PROBLÉMOVO ORIENTOVANÉ ÚLOHY Z OBLASTI OBRÁBANIA, TVÁRNENIA, ZVÁRANIA A RIADENIA PODNIKOVÝCH PROCESOV

Peter Šugár a kol.

EDÍCIA VEDECKÝCH MONOGRAFIÍ

STU MTF
SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
MATERIÁLOVOTECHNOLOGICKÁ FAKULTA SO SÍDLOM V TRNAVE

SPEKTRUM STU

PROBLÉMOVO ORIENTOVANÉ ÚLOHY Z OBLASTI OBRÁBANIA, TVÁRNENIA, ZVÁRANIA A RIADENIA PODNIKOVÝCH PROCESOV

PROBLÉMOVO ORIENTOVANÉ ÚLOHY Z OBLASTI OBRÁBANIA, TVÁRNENIA, ZVÁRANIA A RIADENIA PODNIKOVÝCH PROCESOV

Peter Šugár a kol.

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
2021

Výstup riešenia
grantovej úlohy KEGA 022STU-4/2019 s názvom
„Zvyšovanie profesijných kompetencií absolventov univerzitného vzdelávania v odbore Výrobné technológie implementovaním prvkov duálneho vzdelávania“

Všetky práva vyhradené. Nijaká časť textu nesmie byť použitá na ďalšie šírenie akoukoľvek formou bez predchádzajúceho súhlasu autorov alebo vydavateľstva.

© prof. Ing. Peter Šugár, CSc., doc. Ing. Dagmar Babčanová, PhD.
doc. Ing. Jozef Bílik, PhD., doc. Ing. Henrieta Hrablik Chovanová, PhD.
Ing. Lukáš Jurík, PhD., Ing. Michaela Kritikos, PhD.
Ing. Marcel Kuruc, PhD., Ing. Barbora Ludrovcová
Ing. Ján Petrovič, PhD., Ing. Simona Rašková
Ing. Marek Šmida, doc. Ing. Jana Šugárová, PhD.
Ing. Lukáš Zahnaš, Ing. Patrik Žilínek

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

Editoval: doc. Ing. Jana Šugárová, PhD.

Schválila Vedecká rada Materiálovotechnologickej fakulty STU v Bratislave.

ISBN 978-80-227-5134-6

OBSAH

PREDSLOV 11

1 NÁVRH VÝROBY HRIADEĽA PRIEČNYM KLINOVÝM VALCOVANÍM A ZÁPUSTKOVÝM KOVANÍM 13

Bílik, J., Ludrovcová, B..

Úvod 15

1.1 Výroba hriadeľa priečnym klinovým valcovaním 16

1.1.1 Návrh polotovaru pre priečne klinové valcovanie 16

1.1.2 Postup výroby hriadeľa priečnym klinovým valcovaním 18

1.1.3 Kontrola hriadeľa z pohľadu vnútorných chýb 19

1.1.4 Kontrola mechanických vlastností 21

1.1.5 Určenie veľkosti pretvorenia 23

1.2 Výroba hriadeľa zápustkovým kovaním 24

1.2.1 Návrh polotovaru na kovanie v otvorenej zápustke 24

1.2.2 Postup výroby hriadeľa zápustkovým kovaním 25

1.2.3 Výpočet sily na kovanie a návrh výrobného zariadenia 25

1.2.4 Výpočet ostrihovacej sily a návrh výrobného zariadenia 27

Záver 27

Zoznam bibliografických odkazov 28

2 ZVYŠOVANIE ŽIVOTNOSTI ZÁPUSTIEK 29

Bílik, J.

Úvod 31

2.1 Príčiny vyradenia zápustiek z prevádzky 31

2.2 Základné faktory ovplyvňujúce životnosť zápustiek 32

2.3 Mechanické spevňovanie povrchovej vrstvy 33

2.4 Nitridácia 38

2.5 Boridovanie 43

2.5.1 Proces boridovania 43

2.5.2 Experimentálne skúšky 44

Záver 46

Zoznam bibliografických odkazov 47

3 OPTIMALIZÁCIA VÝROBY VÝTVARKU TECHNOLÓGIOU CNC KONVENČNÉHO TLAČENIA 49

Šugárová, J., Šugár, P., Petrovič, J.

Úvod 51

3.1 Technológia tlačenia 51
3.2 Voľba polotovaru 52
3.3 Návrh modelu a tlačného nástroja 54
3.4 Návrh procesu tlačenia 56
3.5 Hodnotenie výtvarkov 60
3.6 Optimalizácia procesu tlačenia 65
3.6.1 Hodnotenie hrúbky steny výtvarku 65
3.6.2 Hodnotenie výšky steny výtvarku 66
3.6.3 Hodnotenie uhla odpruženia steny výtvarku 66
3.6.4 Hodnotenie mikrotvrdosti steny výtvarku 67
3.6.5 Hodnotenie drsnosti steny výtvarku 68
3.6.6 Celkové hodnotenie výtvarkov 69
Záver 70
Zoznam bibliografických odkazov 71

4 POSTUP VÝROBY LOGA LASEROVÝM OBRÁBANÍM 73
Šugár, P., Ludrovcová, B.
Úvod 75
4.1 Laserový zväzok 75
4.2 Obrábanie laserovým zväzkom 76
4.3 Parametre laserového obrábania 77
4.4 Laserové obrábanie – značenie 80
4.4.1 Grafický návrh 81
4.4.2 Import grafického návrhu do softvéru LpsWin 82
4.4.3 Nastavenie nulového bodu obrobku a voľba parametrov procesu 84
4.5 Generovanie riadiaceho programu a výroba súčiastky 87
Záver 89
Zoznam bibliografických odkazov 90

5 ANALÝZA VARIANTNÝCH SPÔSOBOV ULTRAZVUKOVÉHO OBRÁBANIA SiO_2 TYČE S PROFILOM MNOHOUHOLNÍKA 91
Kuruc, M.
Úvod 93
5.1 Charakteristika obrobku 93
5.2 Technológia rotačného ultrazvukového obrábania 94
5.3 Návrh výrobných variantov 95
5.3.1 Postup výroby – prvý variant 97

5.3.2 Postup výroby – druhý variant 99
5.4 Parametre obrábania 103
5.5 Výsledky merania rozmerových odchýlok 104
Záver 106
Zoznam bibliografických odkazov 107

6 CNC SÚSTRUŽENIE V SCHAEFFLER SKALICA 109
Šmida, M.
Úvod 111
6.1 Zákaznícky dopyt 111
6.2 Výrobný postup – zohľadnenie presnosti a veľkosti výrobnej dávky 112
6.3 Výber materiálu 113
6.3.1 Voľba polotovaru 114
6.4 Kalkulácia výrobných nákladov 117
6.5 Správa náradia 117
6.6 Tvorba NC programu 121
6.6.1 Databáza nástrojov 122
6.6.2 Databáza NC programov a DNC 124
6.6.3 Programovanie 125
6.7 Overenie vo výrobe 128
6.8 Optimalizácia procesu obrábania 128
6.8.1 Optimalizácia pomocou softvéru PMTWS 129
6.8.2 Zmena rezného náradia 129
Záver 130
Zoznam bibliografických odkazov 130

7 NÁVRH VÝROBY DIŠTANČNÉHO KRÚŽKU NA OHÝBACOM – ZVÁRACOM AUTOMATE 133
Zahnaš, L.
Úvod 135
7.1 Voľba vhodnej technológie výroby 136
7.1.1 Sústruženie 136
7.1.2 Zváranie 136
7.1.2.1 Odporové zváranie 137
7.2 Postup výroby súčiastky a voľba vhodných nástrojov 142
7.2.1 Profilovacie nástroje 143
7.2.2 Strižné nástroje 144
7.2.3 Ohýbacie nástroje 144

7.2.4 Zváracie náradie 145
7.2.4.1 Voľba zváracích parametrov 146
7.3 Kvalita zvaru 147
7.3.1 Skúška lomu 151
7.3.2 Skúška pevnosti zvaru 152
7.3.3 Skúška dynamického namáhania 153
7.4 Ekonomické zhodnotenie výroby 153
Záver 154
Zoznam bibliografických odkazov 154

8 PREPOJENIE KONŠTRUKCIE A METROLÓGIE V PRAXI (MERANIE NA SÚRADNICOVÝCH MERACÍCH STROJOCH) 157
Kritikos, M.
Úvod 159
8.1 Základne pre geometrické tolerancie 159
8.2 Geometrické tolerovanie 161
8.2.1 Tolerancie tvaru 162
8.2.2 Tolerancie profilu 164
8.2.3 Tolerancie orientácie 165
8.2.4 Tolerancie polohy 167
8.2.5 Tolerancie hádzania 168
8.3 Metódy vyhodnotenia geometrických prvkov 169
8.3.1 Metódy vyhodnotenia kružnice (valca) 169
8.3.2 Metódy vyhodnotenia priamky 171
8.3.3 Metódy vyhodnotenia roviny 171
8.4 Filtrácia a eliminácia odľahlých hodnôt 172
8.4.1 Filtrácia 172
8.4.2 Eliminácia odľahlých hodnôt 173
8.4.3 Vplyv filtrácie a eliminácie odľahlých hodnôt na výsledok 174
8.5 Odporúčania 178
Záver 179
Zoznam bibliografických odkazov 180

9 NÁVRH MTM OPTIMALIZÁCIE MONTÁŽNEJ LINKY 181
Žilínek, P.
Úvod 183
9.1 Základy metodiky MTM 183
9.1.1 Základný pohybový cyklus 185

9.1.2 Dátová karta 185
9.1.3 MTM analýza, workbook 188
9.1.4 Princíp MTM kódovania 189
9.1.5 Princípy optimalizácie 189
9.2 Opis produktu 194
9.3 Opis pracoviska 194
9.4 Optimalizácia práce podľa MTM 195
9.4.1 Optimalizácia montážnej linky 196
9.5 Optimalizácia obslužnosti 199
9.6 Optimalizácia a ergonómia 202
9.6.1 Ergonomické hodnotenie pracoviska 203
9.6.2 Karpálne tunely 204
Záver 204
Zoznam bibliografických odkazov 205

10 APLIKÁCIA METÓDY SMED PRI PRETYPOVANÍ STROJNÉHO ZARIADENIA 207
Jurík, L., Rašková, S., Babčanová, D., Hrablik-Chovanová, H.
Úvod 209
10.1 Pretypovanie strojného zariadenia 209
10.1.1 Štíhla výroba 210
10.1.2 Plytvanie vo výrobe 211
10.1.3 Pretypovanie strojného zariadenia 212
10.2 Charakteristika metódy SMED 213
10.3 Aplikácia metódy SMED pri pretypovaní vstrekovacieho lisu 216
10.3.1 Zhodnotenie návrhov procesu pretypovania vstrekovacieho lisu 231
Záver 233
Zoznam bibliografických odkazov 235

PREDSLOV

Významným inovatívnym prvkom v oblasti prípravy odborníkov pre súčasnú technickú prax je orientácia na rozvoj tvorivého potenciálu, ktorá má nahradiť pôvodne preferované získavanie veľkého objemu poznatkov a ich reprodukciu. Poznanie, že na osvojenie si poznatkov z oblasti strojárskych výrobných procesov je nevyhnutná symbióza tzv. videnej skúsenosti so skúsenosťou získanou praktickou činnosťou potvrdzuje, že nutnou podmienkou dosiahnutia pozitívnych výsledkov vo vzdelávacom procese je existencia zmysluplnej miery didaktického prepojenia tradičných pedagogických prístupov s metódami tvorivého riešenia zadaných praktických úloh. Ide o skúsenostné učenie sa (experiential learning), kde edukácia nie je založená na prenose a osvojovaní si „hotových poznatkov", ale namiesto toho sa uprednostňuje učenie sa riešením problémov, tzv. heuristické vyučovanie. Proces učenia sa je v tomto prípade stimulovaný riešením problémových situácií, kde to, čo sa má edukant naučiť, nie je vopred dané, ale je postupne získavané formou riadeného objavovania (guided discovery learning).

V snahe reagovať na vyššie uvedené skutočnosti bol v rokoch 2019 až 2021 na Ústave výrobných technológií MTF STU v Trnave riešený projekt KEGA s názvom *Zvyšovanie profesijných kompetencií absolventov univerzitného vzdelávania v odbore Výrobné technológie implementovaním prvkov duálneho vzdelávania*. Jeho primárnym cieľom bola koncepčná, metodická a obsahová inovácia existujúcich foriem vzdelávania, eliminujúca nevýhody doterajších vzdelávacích postupov, charakterizovaných nízkym stupňom prepojenia teoretického a praktického poznávania.

Jedným z výstupov projektu je predkladaná publikácia, ktorá prináša 10 príkladov problémovo orientovaných úloh z oblasti obrábania, tvárnenia, zvárania a riadenia podnikových procesov vo forme prípadových štúdií, ktoré vznikli v úzkej symbióze autorov zastupujúcich nielen oblasť akademického výskumu a vzdelávania, ale predovšetkým oblasť priemyselnej praxe. Predkladaná 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, *Návrh výroby hriadeľa priečnym klinovým valcovaním a zápustkovým kovaním* a *Zvyšovanie životnosti zápustiek*, publikácia prináša pohľad na riešenie vybraných problémov z oblasti výroby výkovkov v podmienkach firmy HKS Forge, spol. s r. o., Trnava.

Príklad riešenia optimalizácie technologických podmienok výroby tenkostenných rotačných súčiastok technológiou inkrementálneho tvárnenia vo firme Eiben, spol. s r. o, Vlkanová je obsahom kapitoly nazvanej *Optimalizácia výroby výtvarku technológiou CNC konvenčného tlačenia.*

Problematike progresívnych výrobných technológií sú venované kapitoly 4 a 5, kde prvá z nich, s názvom *Postup výroby loga laserovým obrábaním*, na príklade návrhu postupu výroby loga laserovým značením, vysvetľuje základné charakteristiky technológie laserového obrábania a postupy technickej prípravy tohto procesu na CNC laserovom obrábacom centre a druhá, s názvom *Analýza rôznych prístupov v obrábaní mnohouholníkovej tyče z* SiO_2, analyzuje možnosti obrábania optických vlákien technológiou rotačného ultrazvukového obrábania.

Vybranými technologickými problémami z portfólia výrobného programu firmy Schaeffler, spol. s r. o., Skalica sa zaoberajú kapitoly 6 a 7 s názvami *CNC sústruženie v Schaeffler Skalica* a *Návrh výroby dištančného krúžku na ohýbacom zváracom automate*.

Význam potreby implementácie požiadaviek metrológie do konštrukčného návrhu strojovej súčiastky zdôrazňuje kapitola 8 s názvom *Prepojenie konštrukcie a metrológie v praxi (meranie na súradnicových meracích strojoch).*

Oblasť riadenia podnikových procesov zastupujú kapitoly 9 a 10, *Návrh MTM optimalizácie montážnej linky* a *Aplikácie metódy SMED pri pretypovaní strojného zariadenia*.

Záverom si dovoľujem vysloviť presvedčenie, že publikácia v tejto forme bude cenným nástrojom, rozširujúcim možnosti vzdelávania v oblasti strojárskych výrobných technológií a priemyselného manažérstva na Materiálovotechnologickej fakulte STU v Trnave, prípadne na iných, technologicky orientovaných fakultách na Slovensku a v Českej republike.

Všetkým, ktorí stáli pri jej zrode si dovoľujem vysloviť poďakovanie. Zvlášť chcem poďakovať za spoluprácu a podporu zo strany priemyselných partnerov a to menovite firiem Schaeffler Skalica, spol. s r. o., Eiben, spol. s r. o., Vlkanová, HKS Forge, spol. s r. o., Trnava a Novares Slovakia Automotive, spol. s r. o., Zavar. Poďakovanie patrí tiež recenzentom, ktorých cenné rady a pripomienky k obsahovej i formálnej stránke spracovania publikácie prispeli k dotvoreniu jej konečnej podoby.

Trnava, január 2021 Peter Šugár

1 NÁVRH VÝROBY HRIADEĽA PRIEČNYM KLINOVÝM VALCOVANÍM A ZÁPUSTKOVÝM KOVANÍM

BÍLIK, J. – LUDROVCOVÁ, B.

Úvod

Technológia tvárnenia priečnym klinovým valcovaním (PKV) patrí v súčasnosti medzi progresívne metódy tvárnenia materiálov. Výhodou technológie je zníženie spotreby materiálu a skrátenie výrobných časov, a teda vysoká produktivita výroby.

V porovnaní s inými výrobnými technológiami (obrábanie, kovanie), sa priečne klinové valcovanie vyznačuje viacerými výhodami, ako sú (Pater, 2014):

- Vysoká produktivita – počas jedného pracovného cyklu (rotácia valcov alebo posun plochých klinov) je vyrobený minimálne jeden produkt. Frekvencia otáčania valcov pri PKV sa pohybuje v rozmedzí 10 *až* 30 min^{-1}, pričom výkonnosť procesu je v rozsahu 10 *až* 30 kusov za minútu. Teda možno konštatovať, že proces PKV je 5 *až* 20-krát výkonnejší ako kovanie, či obrábanie.
- Lepšie využitie materiálu – materiálové straty, vznikajúce v procese PKV, nepresahujú zvyčajne 10 %. Oproti tomu materiálové straty pri kovaní sú približne (15 *až* 30) %, zatiaľ čo pri obrábaní môžu dokonca nadobudnúť hodnotu až 40 %.
- Zlepšenie pevnostných charakteristík materiálu – pri PKV sa tvar výrobku získa ako výsledok plastického pretvorenia materiálu, kde sú typické neporušené vlákna, koncentrujúce sa na povrchu výrobku, čo sa prejavuje zlepšením pevnostných vlastností vývalkov v porovnaní so súčiastkami vyrobených obrábaním.
- Šetrnosť k životnému prostrediu – v porovnaní so zápustkovým kovaním sa proces PKV vyznačuje výrazne nižšou produkciou emisií a aj nižšou úrovňou hluku. Navyše proces nevyžaduje aplikáciu ďalších procesných látok, ako sú chladiace, alebo mazacie látky.
- Nižšia spotreba energie – v procese PKV je polotovar vo forme odrezkov z kruhových tyčí, ktoré sú priebežne privádzané do pracovného prostredia, medzi tvárniace valce, t. j. nie sú potrebné žiadne ďalšie prípravné operácie pred valcovaním polotovaru metódou PKV.
- Zavádzanie automatizácie a nízke výrobné náklady – pri PKV je finálny produkt vyrobený v rámci jednej operácie, čo umožňuje podnikom znížiť počet ľudí a výrobných zariadení, a tým aj veľkosť výrobnej plochy, potrebných na zabezpečenie výrobného procesu.
- Vysoká životnosť nástrojov (valcovacích segmentov) – PKV sa vyrábajú polotovary, ktoré sú najčastejšie následne spracovávané zápustkovým kovaním, obrábaním, prípadne sú ako hotový výrobok. Kombináciou týchto metód sa vyrábajú napríklad stupňovité hriadele, alebo ojnice.
- Uplatnenie v automobilovom priemysle – komponenty, vyrábané PKV, do svojich automobilov aplikuje Ford Motor Company (napr. ojnice alebo kľukové hriadele).

