonštrukcii 3D modelu.

Tento spôsob prichytenia sa môže javiť ako výhodný najmä v prípadoch, keď je dôležité zabezpečiť maximálne pokrytie celého profilu, no zároveň prináša riziko nadhodnotenia rozmerových údajov, najmä pri modeloch s výraznejším šumom alebo deformáciami na hrane. Preto sa často využíva najmä na rýchlu orientačnú analýzu alebo pri kontrole maximálnych hraníc rozmerov.



Obr. 9.14. Priemer meraný na najvzdialenejšom vnútornom bode od menovitej kružnice (sivá farba)
tzv. vnútorné prichytenie
a – identifikácia menovitej hodnoty (nominal – sivá) a možných variant hodnôt (actual – modrá)
b – požadovaná hodnoty (nominal – sivá) a získané hodnoty (actual – modrá)

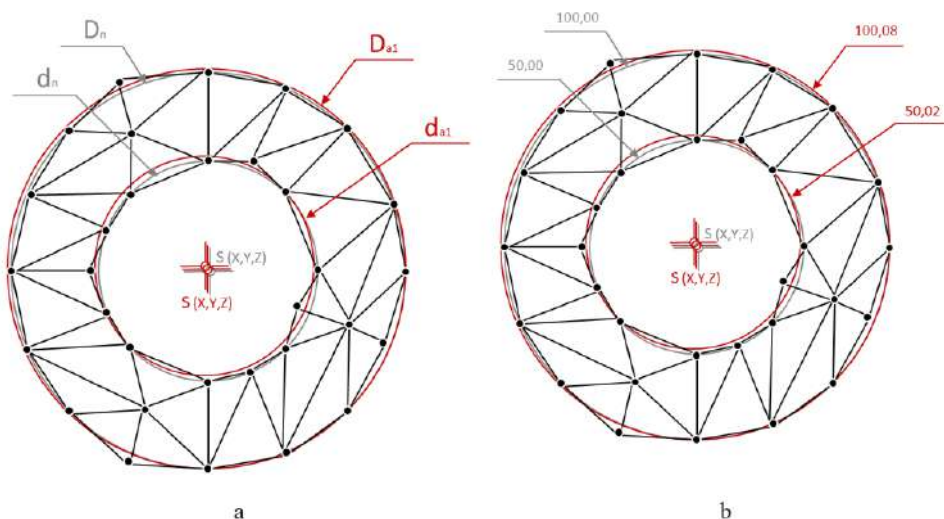


Obr. 9.15. Priemer meraný na najvzdialenejšom vonkajšom bode od menovitej kružnice (sivá farba)
tzv. vonkajšie prichytenie
a – identifikácia menovitej hodnoty (nominal – sivá) a možných variant hodnôt (actual – zelená)
b – požadovaná hodnoty (nominal – sivá) a získané hodnoty (actual – zelená)

Ďalším spôsobom prichytenia je **stredné prichytenie**. Na Obr. 9.16 je znázornený princíp stredného prichytenia, pri ktorom je geometrický prvok určený výpočtom z celej množiny bodov. Takéto prichytenie sa často využíva v prípadoch, keď je cieľom získať vyváženú reprezentáciu geometrie s ohľadom na rozloženie odchýlok po celom obvode meraného

objektu. Výpočet stredu alebo priemeru sa môže realizovať viacerými prístupmi, pričom medzi najpoužívanejšie patrí metóda najmenších štvorcov (tzv. Gaussov prístup), ktorá minimalizuje súčet druhých mocnín odchýlok, alebo Chebyshevov prístup, založený na minimalizácii maximálnej odchýlky. Voľba konkrétnej výpočtovej metódy má priamy vplyv na výslednú polohu stredu aj veľkosť vytvorenej kružnice, a teda aj na interpretáciu rozmerových odchýlok.

Stredné prichytenie sa v praxi využíva ako kompromisné riešenie, ktoré dokáže do značnej miery eliminovať extrémne hodnoty vzniknuté v dôsledku šumu v dátach, nedokonalého nastavenia skenovacích parametrov alebo nerovnomerného rozloženia bodov v polygonálnej sieti. Takto spracovaný model poskytuje stabilnejší výsledok, ktorý je menej citlivý na lokálne anomálie a jednotlivé vybočujúce body.



Obr. 9.16. Priemer meraný na najvzdialenejšom vonkajšom bode od menovitej kružnice (sivá farba) tzv. stredné prichytenie

a – identifikácia menovitej hodnoty (nominal – sivá) a možných variant hodnôt (actual – červená)
b – požadovaná hodnoty (nominal – sivá) a získané hodnoty (actual – červená)

9.5.3 Výpočet efektívneho priemeru na základe výšky rezu a hrúbky vrstvy pre súčiastky vyrábané aditívnou technológiou

Pri aditívnej výrobe zohráva výška vrstvy (Layer Height) kľúčovú úlohu pri ovplyvňovaní kvality výsledného produktu, mechanických vlastností a času výroby. Dve najrozšírenejšie technológie Fused Deposition Modeling (FDM) a Stereolithography (SLA) sa v tomto ohľade výrazne odlišujú.

Technológia FDM využíva termoplastické vlákno, ktoré sa taví a vrství po jednotlivých častiach. Typická hrúbka vrstvy sa pohybuje v rozsahu 0,05 až 0,4 mm, pričom najčastejšie sa používajú hodnoty 0,1 až 0,2 mm (Sood, Ohdar a Mahapatra, 2010). Nižšia hrúbka vrstvy zvyšuje kvalitu povrchu a mechanické vlastnosti v smere vrstvenia, ale zároveň zvyšuje čas výroby. Naopak, hrubšie vrstvy (0,3 mm a viac) skracujú čas tlače, ale môžu viesť

k výraznému zníženiu pevnosti výtlačku a kvality povrchu výsledného produktu (Rankouhi a kol., 2016; Kautilya a kol., 2024).

Technológia SLA, ktorá využíva fotopolymerizáciu kvapalnej živice pomocou svetelného zdroja (laser, DLP alebo UV), umožňuje výrazne menšie hrúbky vrstiev a rozsahu 25 až 150 μm . Bežná hrúbka vrstvy je 50 až 100 μm , pričom niektoré zariadenia umožňujú aj ultrapresné vrstvy s hrúbkou 16 μm . (Katheng a kol., 2025) Menšie vrstvy prinášajú vysokú rozlišovaciu schopnosť a kvalitný povrch, ale podobne ako pri FDM, za cenu predĺženého času výroby. Optimálna pevnosť dielov vyrábaných SLA sa podľa experimentálnych štúdií dosahuje pri hrúbke vrstvy približne 80 až 100 μm . (Chia a Wu, 2015)

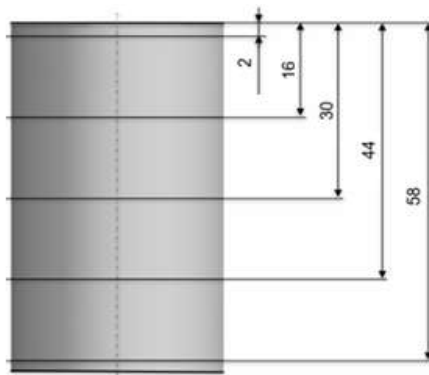
Z praktického hľadiska možno zhrnúť rozdiely takto:

- Aditívna technológia FDM ponúka robustnejšiu a lacnejšiu možnosť s výškou vrstvy 100 až 200 μm , no za cenu nižšej presnosti.
- SLA umožňuje vyššie rozlíšenie a jemnejšie detaily pri nižších hrúbkach vrstvy (aj pod 50 μm), čo je vhodné pre zložité alebo esteticky náročné diely, napr. v zubnom lekárstve alebo šperkárstve.

V kap. 9.4 (Analýza polygonálneho modelu) sú opísané prístupy na získanie počiatočného modelu z polygonálnej siete pomocou funkcií reverzného geometrického modelovania. Medzi základné funkcie a najčastejšie používané funkcie patrí aj *rez* a *obrysová krivka*. Tieto funkcie sa používajú pri primitívnych geometrických objektoch na získanie obrysu polygonálneho modelu. Tento obrys tvaru je následne možno prekresliť a s modelovacími funkciami ako rotácia alebo vytiahnutie previesť na objemový tvar.

Pri vytváraní nového 3D CAD modelu súčiastky reverzným geometrickým modelovaním zo súčiastky vyrábanej aditívnymi technológiami, konkrétne technológiou FDM, môže predstavovať použitie tejto funkcie problém so správnym umiestnením rezu na rekonštruovanej ploche. Príklad polohy rezu je uvedený v nasledujúcom príklade.

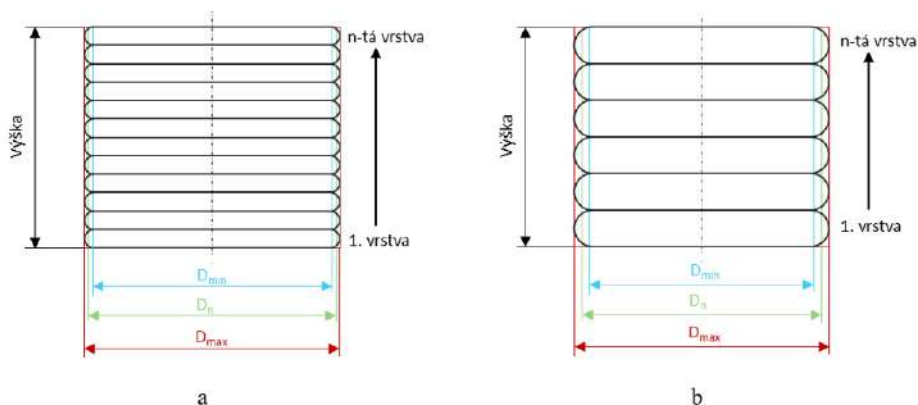
Na Obr. 9.17 je zobrazený základný jednoduchý geometrický objekt (valec s priemerom 40 mm a výškou 60 mm), na ktorom sú znázornené miesta rezov pre potrebu rekonštrukcie plochy.