Proces PKV, napr. pri výrobe osadeného hriadeľa, v dôsledku stavu napätosti vytvoreného pôsobením segmentov v tvare klina, upevnených na valcoch za určitých podmienok, je sprevádzaný vznikom tzv. Mannesmannovho efektu v osi valca, čo má za následok vznik vnútorných chýb. Vzhľadom na pôsobenie striedavých ťahových a tlakových napätí dochádza k nehomogénnej deformácii materiálu, z ktorej sa môžu vyvinúť dutiny v stredovej časti valcovaného materiálu. So zvýšením frekvencie otáčania valcov sa mení rýchlosť deformácie materiálu, pretvorenie je väčšie a narastá aj šmykové napätie. Ak

veľkosť šmykového napätia prekročí hodnotu medze klzu valcovaného materiálu, vytvorí sa vnútorná dutina. (Li a kol., 2002) Preto je potrebné riešiť aj kontrolu hriadeľov pri ich výrobe priečnym klinovým valcovaním, aplikáciou nedeštruktívnych metód merania.

Prípadová štúdia opisuje návrh výroby, vo firme HKS Forge, spol. s r. o., Trnava, viacnásobne osadeného hriadeľa, a to dvoma postupmi: priečnym klinovým valcovaním a kovaním v otvorenej zápustke ako náhradnou technológiou v prípade vzniku poruchy valcovačky, resp. poškodenia valcovacích segmentov, nakoľko vyrábaný produkt bol určený pre automobilový priemysel.

1.1 Výroba hriadeľa priečnym klinovým valcovaním

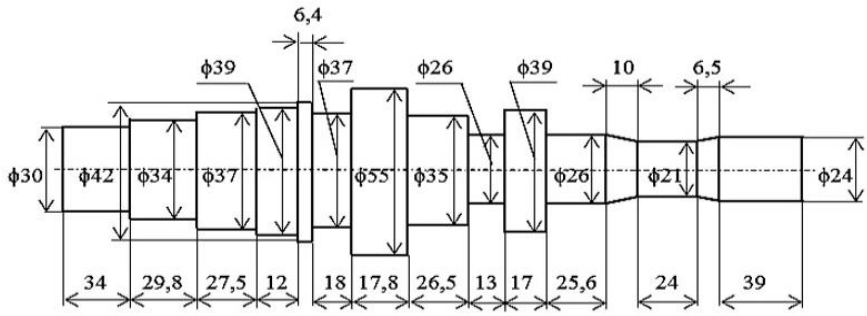
Priečne klinové valcovanie medzi dvoma valcami so upevnenými segmentami v tvare klinov s definovanou geometriou je technológia využívaná na prípravu predkovkov na zápustkové kovanie výkovkov s pozdĺžnou osou. Je však vhodná aj na výrobu hotových výtvarkov tvárnením za tepla v tvare rôznych osadených hriadeľov. Preto bola aplikovaná aj na výrobu daného viacnásobne osadeného hriadeľa.

1.1.1 Návrh polotovaru pre priečne klinové valcovanie

Na Obr. 1.1 je osadený hriadeľ, výroba ktorého bola navrhnutá použitím technológie PKV najmä z dôvodu zníženia výrobných nákladov. Materiál hriadeľa: 16MnCr5 (STN 41 4220, 1.7131) – je to nízko legovaná ušľachtilá konštrukčná mangán-chrómová oceľ s pevnosťou v ťahu (500 *až* 700) MPa. Na Obr. 1.2 sú uvedené rozmery hriadeľa, ktoré boli východiskom pri návrhu tvaru a rozmerov polotovaru pre PKV. Prechodové polomery medzi jednotlivými priemermi sú R5.

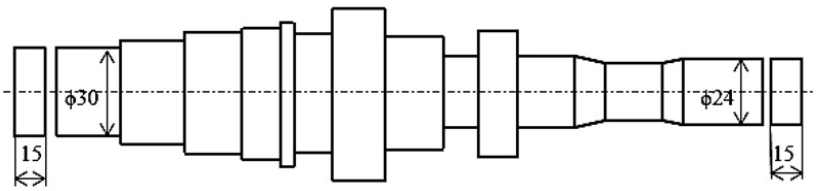
Obr. 1.1. Osadený hriadeľ

Na základe objemu hriadeľa ($V_{hriadeľ}$ = 266 166,2 mm^3) a z definovaného priemeru polotovaru (d_0), ktorý zodpovedá najväčšiemu priemeru na hriadeli (Obr. 1.2) (d_{max} = 55 mm), aplikáciou zákona konštantnosti objemu, základná dĺžka polotovaru (l_0) bez prídavku na odstrihnutie koncov po valcovaní je 112,1 mm. Prídavok na odstrihnutie koncov je 7,4 mm, z čoho vyplýva, že dĺžka polotovaru bez uvažovania prídavku na opal je 119,5 mm.

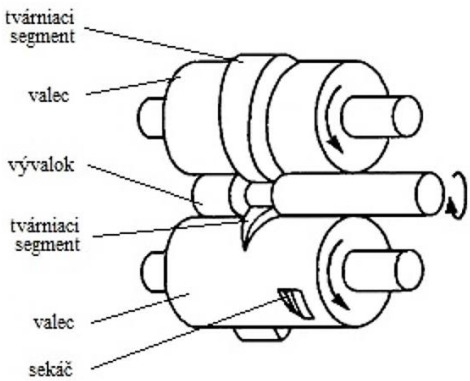


Obr. 1.2. Rozmery hriadeľa po valcovaní

Na Obr. 1.3 sú znázornené konce vývalku (15 mm na tenšom a aj hrubšom konci), ktoré sa odstrihnú pomocou výstupkov na segmente v tvare strižných hrán, ktorý je upevnený na valci (Obr. 1.4).



Obr. 1.3. Odstrihované konce vývalku



Obr. 1.4. Princíp priečneho klinového valcovania (Šugár, 2009)

Objem odstrihovaných koncov po vyvalcovaní (V_{ok}) je 17 379,9 mm^3.
Prídavok na opal: 2 % z objemu vývalku (objem hriadeľa a koncov na odstrihnutie).

$$V_{opal} = 0{,}02 \cdot (266\,166{,}2 + 17\,379{,}9) = 5\,670{,}9 \text{ mm}^3$$

Celkový objem polotovaru $V_{polotovar}$:

$$V_{polotovar} = V_{hriadeľ} + V_{opal} = 266\,166{,}2 + 17\,379{,}9 + 5\,670{,}9 = 289\,217\ \mathrm{mm}^3$$

Hmotnosť polotovaru: 2,25 kg.

Konečné rozmery polotovaru : ø 55 × 122 mm.

1.1.2 Postup výroby hriadeľa priečnym klinovým valcovaním

Rámcový technologický postup výroby hriadeľa PKV pozostáva z týchto operácií:

1. Príprava polotovaru rezaním na kotúčovej píle.
2. Indukčný ohrev polotovaru na hornú tvárniacu teplotu.
3. Priečne klinové valcovanie.
4. Kontrola rozmerov vývalku.
5. Tepelné spracovanie vývalku – normalizačné žíhanie.
6. Čistenie vývalku otryskávaním.
7. Kontrola vnútorných chýb pomocou ultrazvuku.
8. Konečná kontrola vývalku.

Ohrev polotovaru na hornú tvárniacu teplotu pred valcovaním bol realizovaný pomocou indukčného ohrievacieho zariadenia, ktoré je súčasťou pracoviska na PKV. Samotné PKV bolo realizované na valcovačke UL 45 A (fa Šmeral), uvedenej na Obr. 1.5a. Nástroje (segmenty) v tvare klina, upevnené na valce pomocou skrutiek sú znázornené na Obr. 1.5b.

a b

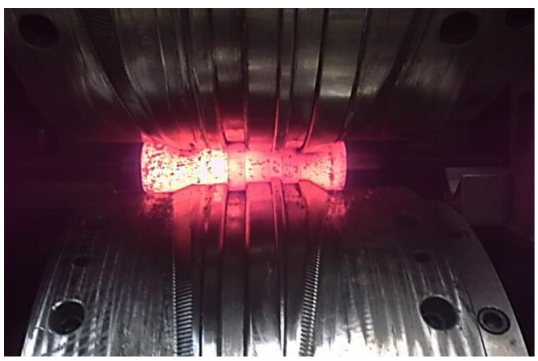
Obr. 1.5. Valcovačka UL 45 A na priečne klinové valcovanie (Ludrovcová, 2017)
a – celkový pohľad na valcovačku,
b – pohľad na valce s pripevnenými segmentmi na valcovanie hriadeľa

Pri valcovaní jednotlivých hriadeľov sa menili podmienky valcovania, ako je to uvedené v Tab. 1.1, potom sa jednotlivé hriadele analyzovali tomografom a ťahovou skúškou.

Tabuľka 1.1. Parametre experimentálneho valcovania

Hriadeľ	***Nastavená teplota ohrevu*** (°C)	***Nameraná teplota valcovania*** (°C)	***Čas valcovania*** (s)	***Krútiaci moment*** (N.m)
1	1 180 ± 20	1 175	5,55	95
2	1 230 ± 30	1 258	5,45	90
3	1 280 ± 20	1 300	5,56	80
4	1 230 ± 30	1 260	5,46	95
5	1 280 ± 20	1 265	5,78	100
6	1 230 ± 30	1 252	5,68	85

Na Obr. 1.6 je pohľad na valcovanie hriadeľa, kde jednotlivé časti tvarového segmentu počas otáčania valca postupne vnikajú do ohriateho materiálu a redukujú prierez na požadovaný rozmer. Valcovací segment je na dĺžke približne ¾ obvodu valca. Priemer tvárniacich valcov je 600 mm.



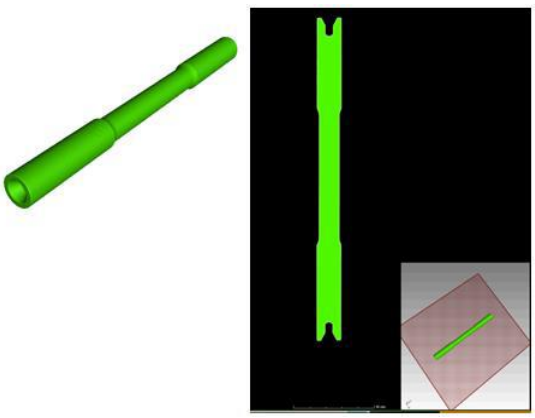
Obr. 1.6. Výroba hriadeľa priečnym klinovým valcovaním (Ludrovcová, 2017)

1.1.3 Kontrola hriadeľa z pohľadu vnútorných chýb

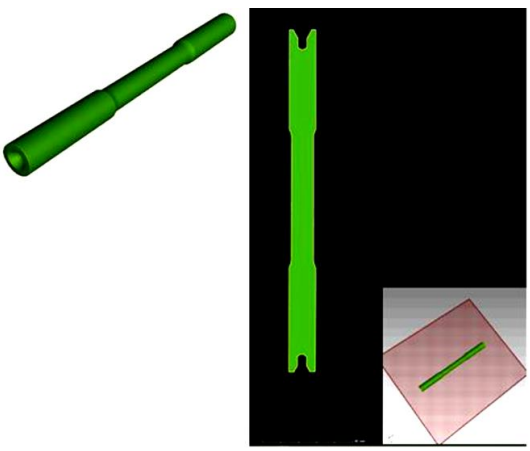
Na analýzu vnútorných chýb bol použitý tomograf Metrotom 1 500 (fa Carl Zeiss), uvedený na Obr. 1.7. Analýza bola robená na vzorkách, ktoré boli pripravené z jednotlivých analyzovaných hriadeľov, ktoré boli potom použité aj pri analýze mechanických vlastností pomocou ťahovej skúšky.

Z každého hriadeľa sa vyhotovili dve vzorky, s tvarmi a rozmermi uvedenými na Obr. 1.10, a to z hrubšieho a tenšieho konca hriadeľa, ktoré sú vyznačené na Obr. 1.11. Označenie T znamená, že vzorka bola vyhotovená z tenšieho konca, označenie H znamená, že sa vzorka vyhotovila z hrubšieho konca analyzovaného hriadeľa. Výsledky boli vyhodnocované v programe VG Studio MAX 3.0. Prípadová štúdia uvádza výsledok merania na vzorke z hriadeľa č. 1 (Tab. 1.1) z tenkej časti (1T) (Obr. 1.8) a z hrubej časti (1H) (Obr. 1.9) nakoľko ani pri jednej z testovaných vzoriek neboli zistené žiadne vnútorné chyby.

Obr. 1.7. Tomograf METROTOM 1 500



Obr. 1.8. Analýza vnútorných chýb pre vzorku 1T



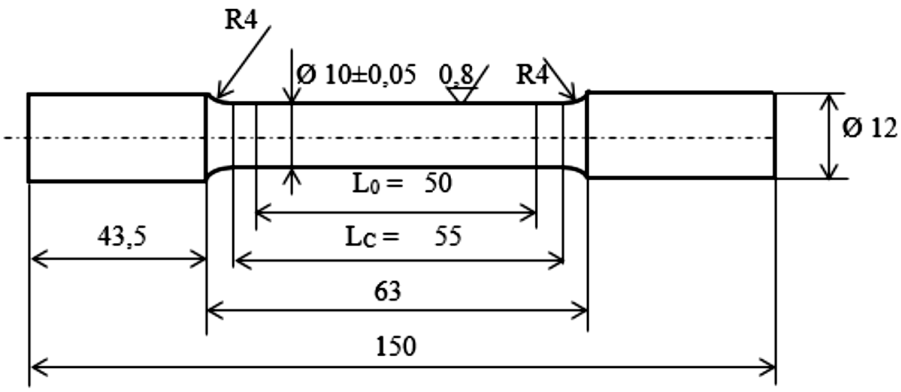
Obr. 1.9. Analýza vnútorných chýb pre vzorku 1H

Nakoľko pri výrobe hriadeľa technológiou PKV bola požadovaná od zákazníka 100 % kontrola z hľadiska vnútorných chýb, na kontrolu v prevádzkových podmienkach bola

navrhnutá a použitá kontrola pomocou ultrazvuku. Princíp ultrazvukových skúšok je založený na priamočiarom šírení ultrazvukových vĺn v skúšanom materiáli a na ich odraze na vytvorených chybách v materiáli. Za vnútornou chybou môže nastať čiastočný, alebo úplný ultrazvukový tieň. Dajú sa však zistiť len tie chyby, ktorých priečne rozmery (rozmery v rovine kolmej na smer šírenia ultrazvuku) sú väčšie ako ½ vlnovej dĺžky ultrazvukových vĺn.

1.1.4 Kontrola mechanických vlastností

Mechanické vlastnosti boli kontrolované na základe ťahovej skúšky na vzorkách pripravených z polotovaru a aj z valcovaných hriadeľov podľa Obr.1.10.



Obr. 1.10. Tvar a rozmery skúšobných vzoriek použitých na ťahové skúšky

Ťahové skúšky boli realizované na univerzálnom skúšobnom zariadení EU 40 (fa VEB). Skúšobné vzorky boli vyrobené z polotovarov a z vyvalcovaných hriadeľov, konkrétne z hrubšieho a tenšieho konca každého hriadeľa, ktoré sú vyznačené na Obr. 1.11. Ťahové skúšky sa realizovali v súlade s normou STN EN ISO 6892-1.

Obr. 1.11. Oblasti hriadeľov, z ktorých boli vyrobené skúšobné vzorky na ťahové skúšky

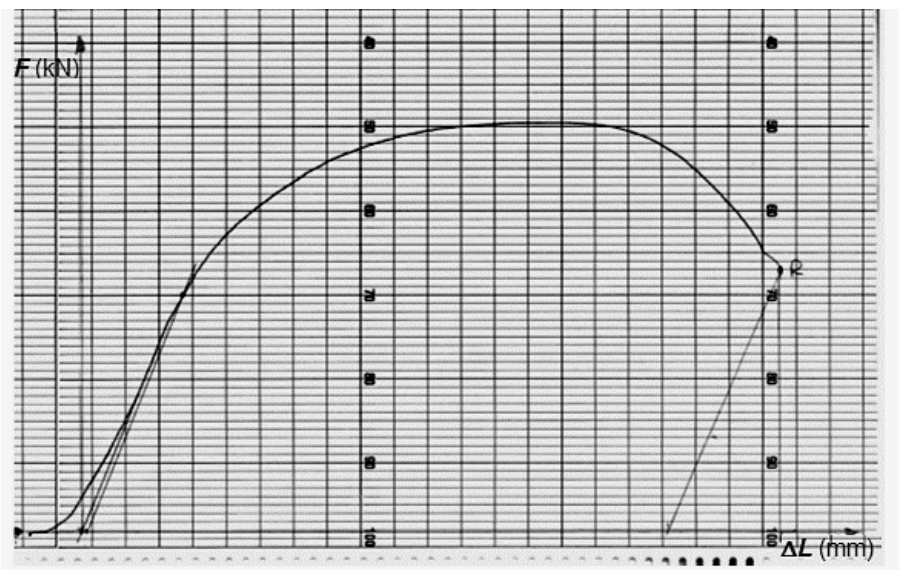
Ťahové skúšky boli realizované na 3 skúšobných vzorkách, pripravených zo základného materiálu (polotovaru). Stredné hodnoty nameraných veličín pre základný materiál sú: medza klzu $R_{p0,2}$ = 360 MPa, pevnosť v ťahu R_m = 615 MPa, ťažnosť A_{50} = 35 % a kontrakcia Z = 65 %.

Potom bola realizovaná ťahová skúška na vzorkách pripravených z vývalkov. Ťahovou skúškou na vzorkách po valcovaní sa sledoval vplyv valcovania za tepla na zmenu

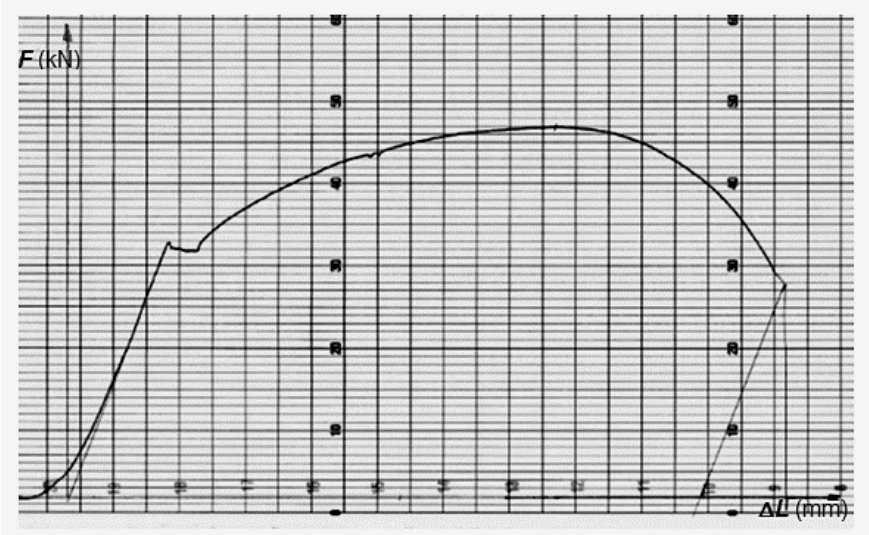
mechanických vlastností materiálu po valcovaní. Na základe výsledkov bol zistený pokles pevnosti v ťahu (R_m) a nárast charakteristík plasticity (A, Z). Zaujímavým zistením bola tiež skutočnosť, že vstupný materiál pred valcovaním nevykazoval výraznú medzu klzu (Obr. 1.12), avšak po valcovaní materiál výraznú medzu klzu vykazoval (Obr. 1.13). Výsledky ťahovej skúšky na vzorkách po valcovaní sú uvedené v Tab. 1.2.