Obr. 9.17. Príklad polôh na získanie obrysových kriviek jednoduchého geometrického objektu (Dubníčka, Buranský a Kritikos 2025)

V súvislosti s použitím funkcie rezu na súčiastku, ktorá je vyrábaná aditívnou technológiou FDM je nutné brať v kontext aj princíp akým táto technológia vytvára objemové telesá. V teoretickom priestore je známe, že technológia pri procese výroby, vytvára vrstvy, ukladané na seba v určitej výške a šírke (výška a šírka vrstvy). V rámci reverzného geometrického modelovania je podstatná práve výška vrstvy, pretože pri reze rovnobežnom so smerom vytvárania vrstiev súčiastky je možno získať rozdielne hodnoty celkového priemeru.

Na Obr. 9.18 možno vidieť teoretický prierez takouto súčiastkou, kde D_{min} je minimálny možný nameraný priemer valcového telesa, D_{max} je maximálny možný nameraný priemer valcového telesa a D_n je menovitý priemer valcového telesa, ktoré je potrebné získať.



Obr. 9.18. Identifikácia priemerov pri rôznej výške vrstvy
a – výška vrstvy 0,1 mm, b – výška vrstvy 0,2 mm

V kontexte vytvárania nového 3D CAD modelu je nutné brať v úvahu polohu vytváraného rezu, keďže správny výber polohy rezu dokáže ovplyvniť celkový rozmer 3D CAD modelu, ktorý sa vytvára. Ak rovina rezu prechádza práve po hrane vrstvy, môže dôjsť k meraniu minimálneho (D_{min}) priemeru valcového telesa. Naopak ak rovina rezu prechádza v strednej hodnote výšky vrstvy, je možné meranie maximálneho (D_{max}) priemeru valcového telesa. To môže výrazne ovplyvniť výsledný rozmer rekonštruovaného 3D CAD modelu.

Z tohto dôvodu je výška vrstvy kritickým faktorom pri tvorbe rezov a obrysových kriviek v procese reverzného geometrického modelovania súčiastok, vyrábaných FDM aditívnou technológiou. V ideálnom prípade by sa výber roviny rezu mal prispôbiť vrstveniu tak, aby sa minimalizoval vplyv hrúbky vrstvy a dosiahla sa čo najvernejšia rekonštrukcia pôvodného tvaru.

Efektívny priemer (D_{eff}) predstavuje odhadovaný priemer získaný pri reze polygonálnym modelom súčiastky vytvorenej FDM technológiou, pričom tento rez prechádza práve jednou vrstvou. Vzhľadom na to, že vrstvy vytvárané technológiou FDM majú obvykle eliptický alebo sploštený tvar a skutočný priemer valcového objektu sa pri rôznych výškach rezu v rámci jednej vrstvy môže líšiť.

Na presné pochopenie vplyvu výšky vrstvy na výslednú geometriu je potrebné analyzovať tvar jednotlivých vrstiev vytvorených počas procesu FDM/FFF. Na Obr. 9.19 je znázornený detailný pohľad na profil jednej vrstvy vytvorenej touto technológiou. Vrstvy nie sú ideálne

hranaté, majú zaoblený tvar v dôsledku spôsobu, akým sa extrudovaný materiál ukladá a tvaruje. Tento zaoblený profil vytvára rozdiel medzi maximálnym, minimálnym a efektívnym priemerom, ktoré môžu byť namerané v rôznych výškach jednej vrstvy.

Efektívny priemer D_{eff} pre jednu vrstvu sa vypočíta podľa vzťahu (9.1).

$$D_{eff} = D_{max} - 2 \cdot \left(\frac{t}{2} - \sqrt{\left(\frac{t}{2}\right)^2 - \left(\frac{t}{2} - h\right)^2} \right) \quad (9.1)$$

kde D_{eff} je efektívny priemer v mm,

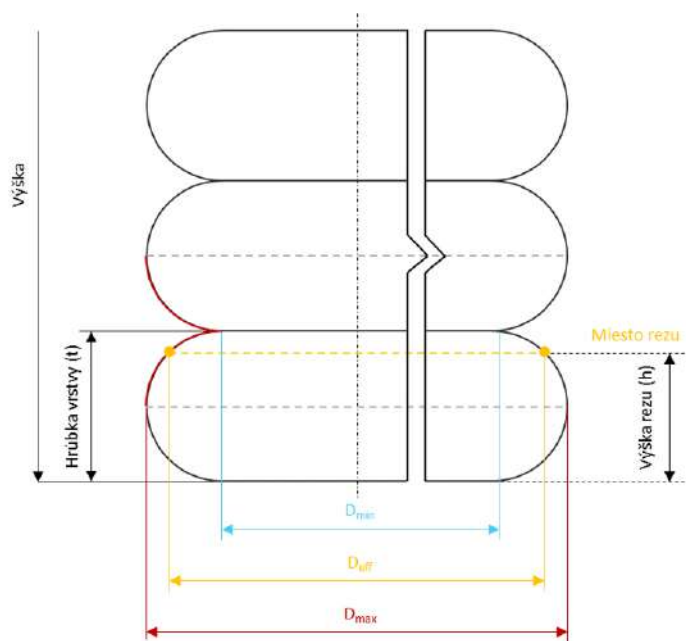
t – výška vrstvy v mm,

h – výška rezu v mm,

D_{max} – maximálny dosiahnuteľný priemer v mm (D_{max} = nominálny rozmer $\pm$ odchýlka 3D tlačiarne. Pre h platí: $0 \leq h \leq t$).

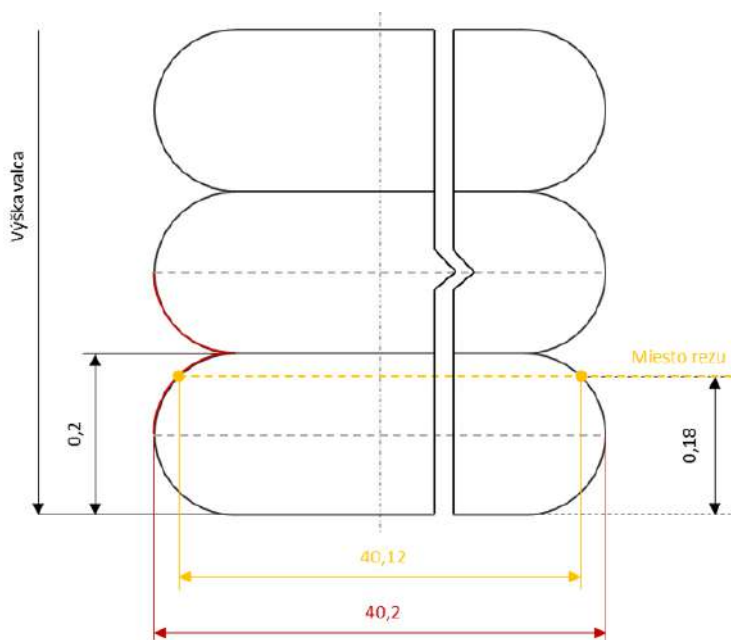
Tento výpočet vychádza z predpokladu, že prierez vrstvy má tvar segmentu kruhu (polkruhový alebo eliptický profil), kde priemer klesá kvadraticky smerom od stredu vrstvy k jej okrajom. To znamená, že najväčší priemer D_{max} sa dosahuje v strede vrstvy ($h = t/2$), zatiaľ čo pri $h = t$ alebo $h = 0$ je efektívny priemer D_{min} .

Tento model poskytuje jednoduchý spôsob, ako zohľadniť schodový profil FDM/FFF vrstiev pri výpočte efektívneho priemeru valcovej plochy v rôznych výškach a umožňuje lepšie odhadnúť geometrickú chybu pri tvorbe CAD modelu na základe rezu v jednej konkrétnej výške.



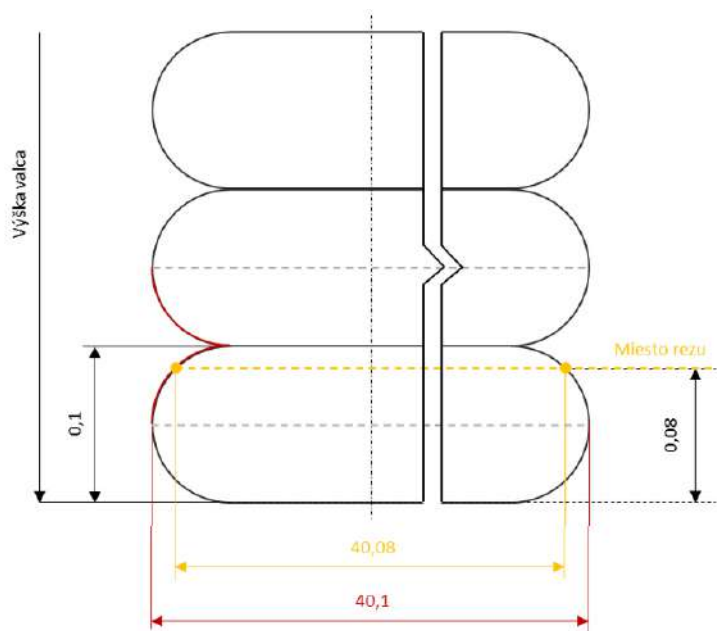
Obr. 9.19. Detailný a teoretický pohľad na vrstvy pri technológii FDM/FFF s definovanými priermi

Príklad výpočtu efektívneho priemeru pre súčiastku vyrobenú aditívnou technológiou FDM/FFF je znázornený na Obr. 9.20. Výška vrstvy t je 0,2 mm. Nominálny priemer (požadovaný priemer) súčiastky je 40 mm, skutočný priemer teda D_{max} je 40,2 mm. Miesto rezu h je 0,18 mm. Pre h platí: $0 \leq h \leq 0,2$. Po dosadení hodnôt do vzťahu (9.1) hodnota efektívneho priemeru D_{eff} je 40,12 mm. V mieste rezu je získaný priemer s hodnotou 40,12 mm. Pri vytváraní valcovej plochy zo získaného efektívneho priemeru v porovnaní s nominálnym priemerom je odchýlka 0,12 mm.