Tabuľka 1.2. Výsledky ťahovej skúšky na vzorkách po valcovaní

Vzorka	***Medza klzu horná R_{eH}*** (MPa)	***Medza klzu dolná R_{eL}*** (MPa)	***Pevnosť v ťahu R_m*** (MPa)	***Ťažnosť A_{50}*** (%)	***Kontrakcia Z*** (%)
1T	391	372	565	41	74
1H	396	374	560	42	74
2T	388	376	565	39	74
2H	396	370	552	41	73
3T	397	385	577	38	73
3H	397	372	563	41	73
4H	359	359	551	41	73



Obr. 1.12. Diagram z ťahovej skúšky základného materiálu v súradniciach sila F a predĺženie ΔL



Obr. 1.13. Diagram z ťahovej skúšky vzorky 3T v súradniciach sila F a predĺženie ΔL

1.1.5 Určenie veľkosti pretvorenia

Z hľadiska procesu tvárnenia bolo potrebné určiť aj veľkosť pretvorenia aj stupeň pretvorenia materiálu. Výpočet veľkosti pretvorenia bol realizovaný v mieste najmenšieho priemeru hriadeľa, kde je maximálne skutočné pretvorenie φ_{max} = 1,97, kde sa vychádzalo zo zmeny prierezov pri PKV podľa vzťahu (1.1):

$$\varphi = ln\frac{S_o}{S} \tag{1.1}$$

kde S_o je prierez polotovaru v mm,

S – prierez v najmenšom priemere hriadeľa v mm.

Stupeň pretvorenia (K_{max}) bol určovaný v mieste najmenšieho priemeru hriadeľa a jeho hodnota je 7,2, kde sa vychádzalo zo vzťahu (1.2):

$$K = \frac{S_o}{S} \tag{1.2}$$

kde S_o je prierez polotovaru v mm,

S – prierez v najmenšom priemere hriadeľa v mm.

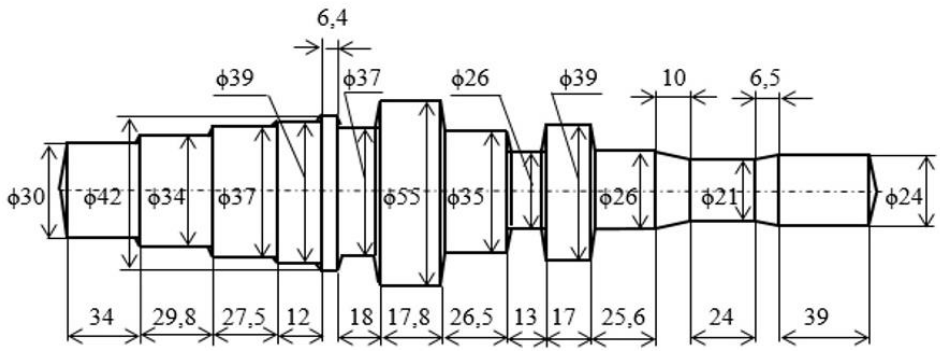
Tieto hodnoty veľkosti pretvorenia sú dôležité z hľadiska predikcie vývoja štruktúry materiálu valcovaného hriadeľa.

1.2 Výroba hriadeľa zápustkovým kovaním

Výroba hriadeľa zápustkovým kovaním v otvorenej zápustke (s výronkom) na zvislom kľukovom kovacom lise je alternatívou k výrobe daného hriadeľa priečnym klinovým valcovaním v prípade ak by došlo k poruche valcovačky alebo v prípade poškodenia valcovacích segmentov, či nutnosti ich renovácie.

1.2.1 Návrh polotovaru na kovanie v otvorenej zápustke

Na Obr. 1.14 je hriadeľ, ktorý bol navrhnutý ako alternatíva k výrobe vývalku technológiou PKV, rovnako z materiálu 16MnCr5, STN 41 4220 (1.7131). Na obrázku sú uvedené rozmery a tvar výkovku, ktorý bude kovaný v otvorenej zápustke, a ktorého nekótované úkosy sú 3°, prechodové polomery medzi jednotlivými priemermi sú R5 a vonkajšie polomery na výkovku sú R2.



Obr. 1.14. Rozmery a tvar výkovku kovaného v otvorenej zápustke

Objem výkovku: $V_{výk} = 271\,657{,}3$ mm³.

Objem výronku: $V_{výr} = 0{,}7 \cdot S_{výr} \cdot [O_v + 4 \cdot (b + b_1)]$.

Výška mostíka výronkovej drážky: $h_{výr} = 0{,}017.\sqrt{S_{výk}}$.

Pôdorysná plocha výkovku: $S_{výk} = 9\,847{,}9$ mm².

Výška mostíka výronkovej drážky: $h_{výr} = 1{,}687$ mm, z čoho finálny rozmer je $h_{výr} = 1{,}6$ mm.

Rozmery výronkovej drážky: $b = 6$ mm, $b_1 = 25$ mm, $h_1 = 4$ mm.

Prierez výronkovej drážky: $S_{výr} = 109$ mm².

Obvod výkovku: $O_v = 758{,}2$ mm.

Objem výronku: $V_{výr} = 0{,}7 \cdot 109 \cdot [758{,}2 + 4 \cdot (6 + 25)] = 67\,311{,}9$ mm³.

Objem opalu: $V_{opal} = 0{,}02 \cdot (271\,657{,}3 + 67\,311{,}9) = 6\,779{,}4$ mm³.

Objem polotovaru: $V_{polotovaru} = 271\,657{,}3 + 67\,311{,}9 + 6\,779{,}4 = 345\,748{,}6$ mm³.

Hmotnosť polotovaru (vsádzková hmotnosť): 2,7 kg.

Rozmery polotovaru: ø 55 × 145,6 mm.

1.2.2 Postup výroby hriadeľa zápustkovým kovaním

Rámcový technologický postup výroby hriadeľa zápustkovým kovaním pozostáva z týchto operácií:

1. Príprava polotovaru rezaním na kotúčovej píle.
2. Indukčný ohrev polotovaru na hornú kovaciu teplotu.
3. Predkovanie polotovaru v predlžovacej a tvarovacej dutine.
4. Dokovanie v dokončovacej dutine.
5. Ostrihnutie výronku.
6. Kontrola rozmerov výkovku.
7. Tepelné spracovanie výkovku – normalizačné žíhanie.
8. Čistenie výkovku otryskávaním.
9. Konečná kontrola tvaru a rozmerov.

1.2.3 Výpočet sily na kovanie a návrh výrobného zariadenia

Výpočet kovacej sily bol realizovaný dvoma spôsobmi, a to: podľa Storoženva a podľa Rebelského (Bílik a kol., 2004, Bača, 2005, Kostka a kol., 1995). Tvárniaca sila podľa Storoženva sa vypočíta podľa vzťahu (1.3):

$$F = F_1 + F_2 = k_{ps} \cdot m_1 \cdot S_1 + k_{ps} \cdot m_2 \cdot S_2 \qquad (1.3)$$

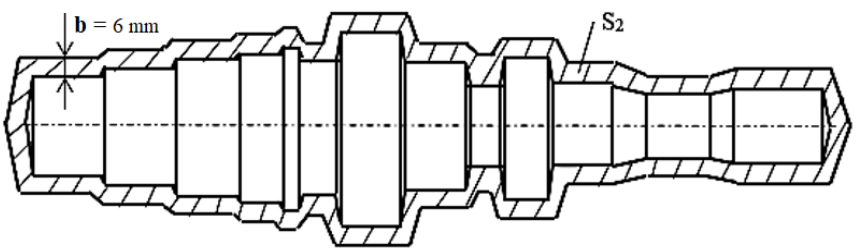
kde $S_1 = S_{výk}$ je pôdorysná plocha výkovku v mm^2 ($S_1 = 9\,847{,}9$ mm^2),

S_2 – pôdorysná plocha mostíka výronkovej drážky v mm^2 (Obr. 1.15) ($S_2 = 4\,153{,}2$ mm^2),

k_{ps} – stredná pretvárna pevnosť kovaného materiálu v MPa, v závislosti od kovacích teplôt (pre oceľ s pevnosťou v ťahu 600 MPa a pre hornú kovaciu teplotu 1 150 °C ($k_{pHKT} = 36$ MPa) a dolnú kovaciu teplotu 800 °C ($k_{pDKT} = 111$ MPa), z čoho vyplýva, že $k_{ps} = \frac{36+111}{2} = 73{,}5$ MPa),

m_1, m_2 – súčinitele vonkajších vplyvov zápustkového kovania (pre daný výkovok je: $m_1 = 1{,}15 \,.\left(1 + \frac{b}{h_{výr}} + 0{,}15 \,.\frac{A_v}{h_{výr}}\right)$ a $m_2 = 1{,}15 \,.\left(1 + \frac{b}{h_{výr}}\right)$, a teda m_1 = 24,6 a m_2 = 5,46).

Celková kovacia sila podľa Storoženva je: $F_{K_Storožev} = 19472\,708{,}7$ N $= 19472{,}7$ kN.



Obr. 1.15. Znázornenie pôdorysnej plochy mostíka výronkovej drážky okolo výkovku

Tvárniaca sila podľa Rebelského sa vypočíta podľa vzťahu (1.4):

$$F = 8.(1 - 0{,}001.D_{red}).\left(1{,}1 + \frac{20}{D_{red}}\right)^2.\left(1 + 0{,}1.\sqrt{\frac{L}{B}}\right).\ k_p\ .\ S \qquad (1.4)$$

kde L je dĺžka výkovku v mm ($L = 300{,}7$ mm),

B – šírka výkovku v mm ($B = 55$ mm),

k_p – pretvárna pevnosť materiálu v MPa pri dolnej kovacej (dokovacej) teplote (pre oceľ s pevnosťou v ťahu 600 MPa, pre dolnú kovaciu teplotu 800 °C je $k_p = k_{pDKT} = 111$ MPa),

$S = S_{výk}$ – pôdorysná plocha výkovku v mm^2 ($S_{výk} = 9\,847{,}9$ mm^2),

D_{red} – redukovaný priemer výkovku v mm (pôdorysná plocha výkovku prepočítaná na výkovok s kruhovým pôdorysom, kde sa vychádza zo vzťahu $\frac{\pi\ .\ D_{red}^2}{4} = S_{výk}$, z čoho vyplýva, že redukovaný priemer výkovku je: $D_{red} = 1{,}13\ .\ \sqrt{S_{výk}} = 1{,}13\ .\ \sqrt{9\,847{,}9} = 112{,}14\ mm$).

Celková kovacia sila podľa Rebelského je: $F_{K_Rebelský} = 15\,654\,927{,}4$ N $= 15\,655$ kN.

Podľa vypočítanej kovacej sily bol na kovanie v prípade náhrady za PKV navrhnutý zvislý kovací lis LZK 2 500 (fa Šmeral) (Obr. 1.16) s menovitou silou F_m = 25 000 kN, nachádzajúci sa vo firme kde bude výroba hriadeľa primárne realizovaná technológiou PKV.

Obr. 1.16. Zvislý kovací lis LZK 2 500 použitý na kovanie hriadeľa

1.2.4 Výpočet ostrihovacej sily a návrh výrobného zariadenia

Výpočet ostrihovacej sily F_o podľa (Bílik a kol., 2004, Bača, 2005, Dvořák a kol., 2005) bol vykonaný za účelom návrhu a kontroly ostrihovacieho lisu, podľa vzťahu (1.5):

$$F_o = k \cdot \tau_s \cdot S \tag{1.5}$$

kde k je súčiniteľ vonkajších vplyvov strihania (pri ostrihovaní výronku je to: k = 1,7),

- τ_s – strižný odpor materiálu v MPa, ktorý závisí od teploty pri ostrihovaní výkovku (strižný odpor kovaného materiálu s pevnosťou materiálu v ťahu R_m = 600 MPa, pri predpokladanej teplote ostrihovania 700 °C je $\tau_s = k_{p700^oC}$ = 150 MPa),
- S – strižná plocha v mm^2 (pri ostrihovaní výronku je to: $S = O_v \cdot 2 \cdot h_{výr} = 758{,}2 \cdot 2 \cdot 1{,}6 = 2\,426{,}2$ mm^2).

Celková sila na ostrihovanie je: $F_o = 1{,}7 \cdot 150 \cdot 2\,426{,}2 = 618\,681$ N $= 618{,}7$ kN.

Na ostrihovanie bol navrhnutý ostrihovací lis LDO 315 A (fa Šmeral) (Obr. 1.17), ktorý je súčasťou kovacej linky, a ktorý z hľadiska vypočítanej ostrihovacej sily plne vyhovuje nakoľko menovitá sila lisu je F_m = 3 150 kN.

Obr. 1.17. Ostrihovací lis LDO 315 A

Záver

Pri výrobe hriadeľa priečnym klinovým valcovaním (PKV) boli rozmery polotovaru ø 55 × 122 mm s hmotnosťou 2,25 kg. Pri zápustkovom kovaní boli rozmery polotovaru ø 55 × 145,6 mm s hmotnosťou polotovaru 2,7 kg. Úspora materiálu pri PKV predstavovala 0,45 kg na jeden hriadeľ.

Teoretická produktivita pri PKV pri bezporuchovom nepretržitom chode linky tvorenej indukčným ohrievacím zariadením, valcovačkou na PKV, sklzmi, dopravníkmi a snímačmi teploty ohriateho polotovaru, pracujúcej v automatickom režime je približne 10 ks za minútu. Reálna produktivita, napr. z dôvodu nesprávneho ohrevu polotovaru, medzioperačnej manipulácie a pod. je 7 *až* 8 ks za minútu. Teoretická produktivita pri zápustkovom kovaní pri bezporuchovom chode kovacej linky tvorenej indukčným ohrievacím zariadením, kovacím lisom, ostrihovacím lisom, sklzmi, dopravníkmi, snímačmi teploty ohriateho polotovaru, mazacou pištoľou pracujúcej s ručnou obsluhou je približne 5 ks za minútu. Reálna produktivita vzhľadom na nutné prestávky pracovníkov a neplánované prestoje (z dôvodu nesprávneho ohrevu polotovaru a pod.) je 3 *až* 4 ks za minútu. Z čoho vyplýva, že produktivita výroby pri PKV je približne dvojnásobná oproti zápustkovému kovaniu.

Ďalším benefitom technológie PKV bolo výrazné zníženie pracovného zaťaženia obsluhy, ktorej úlohou je kontrolná činnosť linky a vizuálna kontrola hriadeľov. Výhodou je aj zníženie počtu pracovníkov. Pri aplikácii PKV linku obsluhuje 1 pracovník a pri zápustkovom kovaní sú to 2 pracovníci (jeden obsluhuje kovací lis a druhý ostrihovací lis). Určitou nevýhodou zavedenia výroby hriadeľa PKV je okrem kontroly rozmerov a tvaru aj požiadavka na 100 % kontrolu vyrobených hriadeľov z hľadiska možného vzniku vnútorných chýb, aj napriek tomu, že pri overovacej sérii na testovaných vzorkách neboli zistené vnútorné chyby, ktoré by súviseli s tzv. Mannesmannovým efektom.

Zoznam bibliografických odkazov

BAČA, J. 2005. *Objemové tvárnenie: Zápustkové kovanie*. 1. vyd. Bratislava: STU v Bratislave, 2005. 161 s. Dostupné na internete: <https://sweb.mtf.stuba.sk>. ISBN 80-227-2176-X.

BÍLIK, J., KAPUSTOVÁ, M., ULÍK, A. 2004. *Technológia tvárnenia. Návody na cvičenia*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2004. 171 s. ISBN 80-227-2099-2.

DVOŘÁK, M., GAJDOŠ, F., ŽÁK, L. 2005. *Technologie tváření. Návody do cvičení.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, VUT, FSI. 103 s. ISBN 80-214-2881-3.

KOSTKA, P., LUKŠIC, J., PODOLSKÝ, M. 1995. *Technológia tvárnenia.* Bratislava: Vydavateľstvo STU, 1995. 205 s. ISBN 80-227-0793-7.

LI, Q., LOVELL, M. R., SLAUGHTER, W., TAGAVI, K. 2002. Investigation of the morphology of internal defects in cross wedge rolling. *Journal of Materials Processing Technology*, p. 125-126, s. 248-257. ISSN: 0924-0136.

LUDROVCOVÁ, B. 2017. Rozbor procesov valcovania a tvorba vnútorných chýb vývalkov. Diplomová práca. Trnava: 2017.

PATER, Z. 2014. *Cross-Wedge Rolling. In Comprehensive Materials Processing*. Vol. 3, pp 211–279. ISBN: 9780080965321.

ŠUGÁR, P. a ŠUGÁROVÁ, J. 2009. *Výrobné technológie – zlievanie, zváranie. tvárnenie.* Nakladateľstvo Dali-BB, Banská Bystrica, 291 s. ISBN 978-80-89090-587.

2 ZVYŠOVANIE ŽIVOTNOSTI ZÁPUSTIEK

BÍLIK, J.

Úvod

Problematika životnosti zápustiek je zložitá vzhľadom na množstvo faktorov, ktoré môžu ovplyvniť ich životnosť. V súvislosti so životnosťou zápustiek sa môžeme stretnúť s viacerými pojmami, a to trvanlivosť zápustky, životnosť zápustky resp. s pojmami základná životnosť a celková životnosť zápustky. Pod pojmom trvanlivosť resp. základná životnosť sa rozumie počet vykovaných výkovkov do renovácie. Pod pojmom životnosť resp. celková životnosť sa rozumie počet vykovaných výkovkov do úplného vyradenia zápustky z činnosti.

K riešeniu životnosti zápustiek prispieva aj zdokonaľovanie výrobných postupov, technológií výroby, tepelného spracovania a úpravy povrchov. V súčasnosti ide aj v oblasti životnosti zápustiek o ekonomickú efektívnosť výroby. Na dosiahnutie najlepšieho ekonomického efektu je potrebné zvoliť správny postup výroby zápustiek vzhľadom na vyrábaný počet výkovkov. V niektorých prípadoch, vzhľadom na počet vyrábaných kusov, nemusí viesť voľba postupu výroby a renovácie zápustiek, zameraná na maximálnu trvanlivosť a životnosť, aj k maximálnemu ekonomickému efektu. Závisí to teda hlavne od druhu výkovku a typu výroby. Životnosť zápustiek je v značnej miere ovplyvnená ich povrchovou vrstvou, teda ich odolnosťou voči cyklickému tepelnému a mechanickému zaťaženiu, ďalej aj opotrebeniu funkčných povrchov a tým aj procesmi trenia. Na predĺženie životnosti zápustky je potrebná aj správna konštrukcia zápustky, príprava zápustky pred kovaním (predohrev), mazanie a chladenie zápustky, použitie výmenných vložiek, alebo spevnenie povrchovej vrstvy zápustky mechanickým spevňovaním, chemicko-tepelným spracovaním, alebo nanesením povlakov.