Obr. 9.20. Detailný pohľad na vrstvy pri aditívnej technológii FDM/FFF s reálnymi hodnotami

Príklad na výpočet efektívneho priemeru pre súčiastku vyrobenú aditívnou technológiou SLA je znázornený na Obr. 9.21. Výška vrstvy t je 0,1 mm. Nominálny priemer (požadovaný priemer) súčiastky je 40 mm, skutočný priemer teda D_{max} je 40,10 mm. Miesto rezu h je 0,08 mm. Pre h platí: $0 \leq h \leq 0,1$. Po dosadení hodnôt do vzťahu (9.1) hodnota efektívneho priemeru D_{eff} je 40,08 mm. V mieste rezu je získaný priemer s hodnotou 40,08 mm. Pri vytváraní valcovej plochy zo získaného efektívneho priemeru v porovnaní s nominálnym priemerom je odchýlka 0,08 mm. Je nutné však podotknúť, že tieto výpočty sú iba teoretické.

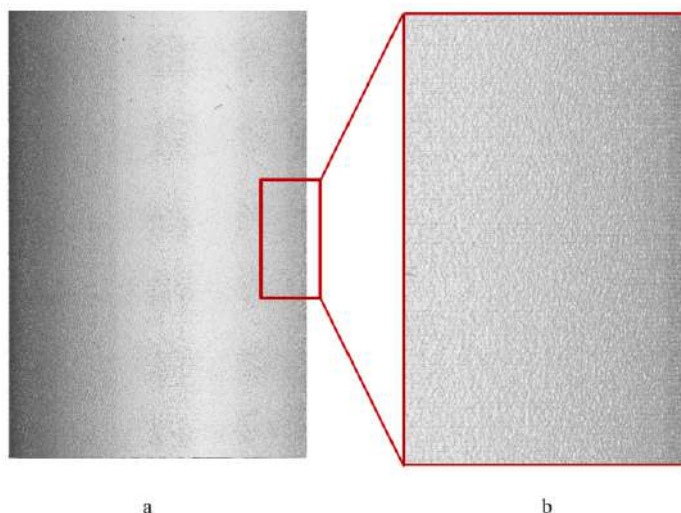


Obr. 9.21 Detailný pohľad na vrstvy pri aditívnej technológii SLA s reálnymi hodnotami

9.5.4 Porovnanie vplyvu hrúbky vrstvy na priemer valcovej plochy získaný rezom

V tejto kapitole je analyzovaný vplyv hrúbky vrstvy pri aditívnej výrobe metódou FDM/FFF na výsledný priemer valcovej plochy. Pre experiment boli zvolené tri rozdielne hrúbky vrstvy (0,18; 0,25 a 0,33 mm), pričom ostatné parametre výroby zostali nezmenené. Menovitý priemer valcovej plochy bol 40 mm. Vzorové súčiastky boli vyrobené na zariadení Stratasys F370. Použitý bol materiál ABS M30. Kvalita povrchu pri vybraných hrúbkach vrstvy je viditeľná na Obr. 9.22b (vzorová súčiastka, valcová plocha s hrúbkou vrstvy 0,18 mm), Obr. 9.23b (vzorová súčiastka, valcová plocha s hrúbkou vrstvy 0,25 mm) a Obr. 9.24b (vzorová súčiastka, valcová plocha s hrúbkou vrstvy 0,25 mm).

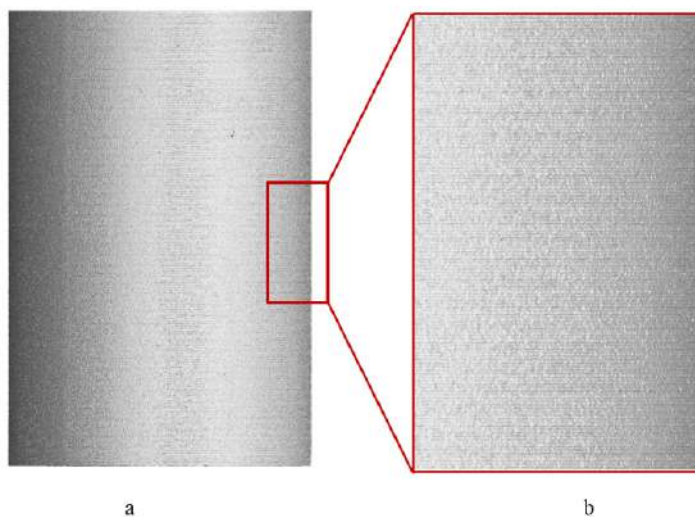
Cieľom tohto porovnania je ukázať, akým spôsobom sa hrúbka vrstvy premieta do presnosti rozmerov, kvality povrchu a celkového tvaru valca pri aplikovaní funkcie „rez“. Každý z nasledujúcich obrázkov obsahuje 3D sken vyrobenej plochy a detailný pohľad na jej kvalitu povrchu. Tabuľka 9.2 až Tabuľka 9.4 k jednotlivým obrázkom potom sumarizujú skutočne namerané hodnoty priemerov v porovnaní s menovitou hodnotou a definovanou toleranciou. Hodnoty skutočných rozmerov boli získané pomocou softvéru VGSTUDIO MAX 3. Vzorové súčiastky boli digitalizované pomocou priemyselného počítačového tomografu ZEISS METROTOM 1500. Parametre použité pri získavaní dát použitím priemyselnej počítačovej tomografie boli tieto: napätie röntgenovej lampy 180 kV a prúd 500 μ A. Integrovaný čas bol nastavený na 1000 ms. Celkovo bolo nasnímaných 2050 snímok. Počas merania nebol použitý žiadny filter. Pozícia od röntgenovej lampy bola nastavená na 305 mm.



Obr. 9.22. Valcová plocha vyrobená aditívnou technológiou FDM/FFF pri hrúbke vrstvy 0,18 mm
a – 3D sken valcovej plochy, b – detailný pohľad na valcovú plochu

Tabuľka 9.2. Hodnoty priemerov v mieste rezu pre hrúbku vrstvy 0,18 mm (podľa Obr. 9.17)

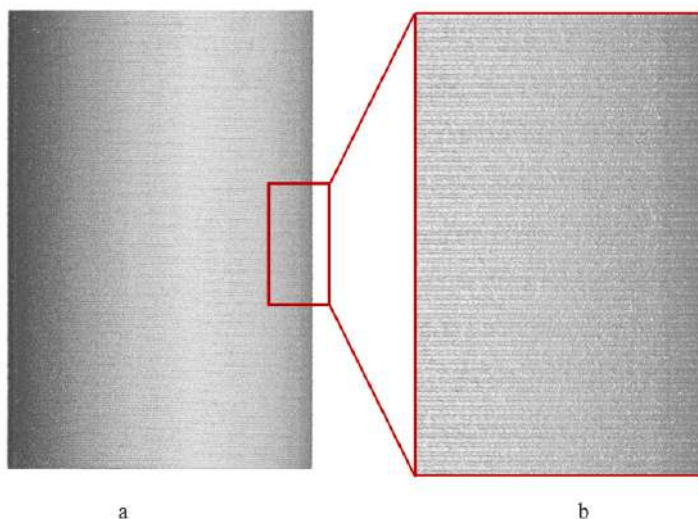
Miesto rezu (mm)	Skutočný priemer (mm)	Nominálny priemer (mm)	Tolerancia (mm)
2	39,913	40	$\pm 0,15$
16	39,975	40	$\pm 0,15$
30	39,888	40	$\pm 0,15$
44	39,895	40	$\pm 0,15$
58	39,921	40	$\pm 0,15$



Obr. 9.23. Valcová plochy vyrobená aditívnou technológiou FDM/FFF pri hrúbke vrstvy 0,25 mm
a – 3D sken valcovej plochy, b – detailný pohľad na valcovú plochu

Tabuľka 9.3. Hodnoty priemerov v mieste rezu pre hrúbku vrstvy 0,28 mm (podľa Obr. 9.17)

Miesto rezu (mm)	Skutočný priemer (mm)	Nominálny priemer (mm)	Tolerancia (mm)
2	40,014	40	$\pm 0,15$
16	39,995	40	$\pm 0,15$
30	39,987	40	$\pm 0,15$
44	39,955	40	$\pm 0,15$
58	39,999	40	$\pm 0,15$



Obr. 9.24. Valcová plochy vyrobená aditívnou technológiou FDM/FFF pri hrúbke vrstvy 0,33 mm
a – 3D sken valcovej plochy, b – detailný pohľad na valcovú plochu

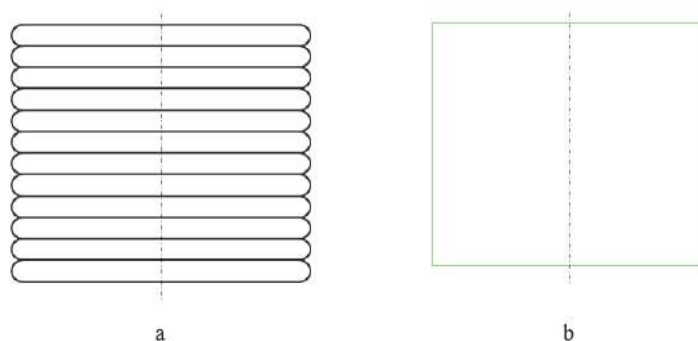
Tabuľka 9.4. Hodnoty priemerov v mieste rezu pre hrúbku vrstvy 0,33 mm (podľa Obr. 9.17)

Miesto rezu (mm)	Skutočný priemer (mm)	Nominálny priemer (mm)	Tolerancia (mm)
2	39,944	40	$\pm 0,15$
16	40,012	40	$\pm 0,15$
30	39,933	40	$\pm 0,15$
44	39,959	40	$\pm 0,15$
58	39,923	40	$\pm 0,15$

9.5.5 Porovnanie nominálneho valca s valcom vyrobených aditívnou technológiou FDM/FF

Farebná mapa odchýlok zobrazená na Obr. 9.25 predstavuje rozdiel medzi nominálnou hodnotou (v tomto prípade plocha valca) a hodnotou vyrobeného objektu (skutočná plocha valca). Farebná škála predstavuje nástroj, ktorý slúži na vizuálne znázornenie veľkosti odchýlok medzi nominálnym CAD modelom a reálnym vyrobeným objektom. Je to vlastne prevod číselných hodnôt (rozmerových odchýlok v mm) na farby, vďaka čomu je možno rýchlo a intuitívne posúdiť, kde a v akej miere sa súčiastka odlišuje od ideálneho tvaru. Vďaka farebnému zobrazeniu možno presne určiť, kde vznikajú systematické chyby (napr.