Prípadová štúdia sa zaoberá problematikou zvyšovania životnosti zápustiek so zameraním na metódy priamo aplikované pri riešení konkrétnych úloh v praxi a pri riešení výskumných úloh najmä v spolupráci s firmou HKS Forge, spol. s r. o., Trnava. Cieľom prípadovej štúdie je poukázať na možnosti a riešenia, umožňujúce dosiahnuť zvýšenú životnosť zápustiek pri výrobe výkovkov zápustkovým kovaním vo veľkosériovej a hromadnej výrobe, ktorá úzko súvisí aj s automobilovým priemyslom, dominantným na Slovensku. Štúdia zahŕňa oblasť riešenia životnosti zápustiek s využitím mechanického spevňovania povrchových vrstiev a nasycovania povrchových vrstiev dusíkom (nitridácia) a bórom (boridovanie).

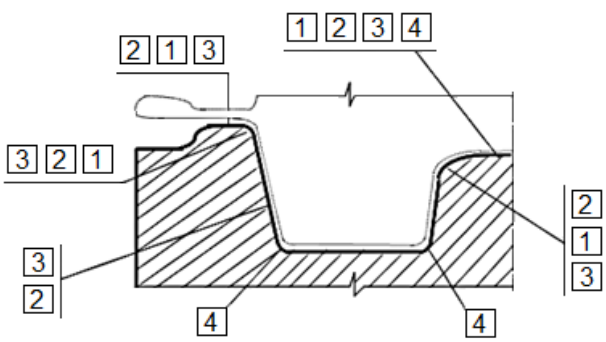
2.1 Príčiny vyradenia zápustiek z prevádzky

Pri určitých prevádzkových podmienkach môžu nastať tieto príčiny vyradenia zápustiek z ich činnosti:

- Opotrebenie dutiny zápustky oterom – prejavuje sa najviac na tých častiach zápustky, kde dochádza počas tvárnenia k najväčším presunom materiálu. Patrí sem najmä mostík výronkovej drážky, prechod od mostíka výronkovej drážky do výkovku a prechody bočných a čelných povrchov (Obr. 2.1). Stupeň opotrebenia zápustky závisí od rýchlosti premiestňovania materiálu, jeho množstva a od hraničných podmienok trenia. Opotrebenie mostíka má rozhodujúci vplyv na podmienky kovania, stupeň zaplnenia dutiny a podmienky pri ostrihovaní výronku. Opotrebenie v oblasti styku tvárneného

materiálu a povrchu zápustky môže mať charakter abrazívneho a adhézneho opotrebenia, pričom na povrchu dutiny zápustky pôsobia obidva typy opotrebenia súčasne v určitom pomere a s určitou intenzitou. Pri kovaní je abrazívne opotrebenie vyvolané najmä oxidickými časticami (okujami) prípadne cudzími tvrdými časticami z okolitého prostredia, alebo tvrdými fázami v štruktúre tvárneného materiálu.

- Otlačenie exponovaných častí zápustiek – prejavuje sa najmä na vystupujúcich častiach dutiny a vonkajších polomeroch dutiny zápustky. V prípade opakovaného zaťažovania zápustky sa môžu malé plastické deformácie (najmä zohriatych povrchových vrstiev) superponovať, čím dochádza k strate rozmerov. Ak sa najintenzívnejšie meniaci sa rozmer dostane mimo tolerancie, zápustka sa musí vyradiť z prevádzky. Na základe výskumov bolo zistené, že hĺbka dutiny bucharovej zápustky po vykonaní približne 1000 výkovkov sa zmenila o 0,8 *až* 1,1 mm, čo pri priemernom počte 4 *až* 6 úderov, potrebných na vykovanie jedného výkovku, pre jeden výkovok predstavuje deformáciu 0,000 3 *až* 0,000 5 %. Výskumy zamerané na zmeny rozmerov dutiny ukázali, že najviac sa menia rozmery dutiny v začiatočných etapách používania zápustky (do vykovania 600 *až* 1000 výkovkov). Potom nastane etapa pomernej stabilizácie rozmerov, a preto je potrebné navrhnúť optimálne mínusové tolerancie výkovku, čím sa môže dosiahnuť zvýšenie životnosti o 30 *až* 40 %.
- Vznik siete únavových trhliniek v dôsledku tepelnej únavy a spálenia povrchovej vrstvy – po vzniku únavových trhliniek sa vplyv opálenia prejavuje intenzívnejšie, pretože sa vytvárajú podmienky na vytrhávanie väčších častíc materiálu z povrchu zápustky a intenzívnejšie sa menia rozmery dutiny. Pritom však dochádza k zatekaniu materiálu do vzniknutých trhliniek a k ťažšiemu vyberaniu výkovkov, čo rovnako vedie k vyradeniu zápustky. Na Obr. 2.1 sú uvedené úseky, kde dochádza k opáleniu povrchu zápustky. Pri malých prechodových polomeroch na zápustke sa pomerne skoro objavia trhliny tepelnej únavy. Vhodným riešením je zmena polomerov z R3 na R6, čo v niektorých prípadoch môže viesť k zvýšeniu životnosti 2 *až* 3 krát (Bílik 2006; Bílik, 2007)



Obr. 2.1. Spôsoby opotrebenia zápustkovej dutiny (Bílik, 2007)
1 – otlačenie, 2 – opotrebenie oterom, 3 – opálenie, 4 – únava materiálu

2.2 Základné faktory ovplyvňujúce životnosť zápustiek

Medzi základné faktory, ovplyvňujúce životnosť zápustiek patria (Bílik 2007; Jílek, 2012; Jílek, 2018, Petrmichl, 2017):

- materiál zápustky,
- konštrukcia zápustky,
- spôsob výroby zápustky,
- kvalita tepelného spracovania zápustky,
- tepelné a mechanické namáhanie zápustky,
- podmienky kovania.

Faktory, ovplyvňujúce životnosť zápustiek, je možno ďalej rozdeliť na:

a) vonkajšie – kovaný materiál a teplota kovaného polotovaru, použité technologické zariadenie (napr. kovací lis, buchar), cyklus kovania, druh maziva, spôsob mazania a pod.

b) vnútorné – tvar výkovku, hmotnosť výkovku, kovací tlak v dutine a pod.

Ako vyplýva z analýzy faktorov ovplyvňujúcich životnosť zápustiek, ktoré sú vystavené cyklickému mechanickému a tepelnému zaťaženiu, ide o komplexnú problematiku. Vo všeobecnosti však je možno konštatovať, že z hľadiska životnosti významnú úlohu zohráva povrchová vrstva, ktorej skvalitnenie pri daných prevádzkových podmienkach môže viesť k významnému zvýšeniu trvanlivosti a životnosti zápustky.

2.3 Mechanické spevňovanie povrchovej vrstvy

Pred samotnou aplikáciou tejto metódy na konkrétnu zápustku boli realizované skúšky na vzorkách s cieľom overiť účinky mechanického spevňovania povrchovej vrstvy na zmenu vlastností povrchovej vrstvy a potom na optimalizáciu parametrov spevňovania. Vzorky z nástrojovej ocele STN 41 9552 (1.2343), z ktorej boli vyrábané aj zápustky, boli po tepelnom spracovaní podrobené spevneniu povrchovej vrstvy dynamickým guľôčkovaním na zariadení, pracujúcom na princípe metacieho kolesa. Pri spevňovaní povrchovej vrstvy sa na spevňovaný povrch pomocou zariadenia vrhali oceľové telieska v tvare guličiek s priemerom 1 *až* 1,5 mm, rýchlosťou približne 30 $m.s^{1}$ po dobu 8 *až* 10 minút.

Spevnenie povrchovej vrstvy bolo vyhodnocované na základe skúšky odolnosti proti cyklického zaťaženiu pri energii úderu 160 $J.cm^{-2}$. Vyhodnocoval sa aj priebeh tvrdosti od povrchu smerom do jadra skúšobných vzoriek. Hodnotila sa aj mikroštruktúra povrchovej vrstvy a základného materiálu v podpovrchovej vrstve. Ďalej sa hodnotila aj lomová plocha na vzorkách bez spevnenia a so spevnením povrchovej vrstvy.

Na základe merania priebehu tvrdosti a na základe hodnotenia mikroštruktúry sa určovala aj hrúbka spevnenej povrchovej vrstvy, ktorá sa pohybovala od 0,3 do 0,5 mm pri východiskovej tvrdosti po tepelnom spracovaní od 40 do 50 HRC.

Tvrdosť povrchovej vrstvy po guľôčkovaní stúpla minimálne o 2 *až* 3 HRC. Významné bolo najmä zvýšenie odolnosti vzorky proti cyklickému zaťaženiu, dané počtom cyklov do porušenia vzoriek, so spevnenou povrchovou vrstvou v porovnaní so vzorkami bez spevnenia povrchovej vrstvy, čo je dané vnesením tlakových zvyškových napätí do povrchovej vrstvy pri guľôčkovaní. Tlakové zvyškové napätia v povrchovej vrstve potláčajú vznik a rozvoj porušenia od povrchu, ktorý je priamo v kontakte s tvárneným materiálom.

Táto skutočnosť sa prejavila aj na lomových plochách, kde u vzoriek so spevnenou povrchovou vrstvou vykazovala lomová plocha v povrchovej vrstve charakter tvárneho lomu. (Bílik, 2007)

Po overení priaznivých účinkov mechanického spevňovania na vlastnosti povrchovej vrstvy bola metóda aplikovaná na zápustku, určenú na kovanie kolesa pre automobilový priemysel. Zápustka bola vybraná vzhľadom na to, že bola určená na veľkosériovú výrobu daného kolesa. Kovacia zápustka bola pred spevňovaním renovovaná znižovaním o 2 mm a podložená podložkami, aby sa vyrovnalo zníženie zápustky. Potom bola zápustka podrobená spevňovaniu povrchovej vrstvy dynamickým guľôčkovaním. Po aplikácii metódy sa sledovala životnosť zápustky v konkrétnych prevádzkových podmienkach.

Cieľom aplikácie metódy spevňovania povrchovej vrstvy dynamickým gulôčkovaním na zápustku používanú priamo vo výrobe bolo zistiť vplyv procesu mechanického spevňovania povrchových vrstiev dynamickým guľôčkovaním na trvanlivosť (základnú životnosť) zápustky. Samotné kovanie prebiehalo na zvislom kovacom lise LZK 2 500/4, ktorý je na Obr. 2.2. Menovitá sila lisu je 25 000 kN.

Obr. 2.2. Kovací lis LZK 2 500/4

Postup výroby výkovku je takýto:

- rezanie polotovaru na pásovej píle,
- ohrev materiálu na hornú kovaciu teplotu 1 200 ºC v indukčnom ohrievacom zariadení – teplota kontrolovaná optickým pyrometrom,
- predkovanie ubíjaním a v predkovacej dutine – lis LZK 2 500/4,
- dokovanie v dokončovacej dutine – lis LZK 2 500/4 (fa Šmeral),
- ostrihovanie výronku na ostrihovacom lise LDO 315 (fa Šmeral),
- kontrola výkovku.

Pred samotným kovaním sa zápustky (predkovacia aj dokončovacia) nahriali na teplotu približne 250 ºC pomocou špeciálneho plynového horáka v tvare spojených dvoch kruhov, umiestneného medzi hornú a spodnú časť zápustky. Teplota predohrevu sa kontrolovala pomocou optického pyrometra. Linka na kovanie výkovku použitá pri overení trvanlivosti zápustky po mechanickom spevňovaní povrchovej vrstvy je na Obr. 2.3.

Obr. 2.3. Linka na výrobu výkovku
1 – indukčný ohrev, 2 – kovanie na lise LZK 2 500/4, 3 – ostrihovanie výronku na lise LDO 315

Zápustka bola vyrobená z ocele STN 41 9552 (1.2343). Táto oceľ je najpoužívanejšia oceľ pre prácu za tepla. Je to zliatinová nástrojová oceľ s vysokou húževnatosťou a prekaliteľnosťou. Má dobrú tepelnú vodivosť, je odolná voči tvorbe trhlín pri práci za tepla. Vykazuje malú citlivosť na prudké zmeny teploty, je umožnené ochladzovanie vo vode. Prekaliteľnosť je obzvlášť dobrá na vzduchu a vo vákuu. Po kalení vykazuje malé rozmerové deformácie. Je dobre obrábateľná a je vhodná aj na nitridáciu. Vyznačuje sa vysokou čistotou, homogenitou, húževnatosťou a nízkym obsahom stopových prvkov. Je dobre leštiteľná a je možno použiť textúru na jej povrchu. Používa sa na výrobu nástrojov, ktoré sú vysoko namáhané pri práci za tepla. V Tab. 2.1 je uvedené chemické zloženie materiálu a v Tab. 2.2 tepelné spracovanie danej ocele.

Tabuľka 2.1. Chemické zloženie ocele 19 552 (Böhler, 2016)

Prvok	***C***	***Si***	***Mn***	***Cr***	***Mo***	***V***
obsah (hm. %)	0,38	1,10	0,40	5,00	1,30	0,40

Tabuľka 2.2. Tepelné spracovanie ocele 19 552

Žíhanie na odstránenie pnutia (ºC)	600 *až* 650
Žíhanie na mäkko (ºC)	750 *až* 800
Kaliaca teplota (ºC)	1 000 *až* 1 040
Kaliace prostredie	olej, vzduch
Teplota popúšťania (ºC)	540 *až* 560
Tvrdosť po kalení (HRC)	54

V Tab. 2.3 je uvedená pevnosť jednotlivých zápustiek pred guľôčkovaním a po gulôčkovaní určená na základe merania tvrdosti pred a po gulôčkovaní.

Tabuľka 2.3. Namerané hodnoty pevnosti zápustky

Zápustka	***Pred gulôčkovaním*** (MPa)	***Po gulôčkovaní*** (MPa)
Predkovacia dutina – dolná	1 580	1 700
Predkovacia dutina – horná	1 640	1 805
Dokončovacia dutina – dolná	1 385	1 420
Dokončovacia dutina – horná	1 390	1 420

Na Obr. 2.4a je pohľad na hornú časť dutiny predkovacej zápustky a na Obr. 2.4b pohľad na dolnú časť dutiny predkovacej zápustky po gulôčkovaní pred nasadením do procesu kovania.

a b

Obr. 2.4. Pohľad na predkovaciu zápustku po gulôčkovaní
a – horná časť dutiny predkovacej zápustky, b – dolná časť dutiny predkovacej zápustky

Na Obr. 2.5a je pohľad na hornú časť dutiny dokončovacej zápustky a na Obr. 2.5b pohľad na dolnú časť dutiny dokončovacej zápustky po gulôčkovaní pred nasadením do procesu kovania.

a b

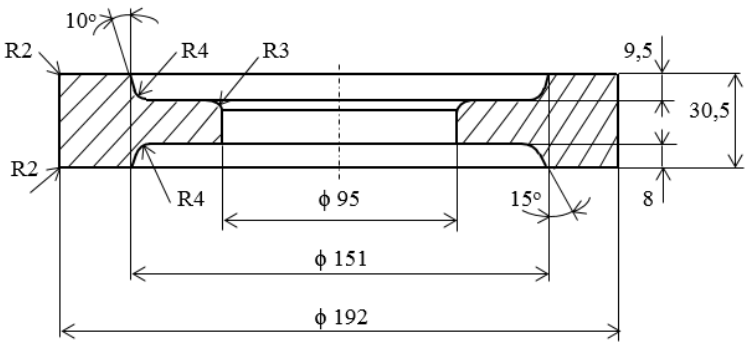
Obr. 2.5. Pohľad na dokončovaciu zápustku po gulôčkovaní
a – horná časť dutiny dokončovacej zápustky, b – dolná časť dutiny dokončovacej zápustky

Kovacia zápustka na kovanie v troch operáciách (ubíjanie, predkovanie, dokovanie) bola určená pre výrobu výkovku, ktorý je znázornený na Obr. 2.6. Na Obr. 2.7 sú rozmery daného výkovku. Ide o výkovok kolesa do diferenciálu osobného automobilu. (Haladová, 2019)

Rozmery polotovaru: priemer d = 74,5 mm a dĺžka l = 135 mm.

Materiál polotovaru: oceľ QS 1916 (1.7131).

Obr. 2.6. Pohľad na výkovok kolesa diferenciálu



Obr. 2.7. Rozmery výkovku

Zápustky, ktorých povrchová vrstva bola spevnená guľôčkovaním sa potom upli do držiaka na kovacom lise. Po odkutí určitého počtu kusov boli podľa potreby zápustky jemne prebrúsené priamo na kovacom lise a znovu sa pokračovalo v kovaní až do potreby renovácie. Počet prebrúsení bol 4 pričom po 4. prebrúsení sa kovalo až po dosiahnutie kritéria na potrebu renovácie zápustky. Kritérium na renováciu bolo, ak sa niektorý rozmer výkovku po kovaní v dokončovacej dutine dostal na hranicu predpísanej tolerancie. Druhým kritériom bolo to, aby sa vrypy, vznikajúce na povrchu dutiny v dôsledku opotrebenia a tepelnej únavy, výraznejšie začali prejavovať na povrchu výkovku.

V Tab. 2.4 sú uvedené výsledky zo sledovania trvanlivosti (základnej životnosti) zápustiek s povrchovou vrstvou spevnenou gulôčkovaním.

Tabuľka 2.4. Výsledky zo sledovania trvanlivosti (základnej životnosti) zápustiek

Prebrúsenie dutiny	***Počet vykovaných kusov medzi prebrúseniami***	***Kumulatívny počet vykovaných kusov***
do 1. prebrúsenia	1 200	1 200
po 1. prebrúsení	700	1 900
po 2. prebrúsení	500	2 400
po 3. prebrúsení	408	2 808
po 4. prebrúsení	513	3 321

Trvanlivosť zápustky iba tepelne spracovanej bez aplikácie spevňovania povrchovej vrstvy gulôčkovaním do prvého prebrúsenia je približne 600 kusov. Zápustka po povrchovej úprave gulôčkovaním vykovala do prvého prebrúsenia 1 200 kusov, teda sa trvanlivosť do prvého prebrúsenia priamo na kovacom lise zvýšila o 100 %.

Po prvom prebrúsení sa efekt spevnenia povrchovej vrstvy znížil nakoľko prebrúsením sa potlačili zvyškové tlakové napätia vnesené do povrchovej vrstvy gulôčkovaním, ktoré priaznivo vplývali na únavovú pevnosť povrchovej vrstvy. Preto sa počet vykovaných kusov po prvom prebrúsení znížil na 700 ks. Ďalším prebrusovaním sa postupne efekt spevnenia povrchovej vrstvy gulôčkovaním stráca a po druhom prebrúsení sa počet vykovaných kusov do ďalšieho prebrúsenia dostáva na úroveň zápustky ktorá nebola spevnená gulôčkovaním.

Výhodou mechanického spevňovania oproti povlakovaniu je, že spevnená povrchová vrstva je pevnou súčasťou zápustky, a nemôže teda dochádzať k jej prípadnému prasknutiu, alebo odlúpnutiu počas procesu kovania.

Po renovácii zápustky (znižovaním obrábaním, alebo naváraním a obrábaním) by sa proces guľôčkovania mohol znovu zopakovať a potom nasadiť zápustku znovu do výrobného procesu.