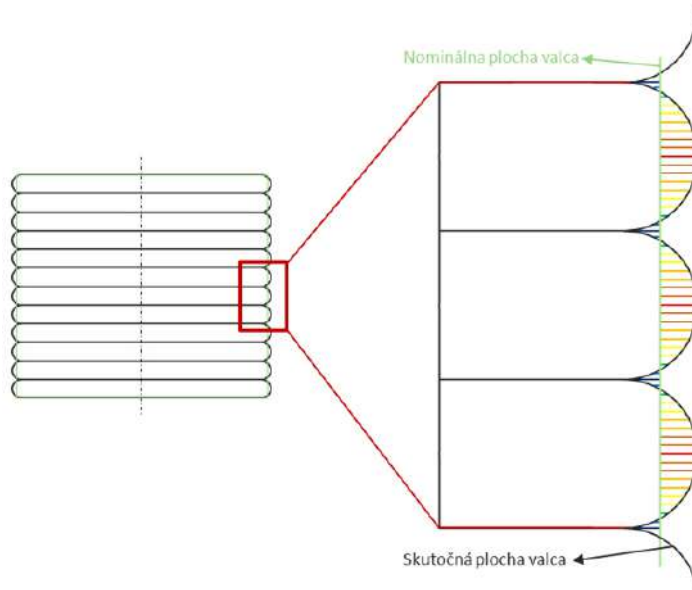
deformácie, nadmerné vrstvy, prehnutia atď.). Ak je vyrobených viac dielov pri rôznych parametroch, farebná mapa umožní okamžite posúdiť, ktorý diel je vyrobený vo vyššej kvalite. Na Obr. 9.25a je zobrazený 3D sken valcovej súčiastky vyrobenej aditívnou technológiou FDM/FFF. Pri tomto spôsobe výroby vznikajú viditeľné hranice medzi vrstvami. Obr. 9.25b zobrazuje CAD model valcovej súčiastky, ktorý môže byť navrhnutý v ľubovoľnom CAD softvéri. Preložením týchto dvoch 3D modelov (3D sken a 3D CAD model) dôjde k ustaveniu dvoch modelov v priestore softvéru podľa zvoleného spôsobu. Následne je pre každý bod na aktuálnom modeli vypočítaná odchýlka od rovnakého bodu nachádzajúceho sa na nominálnom modeli. Potom je tento bod označený farbou, zodpovedajúcou výške odchýlky. Takýmto spôsobom sú počítané odchýlky aj pre ďalšie body na aktuálnom modeli. Výsledkom tohto porovnania je práve farebná mapa, ktorá umožňuje vizuálne zhodnotenie rozmerovej presnosti vyrobenej súčiastky. Farebnou mapou je možno nielen odhaliť lokálne nedokonalosti výroby, ale aj získať údaje o rozmerových odchýlkach, ktoré možno ďalej spracovať a využiť napr. pri optimalizácii výrobných parametrov.



*Obr. 9.25. Princíp tvorby farebnej mapy odchýlok
a – 3D sken reálnej valcovej súčiastky, b – 3D CAD model*

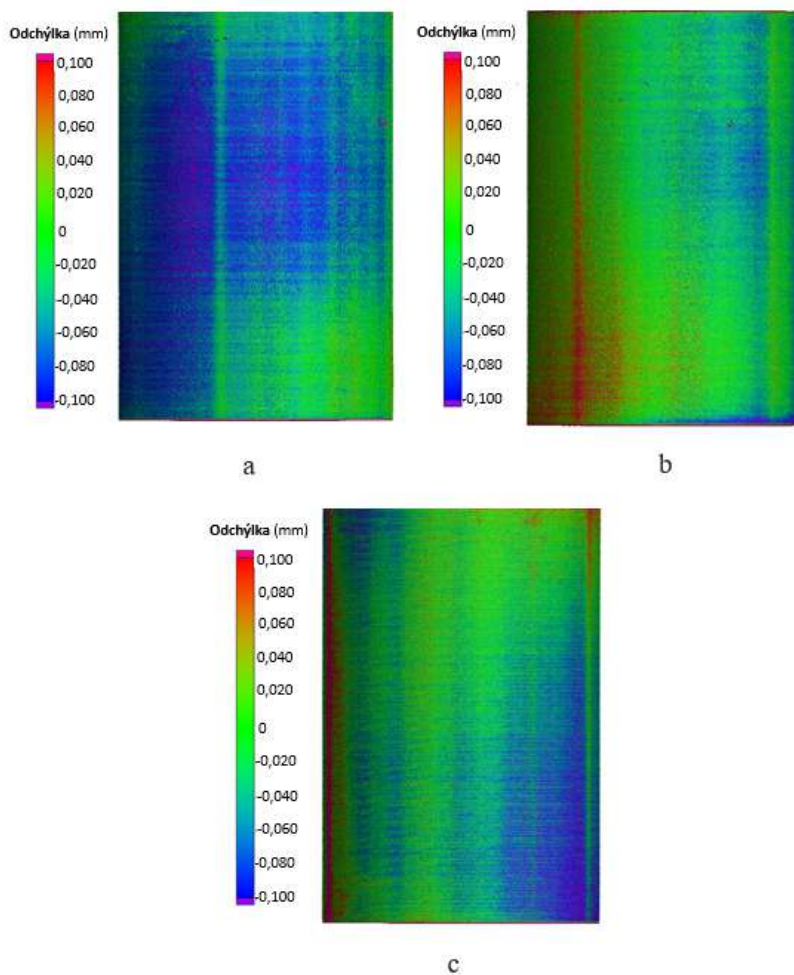
V zobrazení na Obr. 9.26 platí, že:

- červená farba označuje miesta s kladnou odchýlkou (nadmerný prídavok materiálu, t. j. objekt je v danej oblasti väčší, než by mal byť podľa modelu),
- modrá farba reprezentuje záporné odchýlky (nedostatok materiálu, objekt je v danej oblasti menší, než je nominálny rozmer),
- zelená farba zodpovedá oblastiam s min. rozdielmi, teda miestam, kde je vyrobený povrch najbližšie k nominálnej geometrii CAD modelu.



Obr. 9.26. Princíp tvorby farebnej mapy odchýlok s detailom na farebnú mapu odchýlok

Na Obr. 9.27 sú zobrazené príklady farebnej mapy odchýlok valcov vyrobených aditívnou technológiou FDM/FFF pri rôznej hrúbke vrstvy. Jednotlivé farebné mapy odchýlok znázorňujú rozdiely medzi nominálnym CAD modelom a reálnym vyrobeným objektom. Farebná mapa odchýlok bola nastavená v rozmedzí od $+0,1$ mm (červená farba) po $-0,1$ mm (modrá farba), pričom zelená farba reprezentuje min. odchýlky od nominálnej geometrie. Takto spracované farebné mapy poskytujú názorný prehľad o kvalite povrchu a presnosti vyrobených súčiastok. Vďaka nim možno rýchlo vyhodnotiť, ako sa mení výsledná geometria v závislosti od nastavenej hrúbky vrstvy. Pri menšej hrúbke vrstvy možno spravidla pozorovať vyššiu presnosť a rovnomernejšie rozloženie odchýlok, zatiaľ čo pri väčšej hrúbke vrstvy bývajú odchýlky výraznejšie a nerovnomernejšie rozložené ako vidieť na obrázkoch v kapitole 9.5.4.



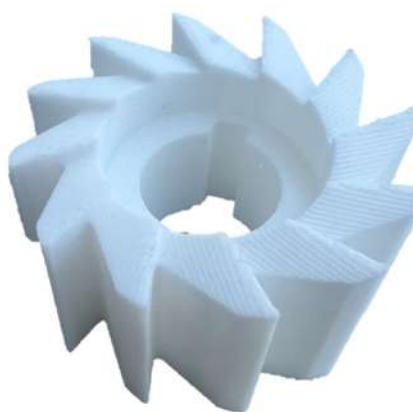
Obr. 9.27. Farebná mapa odchýlok valcov vyrobených aditívnou technológiou FDM/FF pri rôznej hrúbke vrstvy
a – hrúbka vrstvy 0,18 mm, *b* – hrúbka vrstvy 0,25 mm, *c* – hrúbka vrstvy 0,33 mm

9.6 Príklady pre aditívnu technológiu FDM/FFF a SLA

V rámci prípadovej štúdie boli analyzované dve identické súčiastky (Obr. 9.28 a Obr. 9.29): čelné valcové frézy ($\varnothing 63 \times 30$), ktoré boli vyrobené dvoma odlišnými aditívnymi technológiami: stereolitografia (SLA) a Fused Deposition Modeling/Fused Filament Fabrication (FDM/FFF).



Obr. 9.28. Príklad čelnej frézy vyrobenej aditívnou technológiou SLA



Obr. 9.29. Príklad čelnej frézy vyrobenej aditívnou technológiou FDM/FFF

Cieľom bolo posúdiť vplyv použitej výrobnéj technológie na kvalitu a použiteľnosť dát získaných priemyselnou počítačovou tomografiou (iCT) na účely reverzného geometrického modelovania. V prípade dielov vyrobených technológiou FDM/FFF je geometria ovplyvnená vrstvením materiálu a prítomnosťou vnútornej výplne (tzv. infill). Táto výplň síce nie je funkčnou časťou súčiastky v rámci reverzného geometrického modelovania, no pri počítačovej tomografii je plne zachytená spolu so zvyškom objemu. Výsledkom je veľké množstvo zbytočných dát, ktoré je potrebné potom spracovať a v prípade potreby odstrániť. To značne znižuje efektivitu iCT ako nástroja na získavanie dát určených na reverzné geometrické modelovanie. Diely vyrobené technológiou SLA sú typicky tvorené homogénnou štruktúrou bez vnútornej výplne. Vďaka tomu možno pri 3D digitalizácii plne využiť potenciál priemyselnej počítačovej tomografie, ktoré umožňuje zachytiť aj jemné detaily vnútornej geometrie. Parametre použité pri získavaní dát čelných fréz vyrobených aditívnymi technológiami sú zobrazené v Tabuľke 9.5.

Tabuľka 9.5. Parametre použité pri získavaní dát použitím priemyselnej počítačovej tomografie

PARAMETER	HODNOTA
Napätie (kV)	180
Prúd (μ A)	200
Počet snímkov	1050
Integračný čas (ms)	500
Rozlíšenie detektora (px)	1024 x 1024
Priemerovanie obrázkov	2
Filter	-
Pozícia od röntgenovej lampy (mm)	350

Výsledné polygonálne modely obsahujú detailnú topológiu vonkajšieho tak aj vnútorného tvaru a sú priamo použiteľné na účely reverzného geometrického modelovania a geometrickej analýzy. Ako príklad slúži 3D digitalizácia čelnej valcovej frézy vyrobenej technológiou SLA, pri ktorej bol použitý priemyselný počítačový tomograf. Výstupom bol

vysoko detailný polygonálny model s veľkosťou 273 MB, ako aj prierez objektom zachytávajúci vnútorné usporiadanie materiálu a súvislú plnú štruktúru (Obr. 9.30a,b).



*Obr. 9.30. Polygonálny 3D model získaný priemyselným počítačovým tomografom
a – čelná valcová fréza vyrobená aditívnou technológiou SLA (273 MB (286 511 104 bajtov)),
b – rez čelnou valcovou frézou vyrobenou aditívnou technológiou SLA*

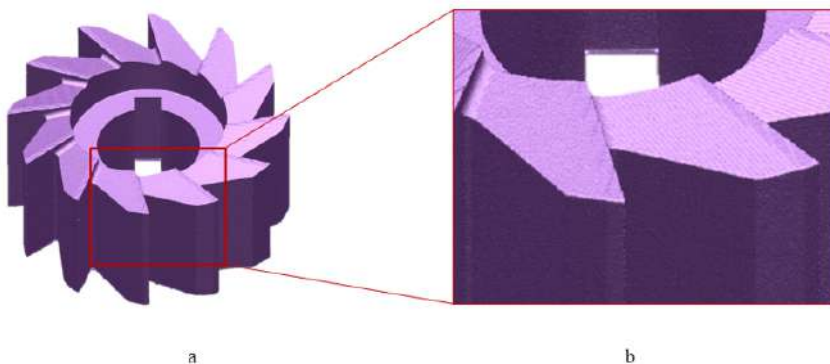
V kontraste od modelu vytvoreného aditívnou technológiou stereolitografie polygonálne modely čelnej valcovej frézy vyrobenej metódou FDM/FFF (Obr. 9.31a,b) obsahujú výrazne väčší objem dát. Digitalizácia zachytáva nielen vonkajší tvar nástroja, ale aj kompletný vnútorný objem vrátane infillu. Prierez modelu (Obr. 9.31b) jasne demonštruje, že počítačová tomografia pri FDM/FFF súčiastkach generuje polygonálne siete, ktoré z hľadiska reverzného geometrického modelovania nemajú priamy význam. Dôsledkom je významne väčší dátový súbor, ktorého veľkosť v tomto prípade dosiahla takmer 950 MB. Tento objem predstavuje zvýšené nároky na spracovanie a vyžaduje dodatočné operácie, ako je redukcia bodov alebo filtrovanie vnútorných štruktúr, aby bolo možno model ďalej efektívne využívať. Pri modeli vytvorenom FDM/FFF aditívnou technológiou je preto nevyhnutné počítať s potrebou optimalizácie polygonálnej siete a odstraňovania nadbytočných vnútorných prvkov pred nasadením v procesoch reverzného geometrického modelovania či geometrickej analýzy.



Obr. 9.31. Polygonálny 3D model získaný priemyselným počítačovým tomografom
 a – čelná valcová fréza vyrobená aditívnou technológiou FDM (949 MB (995 524 608 bajtov)),
 b – rez čelnou valcovou frézou vyrobenou aditívnou technológiou FDM

Na detailnejšiu analýzu kvality výstupných dát bol pozorovaný polygonálny 3D model frézy vyrobenej technológiou SLA, ktorý je znázornený na Obr. 9.32. Na Obr. 9.32a je zobrazený celkový pohľad na digitalizovaný model získaný z CT, zatiaľ čo na Obr. 9.32b je priblížená polygonálna sieť. Na tomto detaile je možno pozorovať vysokú hustotu polygonálnej siete a plynulosť prechodov medzi jednotlivými geometrickými prvkami, čo je výsledkom presnosti CT skenovania v kombinácii s kvalitou povrchu typickou pre SLA technológiu.

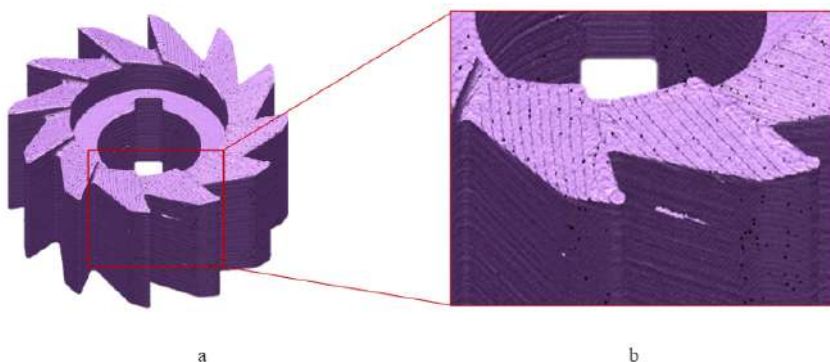
Vysoká kvalita povrchového skenu bez výrazných vrstiev alebo švov vytvára ideálne podmienky na ďalšiu rekonštrukciu CAD modelu alebo prípravu na geometrickú analýzu. Polygonálna sieť vykazuje pravidelnú štruktúru bez deformácií či artefaktov, pričom zachováva aj jemné detaily rezných hrán frézy. Takto získané dáta si nevyžadovali dodatočnú filtráciu alebo segmentáciu, čím sa výrazne skrátil čas potrebný na spracovanie a konverziu modelu do parametrickej podoby.



Obr. 9.32. Polygonálny 3D model čelnej valcovej frézy vyrobenej technológiou SLA
 a – pohľad na polygonálny 3D model, b – detail na polygonálnu sieť

Na porovnanie s modelom vyrobeným technológiou SLA je na Obr. 9.33 polygonálny 3D model čelnej valcovej frézy vyrobenej technológiou FDM. Vďaka skenovaniu na počítačovom tomografe bolo možno zachytiť jednotlivé vrstvy materiálu, ktoré vznikajú pri postupnom nanášaní termoplastického materiálu. Výsledkom je povrch, ktorý má výraznú štruktúru tvorenú pravidelným vrstvením. Okrem horizontálnych vrstiev je možno pozorovať aj stopy po pohybe trysky. Sken súčiastky taktiež ukázal nerovnosti a odchýlky v oblastiach ostrých hrán, ktoré sú spôsobené technologickými limitmi FDM procesu, napr. nepresným nastavením, prechodom medzi segmentmi alebo lokálnym prehriatím materiálu.

Z pohľadu 3D digitalizácie to znamená, že model vyrobený pomocou technológie FDM je nutné často dodatočne spracovať. Na reverzné geometrické modelovanie je potrebné upraviť polygonálnu sieť alebo vyhladiť povrch. Tieto korekcie sú nevyhnutné na vytvorenie presného 3D CAD modelu.