2.4 Nitridácia

Nitridácia patrí medzi metódy nasycovania povrchu za účelom zmeny vlastností povrchovej vrstvy používaná aj na zvyšovanie trvanlivosti (základnej životnosti) zápustiek. Pri nitridácii sa uskutočňuje difúzia atomárneho dusíka do povrchovej vrstvy zápustky pričom sa potom uskutočňujú aj ďalšie reakcie s legujúcimi prvkami, ktoré obsahuje nástrojová oceľ použitá na výrobu zápustky. Hrúbka difúznej vrstvy vzniknutej pri nitridácii je najčastejšie pri zápustkách od 0,1 do 0,3 mm. Nitridáciou sa zvyšuje tvrdosť povrchu, odolnosť proti opotrebeniu, únavová pevnosť, ale aj odolnosť proti korózii. Výhodou nitridácie oproti iným metódam nasycovania je, že sa uskutočňuje pri nižších teplotách ako je teplota popúšťania zápustky a teda po nitridácii už nenasleduje ďalšie tepelné spracovanie, a teda nitridácia je finálnou operáciou pri výrobe zápustky. Nitridácia sa môže uskutočniť v kvapalnom, alebo v plynnom prostredí a tiež iónovou (plazmovou) nitridáciou. V súčasnosti sa najviac používa nitridácia v plynnom prostredí a tiež iónová nitridácia, ktoré boli aplikované aj pri zvyšovaní trvanlivosti zápustky na kovanie priamo v prevádzkových podmienkach. (Hazlinger a Moravčík, 2013; Pokorný a kol., 2011, Moravčík a Hazlinger, 2017)

Na experimentálne overenie účinku nitridácie bola vybratá tiež zápustka na kovanie kolesa do diferenciálu osobného automobilu (Obr. 2.6 a Obr. 2.7) ako v prípade

mechanického spevňovania povrchovej vrstvy. Nakoľko najväčšie pretvorenie materiálu nastáva v predkovacej dutine proces nitridácie bol overovaný na tejto dutine. Na sledovanie trvanlivosti predkovacej zápustky boli použité tri rôzne pripravené sady podľa Tab. 2.5 a spolu s nimi aj vzorky určené na hodnotenie vlastností. (Kuracina a kol., 2020)

Tabuľka 2.5. Spracovanie jednotlivých sád predkovacích zápustiek

Označenie sady zápustky	***Materiál zápustky***	***Spôsob spracovania***
1	STN 41 9552 (1.2343)	kalenie a trojnásobné popustenie
2		kalenie, trojnásobné popustenie a nitridácia v plynnom prostredí
3		kalenie, trojnásobné popustenie a iónová nitridácia

Mechanické vlastnosti získané zo vzoriek spracovávaných súčasne s jednotlivými sadami zápustiek sú uvedené v Tab. 2.6.

Tabuľka 2.6. Mechanické vlastnosti získané zo vzoriek spracovávaných súčasne s jednotlivými sadami zápustiek

Označenie vzorky	***Tvrdosť povrchu HV0,3***	***Pevnosť v ťahu v jadre*** R_m (MPa)	***Medza klzu v jadre*** $R_{p0,2}$ (MPa)
1	-	1 590	1 425
2	763	1 571	1 397
3	1 050	1 595	1 425

Tvrdosť vzorky 1 bez nitridácie bola nameraná 485 HV10. V Tab. 2.7 je uvedený priebeh tvrdosti od povrchu smerom do jadra u vzoriek s aplikáciou nitridácie.

Tabuľka 2.7. Priebeh tvrdosti HV0,3 od povrchu smerom do jadra u vzoriek s aplikáciou nitridácie

Vzdialenosť od povrchu (mm)	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
Vzorka 2	862	836	560	526	473	473	475	464	465	465
Vzorka 3	890	855	849	763	640	526	467	465	465	463

Z nameraných hodnôt priebehu tvrdosti na vzorke nitridovanej v plynnom prostredí je hrúbka nitridačnej vrstvy 0,2 mm a u vzorky iónovo nitridovanej je hrúbka nitridačnej vrstvy 0,3 mm.

Všetky sady zápustiek boli pred kovaním skenované pomocou 3D skenera, čím sa získal model zápustky pred kovaním na sledovanie veľkosti opotrebenia po odkovaní určitého počtu výkovkov.

V zápustkách bez aplikácie nitridácie bola v priebehu predchádzajúceho kovania daného výkovku zistená trvanlivosť do prvého prebrúsenia približne 600 ks výkovkov. Preto

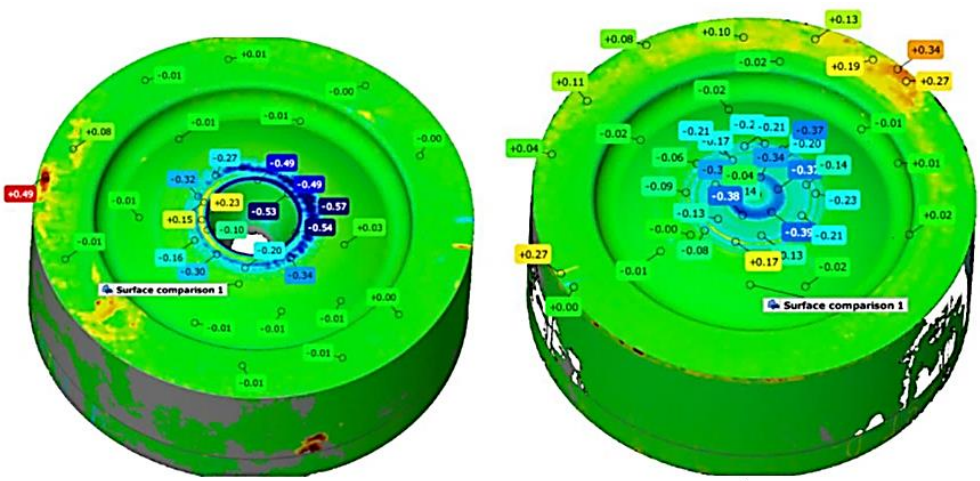
na porovnanie jednotlivých sád zápustiek pri rovnakých podmienkach kovania bola stanovená hranica 600 ks výkovkov, ktoré boli vykované na každej testovanej sade zápustiek.

Podmienky pri kovaní:

- použitý kovací stroj zvislý kovací lis LZK 2 500/4,
- teplota polotovaru pri kovaní 1 200 °C,
- pracovný takt 16 *až* 21 sekúnd,
- ručná obsluha kovacieho lisu,
- mazanie zápustky – manuálne mazadlom pri koncentrácii 1 : 10 (1 diel mazadla a 10 dielov vody).

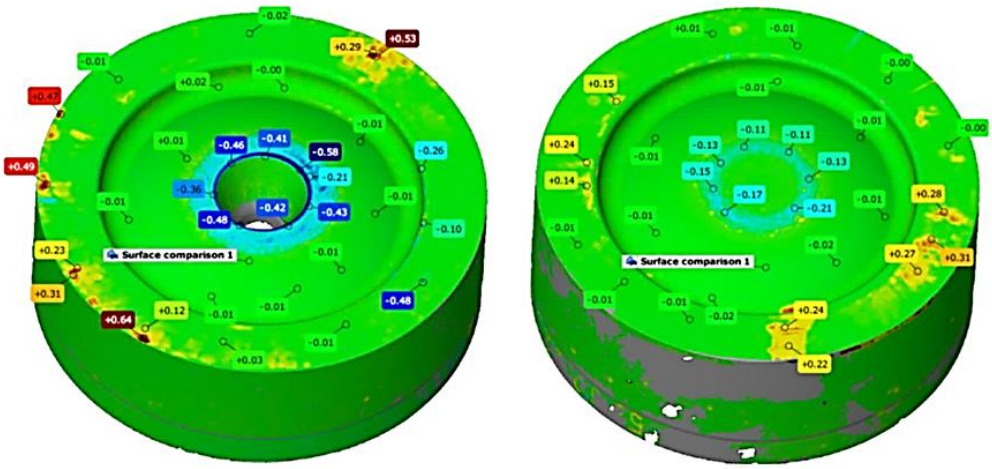
Po vykovaní rovnakého počtu 600 ks boli zápustky opäť skenované na sledovanie veľkosti opotrebenia. Bolo vykonané aj vizuálne posúdenie zápustiek pracovníkmi kovania, prípravy nástrojov a technickej prípravy výroby z hľadiska zváženia nutnosti ručného prebrúsenia zápustky priamo na kovacom lise pred opätovným nasadením do procesu kovania. Výsledky posúdenia opotrebenia kovacieho náradia po vykovaní série 600 ks prostredníctvom skenov zápustiek sú uvedené na Obr. 2.8, 2.9 a 2.10 a vizuálne posúdenie zápustiek je zdokumentované na Obr. 2.11, 2.12 a 2.13.

Trvanlivosť (základná životnosť resp. prevádzková životnosť) sa určila prerušením procesu kovania na základe medzioperačnej kontroly. Kovanie bolo zastavené v prípade, že sa opotrebenie zápustky začalo prenášať na predkovok v podobe rôznych vrypov.



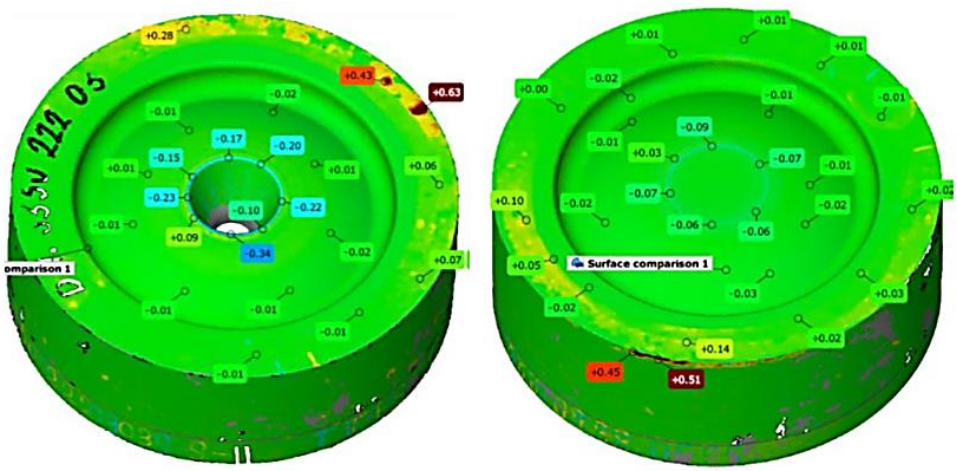
a b

Obr. 2.8. Sken dolnej časti zápustky (vzorka 1) bez nitridácie po vykovaní 600 ks (a), sken hornej časti zápustky (vzorka 1) bez nitridácie po vykovaní 600 ks výkovkov (b)



a b

Obr. 2.9. Sken dolnej časti zápustky (vzorka 2) nitridovanej v plynnom prostredí po vykovaní 600 ks (a), sken hornej časti zápustky (vzorka 2) nitridovanej v plynnom prostredí po vykovaní 600 ks výkovkov (b)



a b

Obr. 2.10. Sken dolnej časti zápustky (vzorka 3) iónovo nitridovanej po vykovaní 600 ks (a), sken hornej časti zápustky (vzorka 3) iónovo nitridovanej po vykovaní 600 ks výkovkov (b)

a b

Obr. 2.11. Pohľad na dolnú časť zápustky (vzorka 1) bez nitridácie po vykovaní 600 ks (a), pohľad na hornú časť zápustky (vzorka 1) bez nitridácie po vykovaní 600 ks výkovkov (b)

a b

Obr. 2.12. Pohľad na dolnú časť zápustky (vzorka 2) nitridovanej v plynnom prostredí po vykovaní 600 ks (a), pohľad na hornú časť zápustky (vzorka 2) nitridovanej v plynnom prostredí po vykovaní 600 ks výkovkov (b)

a b

Obr. 2.13. Pohľad na dolnú časť zápustky (vzorka 3) iónovo nitridovanej po vykovaní 600 ks (a), pohľad na hornú časť zápustky (vzorka 3) iónovo nitridovanej po vykovaní 600 ks výkovkov (b)

Na sade zápustiek 3 iónovo nitridovanej po vykovaní 600 ks výkovkov nebolo potrebné prebrúsenie a mohla byť ďalej použitá na kovanie. Na základe analýzy opotrebenia a vizuálneho hodnotenia povrchu sady zápustiek 1 bez nitridácie a sady zápustiek 2

nitridovanej v plynnom prostredí bolo nutné tieto zápustky prebrúsiť ručne priamo na kovacom lise, aby mohli byť použité na ďalšiu výrobu výkovkov.

Ukončenie testovania na kovanie malo za cieľ určiť, koľko kusov sa dá na danom náradí vyrobiť, kým bude nutné náradie renovovať. Výsledky skúšky sú uvedené v Tab. 2.8.

Tabuľka 2.8. Počet vykovaných kusov výkovkov do renovácie zápustky

Zápustka	***Počet vykovaných výkovkov do prebrúsenia nástroja***	***Počet vykovaných výkovkov po prebrúsení nástroja***	***Počet vykovaných výkovkov spolu***
1	600	820	1 420
2	600	2 480	3 080
3	4 064	2 435	6 499

Základná životnosť (trvanlivosť) zápustiek do renovácie bola najnižšia pri zápustkách bez nitridácie a najvyššia pri zápustkách iónovo nitridovaných. Zápustka iónovo nitridovaná vydržala na kovacej linke 4,5-krát dlhšie kovať ako zápustka bez nitridácie. Zápustka bez nitridácie musí byť približne 4-krát častejšie renovovaná ako iónovo nitridovaná zápustka pričom maximálny počet renovácií pri renovácii postupným znižovaním je v tomto prípade 6, vzhľadom na minimálnu výšku, ktorú ešte musí mať zápustka po renovácii aby mohla plniť svoju funkciu.

2.5 Boridovanie

V rámci výskumu ďalších možností zvýšenia trvanlivosti a životnosti zápustiek boli realizované experimentálne skúšky na overenie možnosti aplikácie boridovania nástrojovej ocele 19 552, použitej pri výrobe zápustiek na kovanie kolesa do diferenciálu osobného automobilu. Predpísané chemické zloženie ocele STN 41 9552 (1.2343) s označením Böhler W300 použitej pri výskume je uvedené v Tab. 2.9.

Tabuľka 2.9. Chemické zloženie ocele 19552 (1.2343) s označením Böhler W300 (JKZ, 2020)

Prvok	***C***	***Mn***	***Si***	***Mo***	***Cr***	***V***	***P***	***S***
obsah (hm. %)	0,32 *až* 0,42	0,20 *až* 0,50	0,80 *až* 1,20	1,10 *až* 1,60	4,50 *až* 5,50	0,35 *až* 0,60	max. 0,030	max. 0,030

2.5.1 Proces boridovania

Boridovanie sa používa na zvýšenie povrchovej tvrdosti, odolnosti proti opotrebeniu pri abrazívnom trení, klznom trení a trení za zvýšených teplôt. Boridovaná vrstva má žiaruvzdorné vlastnosti a je odolná proti tvorbe oxidov. Nasycovanie povrchovej vrstvy bórom možno realizovať pri všetkých typoch ocelí, v intervale teplôt 800 °C *až* 1 050 °C. Hrúbky boridovaných vrstiev sa najčastejšie pohybujú v rozsahu 0,1 *až* 0,3 mm a doba boridovania je najčastejšie 3 *až* 6 hodín. Vo všeobecnosti je povrch boridovanej ocele

tvorený vrstvou zlúčenín bóru, ktorá môže byť jednofázová, alebo dvojfázová. Jednofázová sa skladá z Fe_2B a dvojfázová vrstva je zložená z fázy FeB a z vnútornej fázy Fe_2B. Fáza FeB je tvrdšia a krehkejšia, má vyšší koeficient tepelnej rozťažnosti. Fáza Fe_2B je výhodnejšia, pretože tvorí povrch s vysokým tlakovým napätím a je menej krehká. Najvýhodnejšia je tvorba iba samotného boridu Fe_2B, alebo tvorba povrchovej vrstvy iba s malým podielom FeB. Vo väčšine boridických vrstiev je prítomné aj malé množstvo fázy FeB, čo má negatívny vplyv pokiaľ tieto nie sú spojité. (Hudáková a kol., 2008; Sedlická a kol., 2005; Moravčík a kol., 2010)

Pri boridovaní je priemerná hodnota mikrotvrdosti fázy FeB zvyčajne 1 800 *až* 2 200 HV 0,1 pri teplote boridovania 1 000 °C a fáza Fe_2B dosiahne hodnotu 1 600 *až* 1 800 HV 0,1 pri teplote boridovania 1 000 °C a čase boridovania 300 *až* 480 minút. Pri praktickej aplikácii na zápustky je nutné zvážiť aj spôsob zaťaženia zápustky.

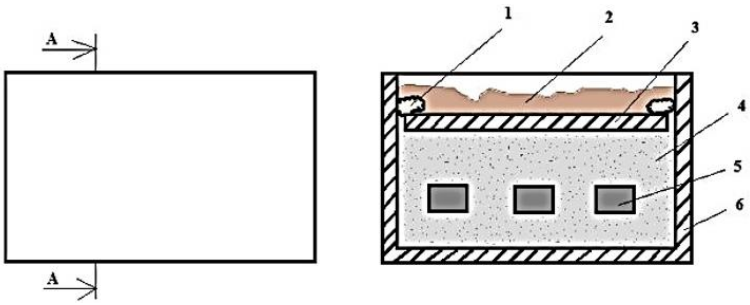
Nakoľko boridovanie prebieha pri vysokých teplotách nad teplotou popúšťania nástrojových ocelí určených na výrobu zápustiek a nástrojov pracujúcich za tepla musí po boridovaní nasledovať ešte kalenie a popúšťanie.

2.5.2 Experimentálne skúšky

Proces nasycovania povrchovej vrstvy bórom skúmanej ocele STN 41 9552 a vyhodnotenia vlastností boridickej vrstvy bol takýto:

- príprava vzoriek na boridovanie – rezanie a brúsenie vzoriek na rozmer 30 × 20 × 15 mm,
- proces boridovania – pomocou boridovacej zmesi Durborid za účelom získania boridickej vrstvy,
- overenie vlastností boridickej vrstvy – meranie mikrotvrdosti, zistenie hĺbky (hrúbky) nasýtenej vrstvy na základe metalografickej analýzy, skúšanie adhezívno-kohezívneho správania sa medzi tenkou boridickou vrstvou a substrátom (Mercedes test).

Skúšobné vzorky boli odrezané na požadované rozmery, povrchy vzoriek boli brúsené a potom leštené pomocou diamantových pást. Pred procesom boridovania boli vzorky odmastené. Na boridovanie boli použité kontajnery zo žiaruvzdornej ocele s rozmermi 85 × 80 × 125 mm (Obr. 2.14). Do prázdnych kontajnerov sa nasypala boridovacia zmes Durborid®, ktorá sa pred procesom boridovania vysušila v peci po dobu jednej hodiny pri teplote 100 °C. Vzorky boli ukladané na vrstvu boridovacej zmesi a potom zasypané ďalšou vrstvou (približne 30 mm). Na boridovaciu zmes sa uložila kovová platňa, ktorá bola utesnená vatou Al_2O_3. Potom bola platňa zasypaná rozdrveným sklom, ktoré slúžilo pri vysokých teplotách ako taviteľný uzáver na zabránenie vnikaniu kyslíka do kontajnera. (Dobrý, 2017)

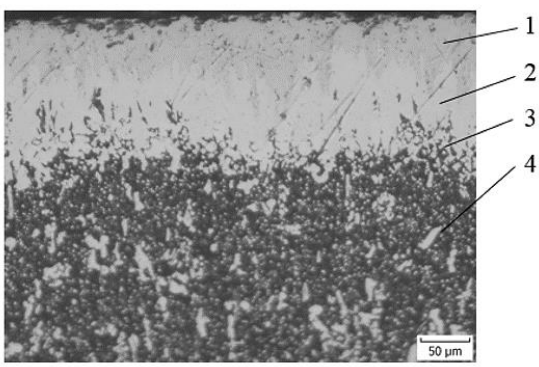


Obr. 2.14. Rez kontajnera na boridovanie
1 – termovit, 2 – taviteľný uzáver, 3 – kovová platňa, 4 – boridovacia zmes,
5 – vzorka, 6 – kontajner

Po príprave vzoriek a ich vložení do kontajnerov sa vykonalo boridovanie v elektrickej peci pri teplote 950, 1 000 a 1 050 °C s dobou boridovania 4, 6, 8, 10 hod. Po dosiahnutí teploty boridovania a požadovanej doby boridovania boli kontajnery so vzorkami vyberané postupne z pece a potom boli chladené na vzduchu.