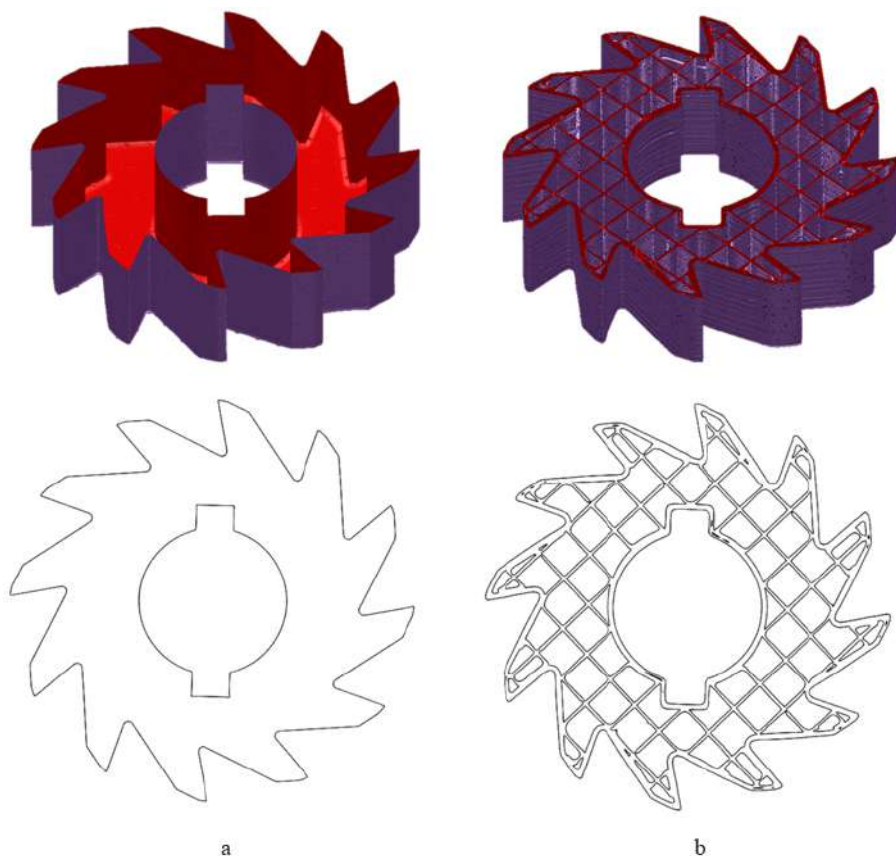


Obr. 9.33. Polygonálny 3D model čelnej valcovej frézy vyrobenej technológiou FDM
a – pohľad na polygonálny 3D model, b – detail na polygonálnu sieť

Ďalší pohľad na rozdiely medzi výstupmi FDM a SLA technológie ponúka rez polygonálnym 3D modelom, zobrazený na Obr. 9.34. Tento rez slúži na vizuálne porovnanie polygonálnych modelov získaných prostredníctvom spomínaných aditívnych technológií, zároveň však môže byť použitý v procese reverzného geometrického modelovania v rámci získania obrysových kriviek na rekonštrukciu plôch.

Pri modeli vytvorenom technológiou FDM (Obr. 9.34b) je jasne viditeľná vnútorná výplňová štruktúra (infill), ktorá vzniká ako dôsledok optimalizácie tlače s cieľom znížiť spotrebu materiálu. Táto výplň však nemá funkčný význam pre reverzné geometrické modelovanie a jej prítomnosť v dátach z CT je skôr rušivým faktorom. Zachytenie infillu pri FDM súčiastke vedie k nárastu dátovej náročnosti.

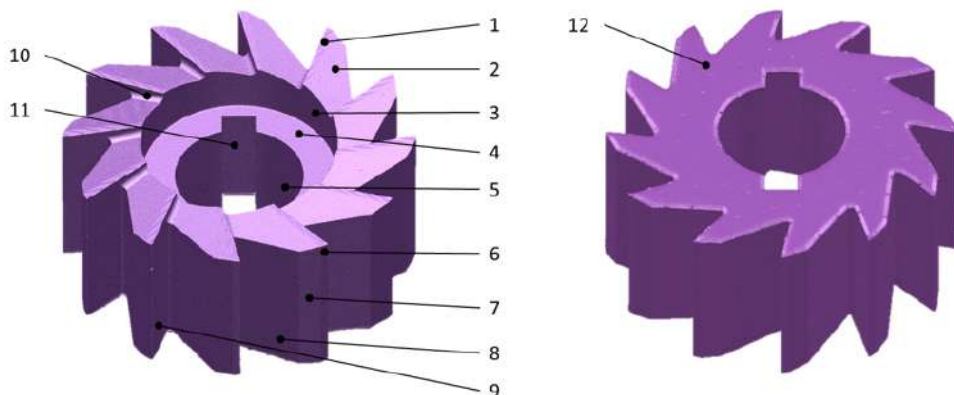
Pri modeli vyrobenom technológiou SLA (Obr. 9.34a) vidieť v reze iba dve základné obrysové krivky, a to vonkajší a vnútorný obrys súčiastky. Keďže SLA diely sú vyrobené bez vnútornej geometrie, t. j. sú tlačené so 100 % výplňou, výsledný polygonálny model je čistejší a vhodnejší na aplikáciu reverzného geometrického modelovania.



Obr. 9.34. Rez polygonálnym 3D modelom
a – krivka - profil pre SLA, b – krivka - profil pre FDM

Polygonálny 3D model získaný 3D digitalizačnými metódami, najmä CT, často obsahuje obrovské množstvo dát, ktoré presne reprezentujú vonkajšiu geometriu a vnútornú geometriu snímaného objektu. V prípade priemyselných aplikácií, reverzného inžinierstva alebo analýzy geometrických odchýlok však takéto husté modely predstavujú problém z hľadiska výpočtovej náročnosti pracovnej stanice, spracovania a ďalšieho využitia.

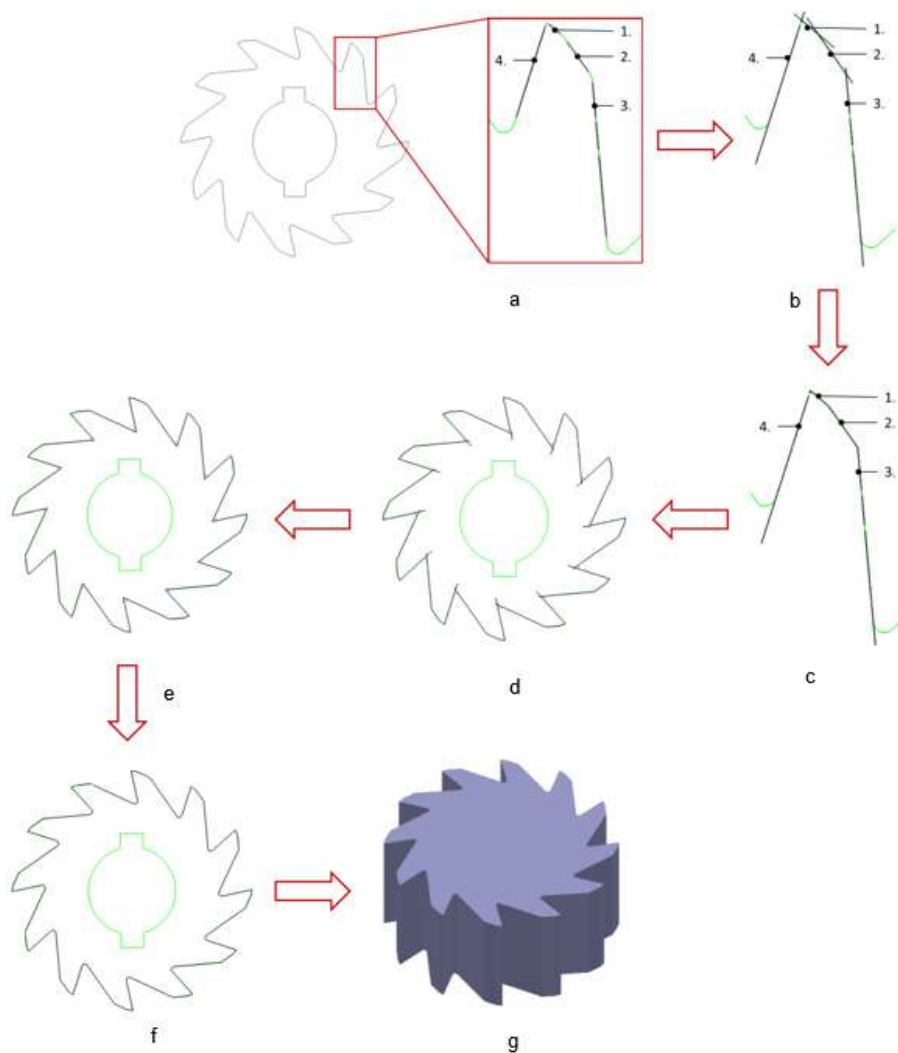
Pri reverznom geometrickom modelovaní existuje niekoľko postupov ako súčiastku zrekonštruovať. Vzhľadom na to, že súčiastky sú vyrobené rozdielnou aditívnou technológiou postup rekonštrukcie bude rovnaký. Preto v nasledujúcom príklade rekonštrukcie sa pracuje s modelom, ktorý má menšiu kapacitu dát. Ide o súčiastku vyrobenú aditívnou technológiou SLA. Detailný dôvod použitia súčiastky vyrobenej SLA technológiou je vysvetlené vyššie. V prvom kroku je potrebné analyzovať plochy na vzorovom modeli valcovej frézy (Obr. 9.35). Z hľadiska rozdelenia súčiastok na základe tvaru, radíme valcovú čelnú frézu do skupiny rotačných súčiastok. Pri valcovej čelnej fréze je identifikovaných 12 zubov. Tieto zuby sú rozložené po obvode s rovnomerným rozstupom.