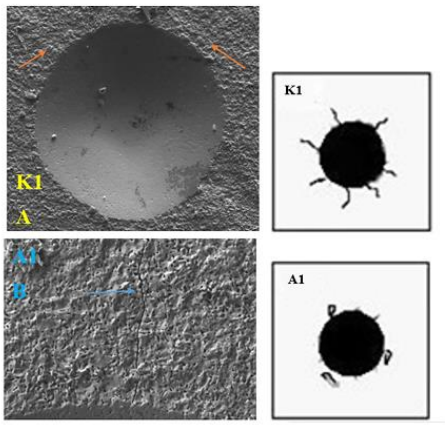
Na Obr. 2.15 je mikroštruktúra boridickej vrstvy získaná pri teplote boridovania 1 000 °C a dobe boridovania 10 hodín. Pri týchto parametroch sa dosiahla priemerná hrúbka boridickej vrstvy na úrovni 89 µm čo môžeme považovať za dostatočnú hrúbku z hľadiska aplikácie na zápustky.

Pri kratšej dobe boridovania pri teplote boridovania 1 000 °C sa priemerná dosahovaná hrúbka boridickej vrstvy pohybovala od 35 do 62 µm. Pri nástrojových oceliach doby boridovania musia byť dlhšie nakoľko vyšší obsah legujúcich prvkov najmä chrómu spomaľuje proces difúzie bóru do povrchovej vrstvy.

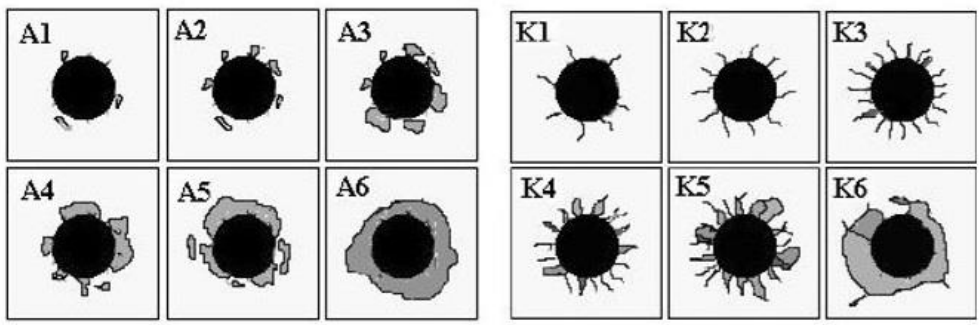


Obr. 2.15. Mikroštruktúra boridovanej vrstvy (1 000°C/10 hodín)
1 – FeB, 2 – Fe_2B, 3 – difúzna zóna, 4 – základný materiál

Na Obr. 2.16 je uvedený výsledok Mercedes testu určeného na stanovenie adhezíno-kohezínych vlastností boridickej vrstvy. Na základe etalónu uvedeného na Obr. 2.17 bola vzorka zaradená do kategórie K1, A1, čo svedčí o dobrých adhezívno-kohezínych vlastnostiach boridickej vrstvy.



Obr. 2.16. Výsledok Mercedes testu



Obr. 2.17. Etalón na vyhodnocovanie adhezívno-kohezívnych vlastnosti

Výsledky získané overovacími skúškami boridovania na skúšobných vzorkách potvrdili predpoklad na úspešnú aplikáciu danej technológie pri použití vhodných parametrov boridovania na zvýšenie trvanlivosti zápustiek pre oceľ 19 552 použitú na výrobu zápustiek na kovanie kolesa do diferenciálu osobného automobilu.

Záver

Cieľom prípadovej štúdie bolo poukázať na možnosti a riešenia umožňujúce dosiahnuť zvýšenú životnosť zápustiek pri výrobe výkovkov zápustkovým kovaním najmä v prípade veľkosériovej a hromadnej výroby výkovkov súvisiacej najmä s automobilovým priemyslom dominantným na Slovensku. V našom prípade išlo o výkovok kolesa do diferenciálu osobného automobilu, ktoré sa vyrába vo veľkých sériách na úrovni hromadnej výroby výkovkov.

Pri aplikácii metódy mechanického spevňovania povrchovej vrstvy zápustky sa potvrdil priaznivý účinok na zvýšenie trvanlivosti zápustky. Celkový počet vykovaných kusov do renovácie dosiahol hodnotu 3 321 ks výkovkov čo predstavovalo významný nárast trvanlivosti. Významné bolo najmä zvýšenie počtu vykovaných kusov do prvého

prebrúsenia priamo na kovacom lise o 100 % oproti zápustke iba tepelne spracovanej bez dodatočnej úpravy povrchovej vrstvy.

Na spevňovanie povrchových vrstiev dynamickým guľôčkovaním sa používa jednoúčelové zariadenie pracujúce na princípe otáčajúceho sa metacieho kolesa (metacích kolies). Takéto zariadenie sa využíva aj na spevňovanie povrchových vrstiev dynamicky vysoko namáhaných súčiastok, napr. pružín, torzných tyčí, hriadeľov a pod., najmä na zvýšenie únavovej pevnosti.

V prípade aplikácie nitridácie na zvýšenie trvanlivosti predkovacej dutiny pri kovaní daného kolesa do diferenciálu osobného automobilu sa potvrdil významný nárast trvanlivosti. V prípade nitridácie išlo o nitridáciu v plynnom prostredí a iónovú nitridáciu. Pri použití nitridácie v plynnom prostredí celkový počet kusov vykovaných predkovkov do renovácie dosiahol hodnotu 3 080 a pri použití iónovej nitridácie až hodnotu 6 499 kusov. Pri použití iónovej nitridácie počet vykovaných predkovkov do prebrúsenia realizovanom ručne priamo na kovacom lise dosiahol hodnotu až 4 064 ks. Veľmi významným prínosom najmä pri aplikácii iónovej nitridácie bolo predĺženie trvanlivosti, a tým aj k celkovej životnosti zápustky, čo viedlo nielen k zvýšeniu produktivity výroby, ale aj k zníženiu vstupných nákladov.

Pri realizácii experimentálnych skúšok zameraných na možnosť aplikácie boridovania na zvýšenie trvanlivosti a životnosti zápustiek boli na vzorkách skúmané vlastnosti boridovaním vytvorených povrchových vrstiev. Dobré výsledky z hľadiska aplikácie boridovania ocele 19 552 používanej na výrobu zápustiek sa dosiahli pri teplotách boridovania 1 000 ^{o}C a dobe boridovania 10 hodín, prípadne 1 050°C pri dobe boridovania 8 hodín. Boridická vrstva dosahovala pri týchto parametroch hrúbku 80 *až* 100 μm. Aj keď hrúbka boridickej vrstvy u tejto ocele, obsahujúcej vyššie percento chrómu je relatívne malá, možno predpokladať pri aplikácii boridovania na danú zápustku zvýšenie jej trvanlivosti. Lepšie výsledky z hľadiska aplikácie boridovania však možno očakávať u nástrojových ocelí pre prácu za tepla obsahujúcich menšie percento chrómu ako napríklad oceľ 19 663, čo bolo potvrdené aj experimentálnymi skúškami, ktoré však v tejto prípadovej štúdii nie sú uvádzané.

Zoznam bibliografických odkazov

BÍLIK, J. 2006. Životnosť zápustiek. *Kovárenství,* **27**, 6 – 10. ISSN 1213 – 9289.

BÍLIK, J. 2007. *Teoretické a technologické aspekty mechanického spevňovania povrchových vrstiev*. Trnava: AlumniPress. ISBN 978-80-8096-020-9.

BÖHLER. 2016. *Prevodník ocelí Böhler* [online] 2020 [cit. 2020-10-12]. Dostupné na internete:
https://www.bohler.sk/app/uploads/sites/110/2019/09/B%C3%B6hler-katal%C3%B3g-2016.pdf.

DOBRÝ, D. 2017. Zvyšovanie životnosti kovacieho náradia. Diplomová práca. Trnava: MTF STU.

HALADOVÁ, K. 2019. Zvyšovanie efektívnosti výroby zápustkových výkovkov. Diplomová práca. Trnava: MTF STU.

HAZLINGER, M. a MORAVČÍK, R. 2013. *Chemicko-tepelné spracovanie materiálov*. Nakladateľstvo STU Bratislava, 171s. ISBN 978-80-227-3924-5.

HUDÁKOVÁ, M., PINKE, P. a KUSÝ, M. 2008. Vplyv parametrov boridovania a prípravy povrchu na nástrojovú oceľ X210Cr12. In *Vedecké práce MtF STU v Bratislave so sídlom v Trnave. Research papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology in Trnava*. Č. 25 (2008), s. 63-68. ISSN 1336-1589.

JÍLEK, L. 2012. Zvyšování životnosti nástrojů pro kování. Hutnické listy. ISSN 0018-8069.

JÍLEK, L. 2018. Současný stav ve zvyšování životnosti zápustek. *Kovárenství*, 63, s. 15-23. ISSN 1213-9289.

JKZ. 2020. *Nástrojové oceli* [online] 2020 [cit. 2020-10-12]. Dostupné na internete: https://www.jkz.cz/cs/produkty/nastrojove-oceli/na-vyrobu-forem/w-nr-12343-esu/.

KURACINA, V., MORAVČÍK, R., HAZLINGER, M., BÍLIK, J. a KAPUSTOVÁ, M. 2020. Zvyšovanie životnosti zápustiek. *Kovárenství*, **72**, s. 20 – 25. ISSN 1213-9289.

MORAVČÍK, R.. HAZLINGER, M., HUDÁKOVÁ, M., MARTINKOVIČ,M. a ČIČKA, R. 2010. Náuka o materiáloch I. Trnava: AlumniPress.

ISBN 978-80-8096123-7.

MORAVČÍK, R. a HAZLINGER, M. 2017. *Degradation Processes and Life - Time Prediction*. Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk, s. r. o., Plzeň, pp. 310.

ISBN 978-80-7380-670-5.

PETRMICHL, R. 2017. Termo-mechanická analýza pro stanovení životnosti nástrojů zápustkového kování. *Kovárenství*, **63**, s. 24 – 27. ISSN: 12132-9289.

POKORNÝ, Z., KADLEC, J., HRUBÝ, V., POSPÍCHAL, M., TRAN, D. Q., MRÁZKOVÁ, T. a FECSO, L. 2011. Hardness of plasma nitrided layers created at different conditions. Chemické Listy 105, s.717.

SEDLICKÁ, V., HUDÁKOVÁ, M. a GRGAČ, P. 2005. Vplyv boridovacieho prášku na tvorbu boridickej vrstvy na oceli Böhler K 190 Isomatrix PM. The influence of borozing powder on boronized layer of Böhler K 190 Isomatrix PM steel. In *Materials Science and Technology [elektronický zdroj]*. Roč. 5, č. 5 [cit. 2005-12-29 (2005). ISSN 1335-9053.

3 OPTIMALIZÁCIA VÝROBY VÝTVARKU TECHNOLÓGIOU CNC KONVENČNÉHO TLAČENIA

ŠUGÁROVÁ, J. – ŠUGÁR, P. – PETROVIČ, J.

Úvod

Jedným z výrazných trendov v oblasti spracovania materiálov technológiou tvárnenia, zaznamenanom v ostatnom období, je zvýšený záujem o procesy, založené na princípe lokálnej plastickej deformácie materiálu, ktorá je realizovaná postupne v malých objemoch, prírastkovým (inkrementálnym) spôsobom. Takýto spôsob plastického pretvorenia materiálu, nazývaný inkrementálne tvárnenie (IF – Incremental Forming) sa v praxi uplatňuje v objemovom tvárnení a v nasledovných technologických procesoch plošného tvárnenia a v oblasti dokončovacích technológií, ako sú: vyklepávanie (Hammering), viacbodové tvárnenie (Multi-Point Forming), tvárnenie laserovým zväzkom (Laser Forming), tvárnenie kvapalinovým prúdom (Water Jet Forming), inkrementálne plošné tvárnenie (Incremental Sheet Forming), tlačenie (Metal Spinning), guličkovanie (Shot Peen Forming) a valčekovanie (Roller Peening). (Câmara, 2009) (Šugárová, 2016)

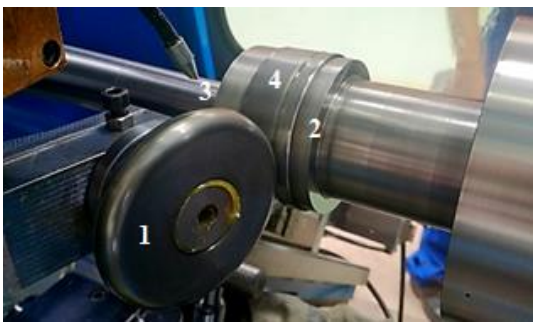
Medzi základné znaky aplikácie inkrementálneho pretvorenia materiálu v procesoch plošného tvárnenia patrí skutočnosť, že získanie požadovaného tvaru výtvarku možno aj bez použitia formy (pozitívneho alebo negatívneho modelu výtvarku), s použitím univerzálnych a relatívne ľahko dostupných výrobných zariadení. Pozitívum je aj vysoká pružnosť na zmeny výrobného sortimentu, čo predurčuje túto technológiu na využitie v segmente kusovej a malosériovej výroby. Druhou, nemenej dôležitou skutočnosťou je fakt, že v procese inkrementálneho tvárnenia sa zlepšujú – často významne – charakteristiky tvárniteľnosti spracovávaného materiálu (Emmens et al., 2010), ale aj výsledné exploatačné vlastnosti výtvarkov (Šugárová, 2008).

3.1 Technológia tlačenia

Pre proces tlačenia je charakteristické, že rotujúci polotovar, pôsobením tlačného nástroja sa postupne plasticky deformuje a nadobúda tvar predom zhotoveného modelu. (Šugár a Šugárová, 2009) Dochádza k prírastkovému pretvoreniu materiálu rotujúceho polotovaru (prístrihu, výtvarku alebo rúry) nástrojom (pri CNC tlačení je to najčastejšie kladka), ktorý v kontaktnom mieste pôsobí na polotovar a tvaruje ho do požadovaného tvaru natláčaním na tvárnicu (model), ako je uvedené na Obr. 3.1 (Music et al., 2010). V minulosti bol pohyb tlačného nástroja aktivovaný a riadený manuálne, neskôr hydraulicky. Začiatkom 70. rokov 20. storočia viedli neustále sa zvyšujúce požiadavky na skrátenie výrobného času výtvarku pri zachovaní jeho kvalitatívnych parametrov, k vývoju CNC strojov pre technológiu tlačenia, ktoré umožňujú väčšiu flexibilitu výroby, nakoľko pohyb tlačného nástroja môže byť vopred naprogramovaný. Týmto procesom možno vyrábať tvarovo zložité rotačne symetrické výtvarky s rôznym tvarom povrchovej krivky, ktorých tvar sa dosahuje na jednu, alebo viac operácií, pričom riadením dráhy nástroja a tvárniacej sily možno vyrobiť aj osovo asymetrické súčiastky. (Šugárová, 2016) CNC stroje, v porovnaní s hydraulicky vedenými pohybmi, rozšírili výrobné možnosti súčiastok, ktoré môžu byť touto technológiou vyrobené, však na druhej strane, nevýhodou týchto strojov je ich vysoká obstarávacia cena a tiež potreba kvalifikovanej pracovnej sily so skúsenosťami v programovaní (Wong et al., 2003).

V súčasnosti sa tvárnenie materiálu realizuje najmä použitím viacerých dopredných a spätných prechodov tlačného nástroja, ktoré prebieha pri teplote okolia. Existujú však

špeciálne prípady, keď je proces tlačenia realizovaný pri zvýšených teplotách, a to napr. pri výrobe súčiastok z hrubostenných materiálov alebo materiálov s nízkou hodnotou ťažnosti (Zhan et al. 2015). Technológia tlačenia je finančne efektívna najmä pre malosériovú výrobu (do 1 000 kusov), rozsiahlo je využívaná najmä pri výrobe prototypov. Na výrobu väčšieho počtu kusov je vhodnejšie aplikovať technológiu hlbokého ťahania, alebo kombináciu hlbokého ťahania a tlačenia. Výhodami tlačenia sú nízke tvárniace sily, jednoduchá konštrukcia náradia, flexibilita výrobného procesu, vysoká kvalita povrchu a dobré finálne vlastnosti výtvarku (Bewlay a Furrer, 2006).

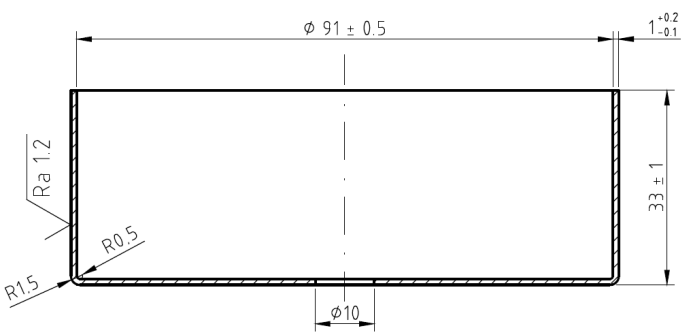


Obr. 3.1. Proces tlačenia
1 – kladka, 2 – model, 3 – upínací prípravok, 4 – výtvarok

V nasledujúcej časti štúdie bude uvedený postup návrhu a optimalizácie výroby valcového výtvarku technológiou CNC konvenčného tlačenia.

3.2 Voľba polotovaru

Voľba polotovaru vychádza z výrobného výkresu súčiastky, uvedeneného na Obr. 3.2. Je to súčiastka, ktorá sa aplikuje vo vzduchotechnike. Je vyrábaná z oceľového materiálu DC01 plechu nízkouhlíkovej ocele (1.0330; chemické zloženie materiálu je uvedené v Tab. 3.1 a mechanické vlastnosti získané podľa ISO 6892-1:2016 štandardnou skúškou jednoosovým ťahom sú uvedené v Tab. 3.2) s východiskovou hrúbkou s_0 = 1 mm.