Obr. 9.35. Analýza plôch na čelnej valcovej fréze vyrobenej aditívnou technológiou SLA

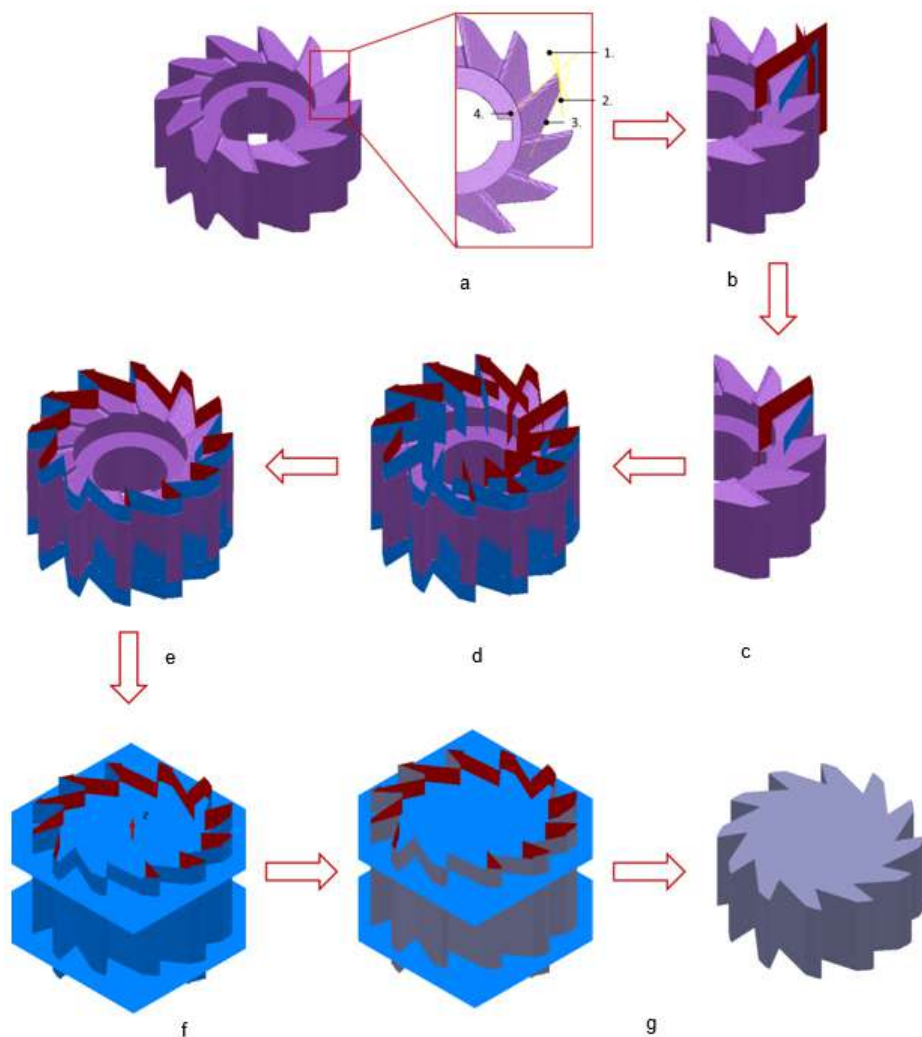
1 – rovinná plocha (1. uhol chrbta na čele frézy), 2 – rovinná plocha (2. uhol chrbta na čele frézy), 3 – valcová plocha (otvor na zapustenie hlavy upínacej skrutky), 4 – rovinná plocha (dosadacia plocha pre hlavu upínacej skrutky), 5 – valcová plocha (otvor pre upínač), 6 – rovinná plocha, (1. uhol chrbta na valcovej časti frézy), 7 – rovinná plocha (2. uhol chrbta na valcovej časti frézy), 8 – rovinná plocha (spolu s plochou (pozícia 9) tvorí drážku frézy), 9 – rovinná plocha (čelná plocha tzv. definuje uhol čela), 10 – valcová plocha (polomer tzv. prechodová plocha medzi reznou hranou a 2. plochou chrbta na čele frézy), 11 – rovinné plochy (drážka pre upínač, zamedzuje rotácii frézy na upínači), 12 – rovinná plocha (definuje veľkosť reznej časti čelnej valcovej frézy)

Pri aplikácii reverzného geometrického modelovania možno postupovať dvoma spôsobmi. Prvým spôsobom je využitie rezu a potom rekonštrukcia (premodelovanie) jedného zuba a rotácia zrekonštruovaného zuba v počte 12 okolo osi rotácie (Obr. 9.36). Druhým spôsobom je využitie prichytávania plôch na polygonálnu sieť polygonálneho 3D modelu zuba čelnej valcovej frézy (Obr. 9.37) a rotácia rekonštruovaného zuba v počte 12 okolo osi rotácie.



Obr. 9.36. Rekonštrukcia zuba čelnej valcovej frézy premodelovaním s detailom na jeden zub frézy (rez a premodelovanie)

a – využitie rezu cez polygonálny model a tvorba čiar na jednom zube (1., 2., 3. a 4.), b – predĺženie vytvorených čiar, c – orezanie vytvorených čiar a vznik zuba, d – vytvorenie 12 zubov kopírovaním jedného zuba okolo osi rotácie, e – orezanie pretínajúcich sa čiar, f – vytvorenie polomeru medzi zubami, g – vytvorenie prvotného 3D modelu použitím funkcie „vytiahnutie”

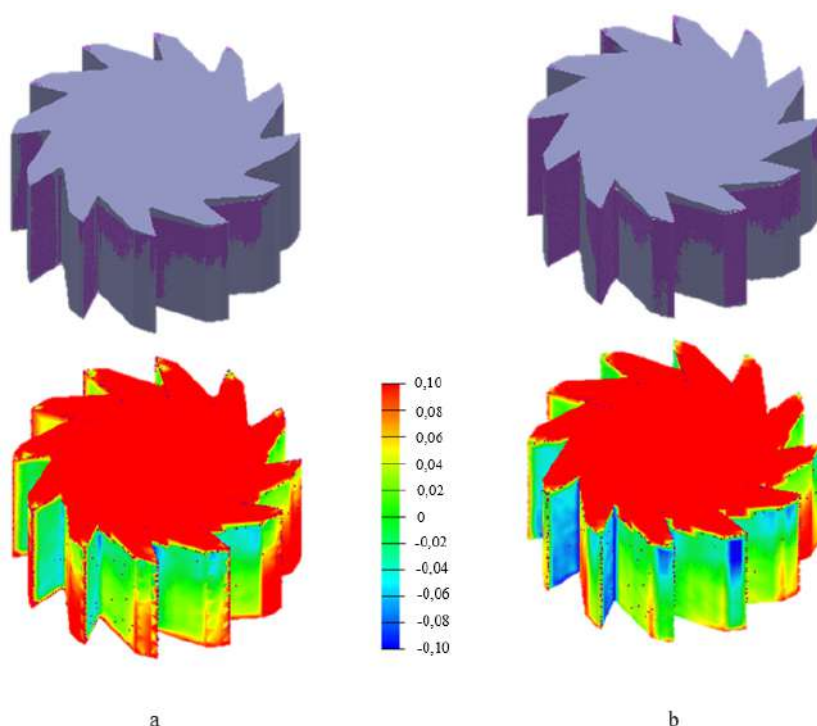


Obr. 9.37. Rekonštrukcia zuba čelnej valcovej frézy prichytením plôch s detailom na jeden zub frézy (prichytené plochy)

a – využitie funkcie prichytená plocha a detail na štyri vytvorené plochy (1., 2., 3. a 4.), b – orezané plochy jedného zuba, c – vytvorenie 12 zubov kopírovaním jedného zuba okolo osi rotácie, d – orezanie pretínajúcich sa plôch, e – vytvorenie rezných rovin, f – prevod plošného modelu na objemové teleso, g – vytvorenie prvotného 3D modelu rozdelením objemového telesa reznými rovinami

Na Obr. 9.38 sú vidieť farebné mapy odchýlok pre oba typy rekonštrukcie plôch čelnej valcovej frézy, ktoré boli ukázané na Obr. 9.36 a Obr. 9.37. Takýto výsledok možno prisudzovať použitej metóde rekonštrukcie plôch. Pri prvom spôsobe reverzného geometrického modelovania pomocou dynamického rezu je rekonštrukcia založená na matematicky definovaných krivkách, pričom po zrekonštruovaní jedného zuba sa tento prvok kopíruje rotáciou okolo osi. Výsledkom je veľmi pravidelný model, ktorý môže vykazovať väčšie odchýlky voči pôvodnej naskenovanej geometrii, pretože drobné nerovnosti spôsobené výrobou alebo opotrebením sa úplne stratia. Na druhej strane pri

metóde prichytávania plôch na polygonálnu sieť sa model viac prispôsobuje skutočným naskenovaným dátam, čím zachytáva drobné odchýlky a nerovnosti povrchu. Na modeli vznikajú menšie odchýlky voči naskenovaným dátam, no geometrická pravidelnosť nemusí byť úplne zachovaná. Ak by bolo potrebné vytvoriť plochy, ktoré by kopírovali tvar čelnej valcovej frézy musela by sa použiť funkcia nabalená plocha, ktorá je riadená U a V bodmi. Vtedy by sa odchýlky vytvorenej plochy k polygonálnej sieti blížili k nule a farebná mapa odchýlok by bola v odtieňoch zelenej farby.



Obr. 9.38. Porovnanie vytvoreného základného tela čelnej valcovej frézy s 3D digitalizovaným modelom vyrobeným aditívnou technológiou SLA

a – rekonštrukcia použitím rezu a premodelovania, výsledná farebná mapa odchýlok v mm,

b – rekonštrukcia použitím prichytených plôch, výsledná farebná mapa odchýlok v mm

Záver

Pri aplikácii reverzného geometrického modelovania na rekonštrukciu súčiastok vyrobených aditívnymi technológiami SLA a FDM je kľúčové zvoliť adekvátnu metódu získavania dát, ktorá reflektuje požiadavky na presnosť a účel digitálneho modelu. Pre väčšinu prípadov, kde je cieľom rekonštruovať presný vonkajší tvar súčiastky, predstavuje optické 3D skenovanie najefektívnejšie riešenie. Táto metóda umožňuje rýchle a presné zachytenie povrchových detailov bez zbytočnej generácie nadbytočných dát, čím optimalizuje celý proces digitalizácie a následnej spracovateľskej fázy.