Obr. 3.2. Tvar a rozmery výtvarku

Tabuľka 3.1. Chemické zloženie materiálu DC01(Alfun, 2018)

	C (hm. %)	***Mn*** (hm. %)	***P*** (hm. %)	***S*** (hm. %)	***Si*** (hm. %)	***Al*** (hm. %)
DC01	0,050	0,260	0,010	0,009	0,007	–

Tabuľka 3.2. Vybrané mechanické vlastnosti materiálu DC01 (Alfun, 2018)

Vlastnosť	***Hodnota***
Pevnosť v ťahu R_m (MPa)	297,0
Dohovorená medza sklzu $R_{p0,2}$ (MPa)	216,0
Tvrdosť podľa Vickersa HV0,05	125,8
Ťažnosť A_{80} (%)	38,1

Pri výpočte rozmeru východiskového polotovažru sa vychádza z objemu 3D CAD modelu výtvarku, a to: V_{3D} = 15 838,5 mm^3. Pri výpočte je nutné brať do úvahy aj technologický prídavok na strihanie, ktorý je definovaný koeficientom k_p. Objem prístrihu V_B sa vypočíta podľa (3.1), ako:

$$V_B = V_{3D} \cdot k_p = 15\,838{,}5 \cdot 1 = 15\,838{,}5 \text{ mm}^3 \qquad (3.1)$$

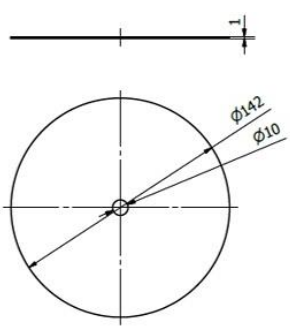
kde k_p je empirický koeficient technologického prídavku na strihanie prístrihu a jeho hodnota je 1.

Východiskový priemer polotovaru d_p sa opiera o zákon konštantnosti objemu a vypočíta sa podľa vzťahu (3.2):

$$d_p = \sqrt{\frac{4 \cdot V_B}{\pi \cdot s_0}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 15\,838{,}5}{\pi \cdot 1}} = 142{,}04 \cong 142 \text{ mm} \qquad (3.2)$$

kde s_0 je východisková hrúbka materiálu (mm).

Kruhový polotovar (prístrih) s priemerom 142 mm bol vyrezaný pomocou laserového zväzku. Laserovým zväzkom bol taktiež vytvorený kruhový otvor na dne výtvarku priemeru 10 mm (Obr. 3.3), ktorý slúži na upnutie a ustavenie prístrihu na model.



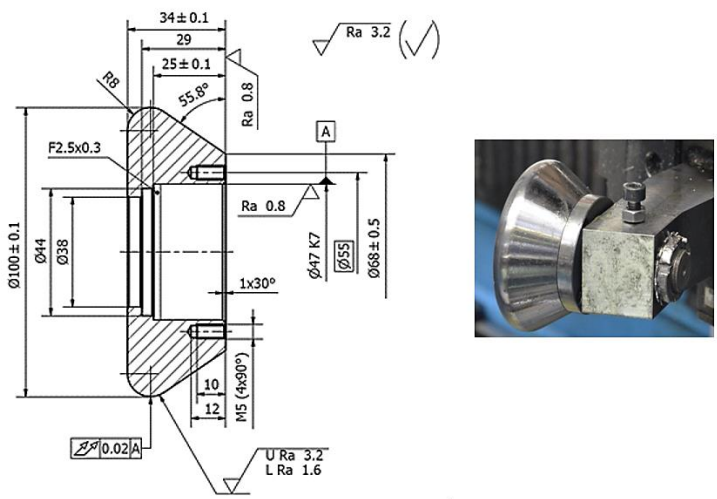
Obr. 3.3. Tvar a rozmery polotovaru

3.3 Návrh modelu a tlačného nástroja

Pri procese tlačenia sa na dosiahnutie požadovaného tvaru výtvarku používa trecí tlačný nástroj alebo tlačná kladka. Pri výrobe uvedeného výtvarku sa aplikovala tlačná kladka (Obr. 3.4), ktorej základné rozmery (priemer kladky D_K a polomer zaoblenia aktívnej časti kladky r_K boli navrhnuté podľa vzťahov (3.3) a (3.4) (Music et al. 2010):

$$D_K = 0{,}1 \cdot d_p + 120 \pm 60 = 0{,}1 \cdot 142{+}120{-}34{,}2 = 100 \text{ mm} \qquad (3.3)$$

$$r_K = (0{,}012 \; až \; 0{,}05) \cdot d_p = 0{,}05 \cdot 142 = 7{,}1 \text{ mm} \cong 8 \text{ mm} \qquad (3.4)$$



Obr. 3.4. Tvar a rozmery tlačnej kladky

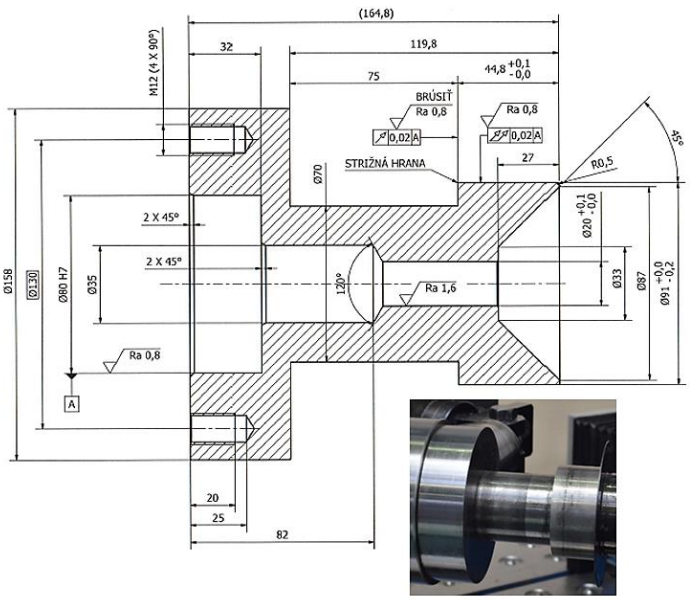
Ako materiál kladky bola zvolená nástrojová oceľ 90MnCrV8 (1.2842), ktorá bola kalená a potom popustená na tvrdosť 60 ± 1 HRC. Ide o nízkolegovanú mangánovo-chróm-vanádovú oceľ, určenú na prácu za studena (Bolzano, 2016). Vybrané mechanické vlastnosti nástrojového materiálu sú uvedené v Tab. 3.3.

Tabuľka 3.3. Vybrané mechanické vlastnosti materiálu 90MnCrV8 (Bolzano, 2016)

Vlastnosť	***Hodnota***
Pevnosť v ťahu R_m (MPa)	min. 860
Dohovorená medza sklzu $R_{p0,2}$ (MPa)	min. 771
Tvrdosť podľa Brinella HB	min. 229

Počas procesu tlačenia je prístrih pritláčaný k modelu (Obr. 3.5), ktorý definuje tvar budúceho výrobku. Je upevnený na vreteno výrobného stroja a rotuje spolu s polotovarom stanovenou frekvenciou otáčania.

Výber materiálu vhodného na výrobu modelu je podmienený najmä jeho životnosťou. Však výber materiálu je tiež determinovaný aj tvarom a rozmermi výtvarku, materiálom výtvarku a sériovosťou výroby. Napríklad modely z liatiny s lupienkovým grafitom sa používajú pri kusovej výrobe výtvarkov (od 10 do 100 kusov) najmä pri tvárnení mäkkých materiálov, modely z legovanej liatiny sa používajú pri výrobných dávkach 100 až 250 kusov. Pri počte vyrábaných kusov nad 250 (do 750) sa odporúča vyrábať modely z ocelí triedy 14 (napr. STN 41 4109) alebo 15 (napr. STN 41 5020) kalených na tvrdosť 60 HRC. Pre hromadnú výrobu je potom vhodné voliť nástrojovú oceľ triedy 19 (napr. STN 41 9573 alebo STN 41 9312) s následným kalením a popúšťaním na tvrdosť vyššiu ako 60 HRC. Rovnako dôležité je model vyrobiť s optimálnou kvalitou povrchu, t. j. drsnosť povrchu *Ra* by nemala byť vyššia ako 1,6 µm.



Obr. 3.5. Tvar a rozmery modelu

V našom prípade materiál modelu bola zvolená oceľ 16MnCr5 (1.7131), kalená a zošľachtená na tvrdosť 56 ± 2 HRC. Ide o nízkolegovanú ušľachtilú mangánovo-chrómovú oceľ, určenú na cementovanie. Vybrané mechanické vlastnosti nástrojového materiálu sú uvedené v Tab. 3.4.

Tabuľka 3.4. Vybrané mechanické vlastnosti materiálu 16MnCr5 (Virgamet, 2020)

Vlastnosť	***Hodnota***
Pevnosť v ťahu R_m (MPa)	min. 880
Dohovorená medza sklzu $R_{p0,2}$ (MPa)	min. 600
Tvrdosť podľa Brinella HB	min. 207

3.4 Návrh procesu tlačenia

Daná súčiastka bola vyrobená na CNC stroji ZENN 80 (fa DENN) (Obr. 3.6). Tento typ výrobného zariadenia je schopný tvárniť oceľové plechy do hrúbky 2 mm, plech z koróziivzdornej ocele do hrúbky 1 mm a hliníkové plechy do hrúbky 4 mm s maximálnym priemerom polotovaru 800 mm. Interval možného nastavenia frekvencie otáčania modelu je od 200 do 3 000 min^{-1} a veľkosti posuvu tlačného nástroja do 1 000 mm. Stroj je riadený prostredníctvom riadiaceho systému Siemens Sinumerik (DENN, 2016).

Obr. 3.6. CNC stroj ZENN 80 (DENN, 2016)

Technologické parametru procesu tlačenia boli zvolené takto:

- frekvencia otáčania modelu je definovaná vzťahom (3.5) (Hayama, 1989):

$$n = \frac{(9\,500 \text{ až } 320\,000)}{d_p} = \frac{113\,600}{142} = 800 \text{ min}^{-1} \tag{3.5}$$

kde d_p je východiskový priemer polotovaru (mm),

- uhol nastavenia tlačnej kladky β = 35° (tento uhol zviera os rotácie modelu s osou rotácie kladky),
- posuv kladky bol zvolený na 2 úrovniach, nakoľko najvýznamnejšie ovplyvňuje výslednú kvalitu výtvarku, a to f_1 = 0,4 mm a f_2 = 1,2 mm.

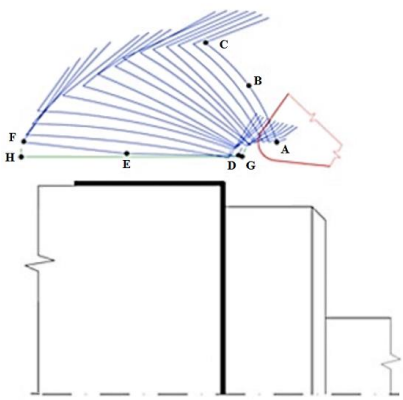
Tvar trajektórií nástroja rovnako významne ovplyvňuje kvalitu finálnych výtvarkov a je obzvlášť dôležitý v procesoch konvenčného tlačenia s viacnásobným prechodom nástroja. Na výrobných strojoch, určených na tlačenie, riadených počítačom v súčasnosti možno nastaviť rôzne tvary trajektórií nástroja, napr. lineárny, konvexný, konkávny, evolventný a pod. Optimálny počet dopredných a spätných prechodov a hlavne tvar trajektórií nástroja vedie k dosiahnutiu vysokej kvality produktu bez tvorby zvlnenia steny alebo porušenia súdržnosti materiálu súčiastky (Music et al., 2010). Konkrétne na výrobu výtvarku boli navrhnuté 3 typy trajektórií, a to konkávna, konvexná a lineárna. Návrh pri všetkých typoch

pozostával celkovo zo 16 dráh (15 tvárniacich a 1 kalibračnej). Sumárny prehľad vstupných technologických parametrov procesu je uvedený v Tab. 3.5.

Tabuľka 3.5. Vstupné technologické parametre procesu tlačenia

Parameter			
Typ trajektórie	konvexná	lineárna	konkávna
Posuv kladky f (mm)	0,4		1,2
Frekvencia otáčania modelu n (min^{-1})		800	

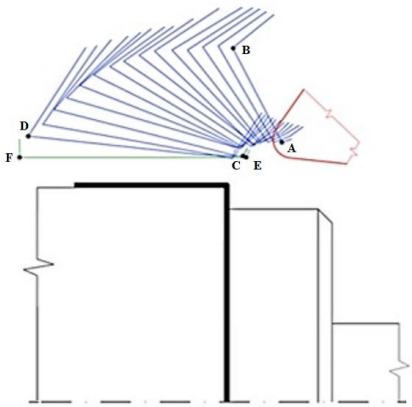
Na Obr. 3.7, 3.8 a 3.9 sú znázornené detaily, použitých tvarov trajektórií. Návrh pri všetkých typoch pozostával, ako už bolo uvedené, z 15 dopredných dráh (modrá farba) a jednej kalibračnej trajektórie (zelená farba). Jednotlivé súradnice vyznačených bodov, ktorými je definovaná krivka trajektórie, sú uvedené v Tab. 3.6, 3.7 a 3.8. Týmito bodmi bol definovaný matematický opis vybraných trajektórií (resp. častí trajektórií, keď je nástroj v kontakte s tvárneným materiálom) v tvare polynomickej funkcie.



Obr. 3.7. Konvexné trajektórie kladky

Tabuľka 3.6. Polynomická interpolácia vybraných konvexných profilov dráhy nástroja

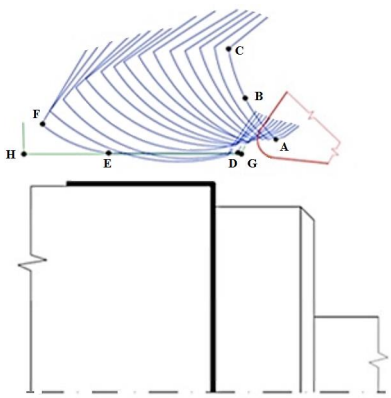
	X	***Y***	***Rovnica***
A	12,293	55,694	
B	6,230	67,999	$y = -0{,}065\,9 \cdot x^2 - 0{,}809 \cdot x + 75{,}6$
C	-3,534	77,634	
D	3,997	52,820	
E	-19,729	54,188	$y = -0{,}832 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 - 0{,}064 \cdot x + 52{,}94$
F	-43,454	55,693	
G	4,615	52,451	$y = 52{,}451$
H	-43,770	52,451	



Obr. 3.8. Lineárne trajektórie kladky

Tabuľka 3.7. Polynomická interpolácia vybraných lineárnych profilov dráhy nástroja

	X	***Y***	***Rovnica***
A	12,293	55,694	y = -1,92·x + 79,3
B	1,756	75,929	
C	3,997	52,582	y = -0,094 4·x + 53,06
D	- 41,926	57,016	
E	4,615	52,451	y = 52,451
F	-43,775	52,451	



Obr. 3.9. Konkávne trajektórie kladky

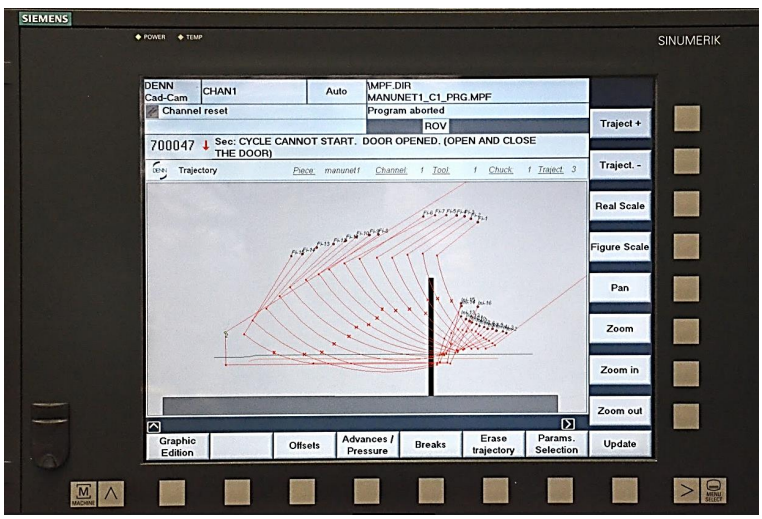
Tabuľka 3.8. Polynomická interpolácia vybraných konkávnych profilov dráhy nástroja

	X	***Y***	***Rovnica***
A	12,293	55,694	
B	5,443	64,988	$y = 0{,}153 \cdot x^2 - 4{,}072 \cdot x + 82{,}618$
C	1,756	75,939	
D	3,997	52,682	
E	-24,900	53,750	$y = 0{,}009\,8 \cdot x^2 + 0{,}206 \cdot x + 51{,}703$
F	-39,796	59,100	
G	4,615	52,451	y = 52,451
H	-43,775	52,451	

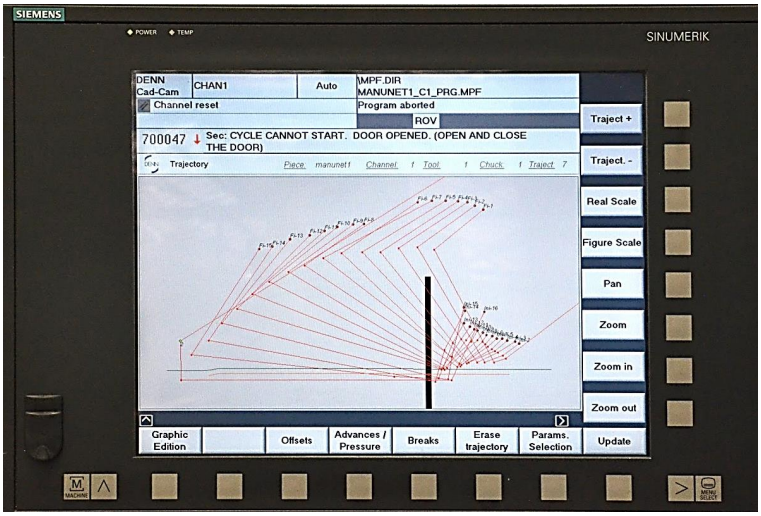
Tvorba NC kódu, potrebného na tvárnenie súčiastky prebieha priamo na riadiacom paneli stroja prostredníctvom softvéru DENN Cad-Cam (Obr. 3.10), kde sa navrhujú tvary trajektórie pohybu tvárniaceho nástroja (kladky) vzhľadom na polotovar, ich počet a aj smer pohybu kladky (dopredný, alebo spätný pohyb), ktoré majú zásadný vplyv na kvalitu finálneho produktu. Na Obr. 3.10 je uvedený návrh konkávnych, lineárnych (Obr. 3.11) a konvexných dráh (Obr. 3.12) NC programu.