Použitie priemyselnej počítačovej tomografie (iCT) je vhodné v prípadoch, kde je potrebné detailne zmapovať vnútornú geometriu a topológiu dielu, napr. pri analýze dutín, prasklín či materiálových defektov, ktoré nie sú opticky viditeľné. V kontexte aditívnej

výroby však použitie iCT pri dieloch z FDM technológie prináša špecifické nevýhody. FDM súčiastky často obsahujú vnútornú výplň (infill), ktorá predstavuje geometriu s nízkou hustotou materiálu určenú na zníženie hmotnosti a spotreby materiálu. Pri snímaní iCT sa zachytáva celý objem dielu vrátane tejto výplne, čo vedie k enormnému objemu dát, ktoré sú na účely reverzného modelovania nepotrebné. Tieto dáta potom vyžadujú časovo a výpočtovo náročnú redukciu a filtrovanie, čo spomaľuje a komplikuje celý proces rekonštrukcie. Naopak diely vyrobené technológiou SLA sú zvyčajne plné, bez vnútorných výplní a preto pri ich digitalizácii pomocou iCT nevzniká problém s nadmerným množstvom nepotrebných objemových dát. To umožňuje efektívnejšie využitie iCT na detailnú analýzu vnútorných štruktúr, prípadných defektov či iných anomálií, ktoré môžu ovplyvniť kvalitu a funkčnosť súčiastky.

Z uvedeného dôvodu sa v praxi odporúča primárne využiť optické 3D skenovanie na digitalizáciu vonkajšieho tvaru pre väčšinu aplikácií reverzného geometrického modelovania. Technológia iCT sa odporúča použiť selektívne v prípadoch, kedy je nevyhnutné získať informácie o vnútorných geometriách alebo materiálových anomáliách, pričom u SLA dielov predstavuje táto metóda výhodu vďaka absencii vnútorných výplní. Takýto prístup prináša optimalizáciu pracovného procesu, znižuje náklady a zároveň zabezpečuje vysokú kvalitu rekonštruovaných modelov, čo je nevyhnutné na úspešnú aplikáciu reverzného geometrického modelovania v strojárskych praxi, najmä pri súčiastkach vyrábaných nielen aditívnymi technológiami SLA a FDM.

Zoznam bibliografických odkazov

ANWER, N. and MATHIEU, L. 2016. From reverse engineering to shape engineering in mechanical design. In *CIRP Annals*. Elsevier, 65(1), pp. 165–168. ISSN 1726-0604. [online] [cit. 2025-11-20] Dostupné na internete: <https://hal.science/hal-01363747v1/file/RESEVer17.pdf>.

BÉNIÈRE, R., SUBSOL, G., GESQUIÈRE, G., LE BRETON, F. and PUECH, W. 2013. *A comprehensive process of reverse engineering from 3D meshes to CAD models*, *Computer-Aided Design*, 45(11), pp. 1382–1393. ISSN 0010-4485 [online] [cit. 2025-01-12] Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448513001012>.

BHATTI, A., SYED, N. A. and JOHN, P. 2018. *Reverse engineering and its applications, Omics Technologies and Bio-engineering: Towards Improving Quality of Life*. Elsevier Inc. ISBN 9780128046593. [online] [cit. 2025-01-12] Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128046593000051>.

DUBNIČKA, M., BURANSKÝ, I. and KRITIKOS, M. 2025. *A comparative analysis of the digitization of geometric objects fabricated via additive fdm technology within the framework of reverse geometric modelling applications*. *MM Science Journal* 2025(1), pp.8211-8216. ISSN 1805-0476. [online] [cit. 2024-11-16] Dostupné na internete: <https://www.mmscience.eu/journal/issues/march-2025/articles/a-comparative-analysis-of-the-digitization-of-geometric-objects-fabricated-via-additive-fdm-technology-within-the-framework-of-reverse-geometric-modelling-applications>.

GAUTHIER, S., PUECHA, W., R. BÉNIÈRE, R. and SUBSOLET, G. 2017. *Analysis of digitized 3D mesh curvature histograms for reverse engineering*, *Computers in Industry*, 92–93, pp. 67–83. ISSN 0166-3615. [online] [cit. 2025-01-12] Dostupné na internete: <https://hal.science/hal-01575669>.

CHIA, H. N., and WU, B. M. 2015. Recent advances in 3D printing of biomaterials. *Journal of Biological Engineering*, 9(1), 1–14. ISSN 1754-1611. [online] [cit. 2024-11-16] Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1186/s13036-015-0001-4>.

KATHENG, A., PRAWATVATCHARA, W., CHAIAMORNSUP, P., SORNSUWAN, T., LEKATANA, H. and PALASUK, J. 2025. Comparison of mechanical properties of different 3D printing technologies. *Sci Rep* 15, 18998. ISSN 1309-100X. [online] [cit. 2025-09-29] Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-03632-1>.

KAUTILYA S. P., DHAVAL B. S., SHASHIKANT J. J., ALDAWOOD, F. K. and KCHAOU, M. 2024. Effect of process parameters on the mechanical performance of FDM printed carbon fiber reinforced PETG. In *Journal of Materials Research and Technology*, V. 30, 2024, pp. 8006-8018, ISSN 2238-7854. [online] [cit. 2025-01-12] Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785424012249?via%3Dihub>.

KJELLANDER, J. A. P. and RAHAYEM, M. 2009. An Integrated Platform for 3D Measurement with Geometric Reverse Engineering, In: *Computer-Aided Design and Applications*. Taylor & Francis, 6(6), pp. 877–887. ISSN1686-4360 [online] [cit. 2025-11-20] Dostupné na internete: [https://www.cad-journal.net/files/vol_6/CAD_6\(6\)_2009_877-887.pdf](https://www.cad-journal.net/files/vol_6/CAD_6(6)_2009_877-887.pdf).

KOVÁCS, I., VÁRADY, T. and SALVI, P. 2015. *Applying geometric constraints for perfecting CAD models in reverse engineering*, *Graphical Models*, 82, pp. 44–57 ISSN 1524-0703. [online] [cit. 2025-03-26] Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1524070315000211>.

MOROVIČ, L. 2013. Návrh, obrábanie, meranie a skenovanie tvarovo zložitých plôch [Habilitačná práca]. Trnava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta v Trnave, Ústav výrobných technológií. 133 s. (s prílohami 172 s.).

PHAM, D. T. and HIEU, L. C. 2008. Reverse Engineering–Hardware and Software, In *Reverse Engineering*. London: Springer London, pp. 33–70. doi: 10.1007/978-1-84628-856-2_3. ISBN 978-1-84628-856-2. [online] [cit. 2025-01-12] Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/publication/226348635_Reverse_Engineering-Hardware_and_Software.

RAJA, V. and FERNANDES, K. J. 2008. *Reverse Engineering*. Springer London (Series in Advanced Manufacturing). ISSN 1860-5168, ISBN 978-1-84628. [online] [cit. 2025-03-26] Dostupné na internete: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-84628-856-2>.

RANKOUHI, B., JAVADPOUR, S., DELFANIAN, F., and LETCHER, T. 2016. *Failure analysis and mechanical characterization of 3D printed ABS with respect to layer thickness and orientation*. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 16(3), 467–481. ISSN 1547-7029. [online] [cit. 2025-03-26] Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1007/s11668-016-0113-2>.

SOOD, A. K., OHDAR, R. K., and MAHAPATRA, S. S. (2010) *Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts*. *Materials & Design*, 31(1), 287–295. ISSN 0261-3069. [online] [cit. 2024-11-16] Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.06.016>.

TertaVision. 2020. REVERSE ENGINEERING SERVICE - DIFFERENT APPROACHES FOR MODELING. [online] [cit. 2020-02-20] Dostupné na internete: <https://www.tetravision.be/services/reverse-engineering/#geometric-modeling>.

VDI 3405. 2014. Additive Fertigungsverfahren Grundlagen, Begriffe, VCFahrensbeschreibungen – Additive manufacturing processes, rapid manufacturing. Basic, definitions, processes. pp. 40. [online] [cit. 2025-11-20] Dostupné na internete: https://www.vdi.de/fileadmin/pages/vdi_de/redakteure/richtlinien/inhaltsverzeichnisse/2244181.pdf.

VDI 5620. 2017. Reverse engineering of geometrical data. VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung. pp. 60. [online] [cit. 2024-11-20] Dostupné na internete: https://www.vdi.de/fileadmin/pages/vdi_de/redakteure/richtlinien/inhaltsverzeichnisse/2575959.pdf.

Pod'akovanie

Tento príspevok vznikol v rámci projektu: *Implementácia inovatívnych foriem učenia a praktického tréningu do vzdelávania v oblasti výrobných technológií a výrobného manažmentu s cieľom zvýšiť atraktivnosť štúdia a podporiť rozvoj prierezových kompetencií absolventov* (026STU-4/2023), s podporou agentúry KEGA MŠVVaŠ SR.

doc Ing. Jana Šugárová PhD., Ing. Richard Antala, PhD., doc. Ing. Jozef Bílik PhD.
doc. Ing. Ivan Buranský, PhD., Ing. Maroš Dubnička, Ing. Alexander Gula
Ing. Michal Herda, Ing. Sarah Jurčová, Ing. Natália Kaderábeková
Ing. Erika Kosztolánszka, Ing. Barbora Ludrovcová, PhD., Ing. Jana Mesárošová, PhD.,
doc. Ing. Ladislav Morovič, PhD., Ing. Martin Sahul, PhD., doc. Ing. Jana Samáková, PhD.,
prof. Ing. Peter Šugár, CSc.

VÝROBNÉ TECHNOLOGIE A VÝROBNÝ MANAŽMENT – ZBORNÍK PRÍPADOVÝCH ŠTÚDIÍ

Vydala Slovenská technická univerzita v Bratislave vo Vydavateľstve SPEKTRUM STU,
Bratislava, Vazovova 5, v roku 2025.

Edícia zborníkov

Rozsah 305 strán, 231 obrázkov, 48 tabuliek, 24,87 AH, 25,18 VH, 1. vydanie,
edičné číslo 6254, tlač ForPress NITRIANSKE TLAČIARNE, s. r. o.

85 – 237 – 2025

ISBN 978-80-227-5545-0
DOI: 10.61544/YOWW2700