Pri tvorbe kódu je postup takýto:

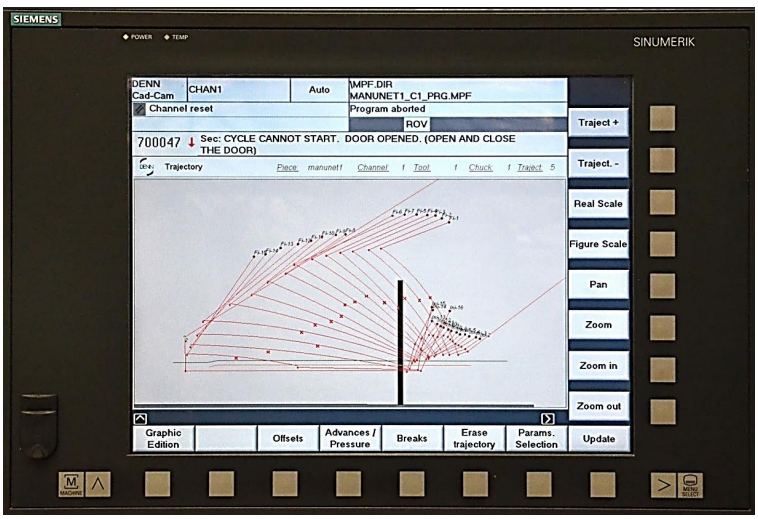
- V grafickom kresliacom softvéri (napr. AutoCad) sa zostroja náčrty obrysu modelu, polotovaru a tvárniaceho nástroja v pozíciách, ako budú umiestnené pri procese tvárnenia. Nasleduje import tohoto CAD súboru (tvar a rozmery), najčastejšie vo formáte *.dxf, do softvéru DENN Cad-Cam.
- Tvar a počet trajektórií tvárniaceho nástroja sa rovnako importuje vo formáte *.dxf, pričom je nutné ich navrhovať vzhľadom na nulový bod, ktorý je umiestnený v osi rotácie na rozhraní modelu a výtvarku. Potom možno v CAM softvéri veľmi ľahko graficky upravovať tvar a rozmery jednotlivých trajektórií podľa potreby metódou „*chyť a potiahni*“, čo umožňuje veľmi jednoduché programovanie pohybu nástroja.
- Jednotlivým dráham sa v nasledujúcom kroku priradia hodnoty posuvov kladky *f*, tvar a veľkosť posuv nájazdov a odjazdov nástroja, hodnota ofsetu a frekvencia otáčania modelu.
- Nakoniec je podľa definovaných informácií automaticky vygenerovaný NC kód, potrebný na realizáciu procesu tlačenia.



Obr. 3.10. Tvorba NC kódu na riadiacom paneli stroja pre konkávny typ dráhy kladky



Obr. 3.11. Tvorba NC kódu na riadiacom paneli stroja pre lineárny typ dráhy kladky



Obr. 3.12. Tvorba NC kódu na riadiacom paneli stroja pre konvexný typ dráhy kladky

3.5 Hodnotenie výtvarkov

Na základe stanovených technologických parametrov procesu tlačenia (kap. 3.4) bolo vyrobených 6 výtvarkov, ktorých kódy označenia vychádzajú zo skratiek KV – konvexná dráha, L – lineárna dráha a KK – konkávna dráha a číselného označenia frekvencie otáčania modelu a posuvu kladky, a ktoré sú uvedené v Tab. 3.9.

Tabuľka 3.9. Prehľad označenia výtvarkov

Typ trajektórie	***Frekvencia otáčania modelu n*** (min^{-1})	***Posuv kladky f*** (mm)	***Kód výtvarku***
konvexná trajektória	800	0,4	KV804
		1,2	KV812
lineárna trajektória		0,4	L804
		1,2	L812
konkávna trajektória		0,4	KK804
		1,2	KK812

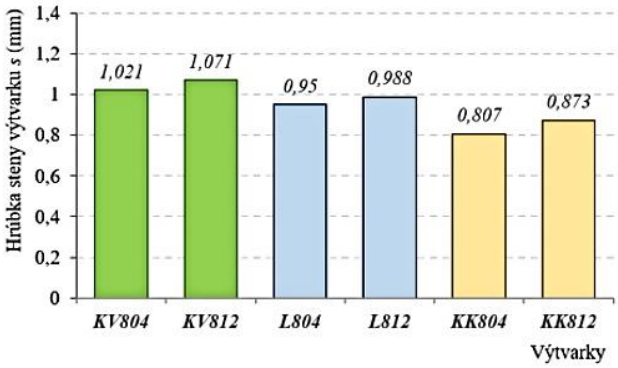
Hodnotenie odoziev procesu tlačenia sa orientovalo na tvarové a rozmerové parametre výtvarkov (hrúbka steny, výška steny a uhol odpruženia steny) a integritu povrchovej vrstvy výtvarkov (drnosť povrchu a mikrotvrdosť povrchovej vrstvy).

Meranie hrúbky steny výtvarku *s* sa realizovalo mikrometrom s kužeľovými dotykmi (Obr. 3.13) v strede výšky steny (približne 15 mm odo dna výtvarku) v smere valcovania východiskového polotovaru. Meranie sa opakovalo 3-krát, z ktorých sa potom vypočítala stredná hodnota a stredná aritmetická odchýlka. V Tab. 3.10 sú uvedené stredné hodnoty hrúbky všetkých hodnotených výtvarkov a ich grafické porovnanie je uvedené na Obr. 3.14.

Obr. 3.13. Meradlá na hodnotenie tvarových a rozmerových parametrov výtvarkov

Tabuľka 3.10. Hrúbka steny výtvarku s (s_0 = 1,005 ± 0,01 mm (merané na východiskovom polotovare))

Výtvarok	***KV804***	***KV812***	***L804***	***L812***	***KK804***	***KK812***
s (mm)	1,021 ± 0,003	1,071 ± 0,004	0,950 ± 0,003	0,988 ± 0,002	0,807 ± 0,004	0,873 ± 0,006

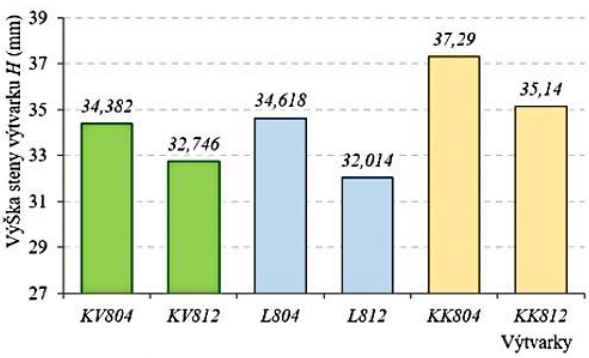


Obr. 3.14. Porovnanie nameraných hrúbok stien výtvarkov

Meranie výšky steny výtvarku *H* sa realizovalo posuvným meradlom (Obr. 3.13) v smere valcovania polotovaru. Meranie sa opakovalo 3-krát, z ktorých sa potom vypočítala stredná hodnota a stredná aritmetická odchýlka. V Tab. 3.11 sú uvedené stredné hodnoty výšky všetkých hodnotených výtvarkov a ich grafické porovnanie je uvedené na Obr. 3.15.

Tabuľka 3.11. Výška steny výtvarku H (H_0 = 33 ± 1 mm (na výkrese))

Výtvarok	***KV804***	***KV812***	***L804***	***L812***	***KK804***	***KK812***
H (mm)	34,382 ± 0,009	32,746 ± 0,016	34,618 ± 0,011	32,014 ± 0,005	37,290 ± 0,011	35,140 ± 0,028

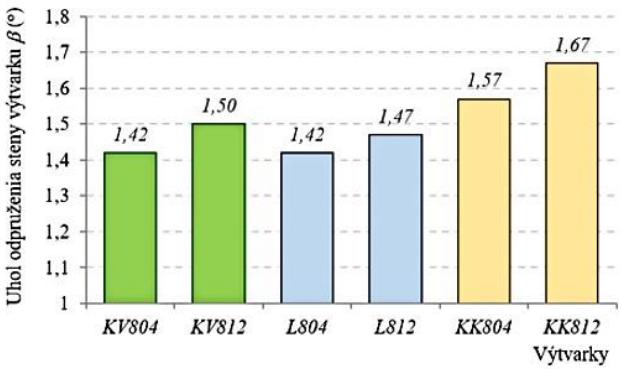


Obr. 3.15. Porovnanie nameraných výšok stien výtvarkov

Meranie uhla odpruženia steny výtvarku β sa realizovalo optickým uhlomerom (Obr. 3.13) v smere valcovania polotovaru. Meranie sa opakovalo 3-krát, z ktorých sa potom vypočítala stredná hodnota a stredná aritmetická odchýlka. V Tab. 3.12 sú uvedené stredné hodnoty uhlov odpruženia všetkých hodnotených výtvarkov a ich grafické porovnanie (s údajmi uvedenými v stupňoch) je uvedené na Obr. 3.16.

Tabuľka 3.12. Uhol odpruženia β (α = 90º (uhol, ktorý zviera stena a dno výtvarku (na výkrese))

Výtvarok	***KV804***	***KV812***	***L804***	***L812***	***KK804***	***KK812***
β (º)	1º 25′ ± 2′	1º 30′ ± 1′	1° 25' ± 3'	1° 28' ± 2'	1º 34′ ± 1′	1º 40′ ± 1′



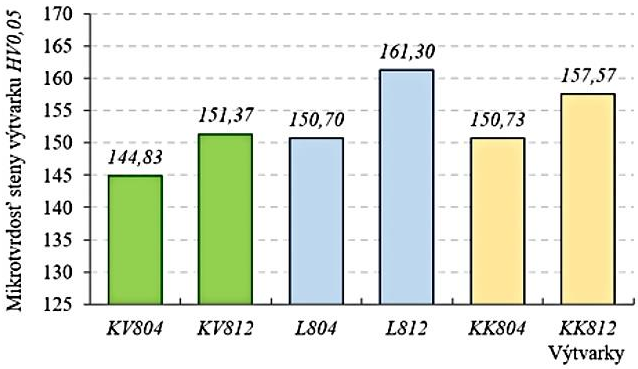
Obr. 3.16. Porovnanie nameraných uhlov odpruženia stien výtvarkov

Meranie mikrotvrdosti povrchovej vrstvy steny výtvarku *HV0,05* sa realizovalo na zariadení IndentaMet 1 100 (fa Buehler) (Obr. 3.17) v strede výšky steny (približne 15 mm odo dna výtvarku) v smere valcovania polotovaru podľa normy STN EN ISO 6507-1:2006. Meranie sa opakovalo 3-krát, z ktorých sa potom vypočítala stredná hodnota a stredná aritmetická odchýlka. V Tab. 3.13 sú uvedené stredné hodnoty mikrotvrdosti všetkých hodnotených výtvarkov a ich grafické porovnanie je uvedené na Obr. 3.18.

Obr. 3.17. Meracie zariadenie IndentaMet 1 100

Tabuľka 3.13. Mikrotvrdosť HV 0,05 (hodnota mikrotvrdosti polotovaru pred tvárnením 125,80 ± 2,70 (merané na východiskovom polotovare))

Výtvarok	***KV804***	***KV812***	***L804***	***L812***	***KK804***	***KK812***
HV 0,05	144,83 ± 1,11	151,37 ± 2,98	150,70 ± 3,30	161,30 ± 1,20	150,73 ± 2,89	157,57 ± 3,11



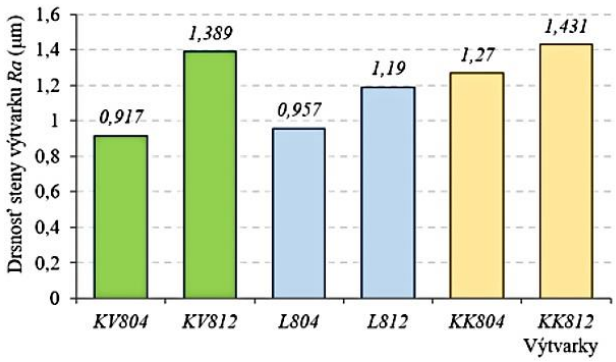
Obr. 3.18. Porovnanie nameraných hodnôt mikrotvrdosti stien výtvarkov

Meranie parametra drsnosti steny výtvarku *Ra* sa realizovalo na zariadení Surftest SJ 210 (fa Mitutoyo) (Obr. 3.19) v strede výšky steny (približne 15 mm odo dna výtvarku) v smere valcovania polotovaru polotovaru podľa normy STN EN ISO 6507-1:2006. Meranie sa opakovalo 3-krát, z ktorých sa potom vypočítala stredná hodnota a stredná aritmetická odchýlka. V Tab. 3.14 sú uvedené stredné hodnoty mikrotvrdosti všetkých hodnotených výtvarkov a ich grafické porovnanie je uvedené na Obr. 3.20.

Obr. 3.19. Meracie zariadenie Surftest SJ 210

Tabuľka 3.14. Parameter drsnosti Ra (východiskový stav: 0,985 ± 0,08 µm (merané na východiskovom polotovare))

Výtvarok	***KV804***	***KV812***	***L804***	***L812***	***KK804***	***KK812***
Ra (µm)	0,917 ± 0,045	1,389 ± 0,048	0,957 ± 0,031	1,190 ± 0,030	1,270 ± 0,037	1,431 ± 0,036



Obr. 3.20. Porovnanie nameraných hodnôt parametra drsnosti stien výtvarkov

3.6 Optimalizácia procesu tlačenia

V procese optimalizácie sa opiera o metodiky výberu variantov a ich ďalšie hodnotenie. Ide o proces hľadania optimálneho variantu riešenia (v našom prípade optimálnu kombináciu technologických parametrov procesu tlačenia) a je determinovaný stanovenými kritériami, t. j. splnením stanovených podmienok. Metodika výberu zložitejších variantov a ich hodnotenie sa môže realizovať napr. bodovacou metódou, metódou konečného účinku, metódou výsledného efektu, alebo histogramovou metódou. Metód optimalizácie, či rozhodovania, je však viac a rozdeľujú sa na: *exaktné*, kde patria metódy operačného výskumu, ďalej *empirické*, kde patria analytické, alebo intuitívne metódy a *heuristické*, ktoré vychádzajú z rozhodovacej analýzy.

V našom prípade ide o optimalizáciu, kde bude sledovaných 5 odoziev výrobného procesu, preto bude aplikovaná metóda bodovacia, ktorá sa zaraďuje do skupiny tzv. expertných metód. Pri tejto metóde je dôležité stanovenie si kritérií a ich hodnoty. Stanovením hodnoty, či intervalu hodnôt možno niektorým hodnoteným kritériám zvýšiť tzv. váhu, a tým zdôrazniť jeho dôležitosť v porovnaní s ostatnými kritériami.

3.6.1 Hodnotenie hrúbky steny výtvarku

Na vyhodnotenie hrúbky steny výtvarku bola stanovená bodová stupnica na základe priblíženia sa odmeranej a vyhodnotenej reálnej hrúbky steny výtvarku k hodnote predpísanej na výkrese výtvarku (Obr. 3.2), ktorá je vyhovujúca v intervale od 0,9 do 1,2 mm. Na základe prvého hodnotenia danému intervalu nevyhovujú hrúbky steny výtvarkov KK804 a KK812. Na presnejšie hodnotenie bol stanovený prístup, že optimálna hrúbka je hrúbka, ktorá sa najviac priblíži hodnote 1 mm, pričom z hľadiska exploatácie pri zhode rozdielu od referenčnej hrúbky vyššia váha (bonita) bude pridelená pre nárast hrúbky steny výtvarku, a to vynásobením pridelených bodov s koeficientom 1,4. Výtvarkom, ktorých hrúbka nevyhovuje stanovenej predpísanej hodnote bude pridelených 0 bodov. Jednotlivé pridelené body sú uvedené v Tab. 3. 16.

Hodnotiaci interval na hodnotenie hrúbky je:

- (od 0,90 do 0,950) mm: 4 body,
- (od 0,950 do 1,000) mm: 6 body,
- (od 1,000 do 1,050) mm: 10 bodov,
- (od 1,050 do 1,100) mm: 6 body (× 1,4),
- (od 1,150 do 1,200) mm: 4 body (× 1,4).

3.6.2 Hodnotenie výšky steny výtvarku

Na vyhodnotenie výšky steny výtvarku bola stanovená bodová stupnica na základe priblíženia sa nameranej a vyhodnotenej reálnej výšky steny výtvarku k hodnote predpísanej na výkrese výtvarku (Obr. 3.2), ktorá je vyhovujúca v intervale od 32 do 34 mm. Na základe prvého hodnotenia danému intervalu nevyhovujú hrúbky steny výtvarkov KV804, L804, KK804 a KK812. Na presnejšie hodnotenie bol stanovený prístup, že optimálna výška je výška, ktorá sa najviac priblíži hodnote 33 mm, pričom z hľadiska exploatácie pri zhode rozdielu od referenčnej hrúbky vyššia váha (bonita) bude pridelená pre menšiu výšku steny výtvarku, a to vynásobením pridelených bodov s koeficientom 1,4. Výtvarkom, ktorých výška nevyhovuje stanovenej predpísanej hodnote bude pridelených 0 bodov. Jednotlivé pridelené body sú uvedené v Tab. 3.16.

Hodnotiaci interval na hodnotenie výšky je:

- (od 32,00 do 32,50) mm: 4 body (× 1,4),
- (od 32,50 do 33,00) mm: 8 body (× 1,4),
- (od 33,00 do 33,50) mm: 8 bodov,
- (od 33,50 do 34,00) mm: 4 body.

3.6.3 Hodnotenie uhla odpruženia steny výtvarku

Na vyhodnotenie uhla odpruženia steny výtvarku sa stanovila bodová stupnica na základe priblíženia sa nameranej a vyhodnotenej reálnej hodnoty uhla odpruženia k hodnote definovanej na výkrese výtvarku (Obr. 3.2). Nakoľko na výkrese tolerančný interval nie je určený, ako refrenčný uhol, ktorý je nutné odsiahnuť, je uhol 90° medzi stenou a dnom výtvarku. Hodnotenie bude realizované prístupom, že najvyšší počet bodov bude pridelených výtvarku, ktorého stena dosiahne namenší uhol odpruženia. Veľkosť intervalu je navrhnutá v rozsahu 0° 05´, čo je stanovené na základe tolerancií netolerovaných uhlov, podľa normy STN 01 4270 pre výšku 33 mm a stupeň presnosti 10, (Konštruovanie I., 2012). Vo všetkých prípadoch nameraných uhlov odpruženia bola prekročená hodnota 1°, preto je hodnotiaca stupnica, uvedená nižšie, definovaná len pre interval od 1° do 2°.

V prípade, že by sa hodnoty uhla pohybovali od 0° do 1°, pridelené body (tak ako sú definované pre interval od 1° do 2°) by sa navýšili vynásobením s koeficientom 1,4, z dôvodu presnejšieho dosiahnutia tvarovej presnosti výtvarku. V prípade, že by sa hodnoty uhla pohybovali od 2° do 3°, pridelené body (tak ako sú definované pre interval od 1° do 2°) by sa znížili vynásobením s koeficientom 0,4, z dôvodu vyššej nepresnosti vyrobenej valcovej plochy výtvarku. Jednotlivé pridelené body sú uvedené v Tab. 3.16.

Hodnotiaci interval na hodnotenie uhla odpruženia steny od 1° do 2° je:

- (od 1° 00´ do 1° 05´) mm: 12 bodov,
- (od 1° 05´ do 1° 10´) mm: 11 bodov,
- (od 1° 10´ do 1° 15´) mm: 10 bodov,
- (od 1° 15´ do 1° 20´) mm: 9 bodov,
- (od 1° 20´ do 1° 25´) mm: 8 bodov,
- (od 1° 25´ do 1° 30´) mm: 7 bodov,
- (od 1° 30´ do 1° 35´) mm: 6 bodov,
- (od 1° 35´ do 1° 40´) mm: 5 bodov,
- (od 1° 40´ do 1° 45´) mm: 4 body,
- (od 1° 45´ do 1° 50´) mm: 3 body,
- (od 1° 50´ do 1° 55´) mm: 2 body,
- (od 1° 55´ do 2° 00´) mm: 1 bod.

3.6.4 Hodnotenie mikrotvrdosti steny výtvarku

Na vyhodnotenie mikrotvdosti steny výtvarku bola stanovená bodová stupnica na základe dosiahnutého pomerného spevnenia materiálu (*PSM*). Jeho hodnota sa vypočíta podľa vzťahu (3.6) z nameraných a vyhodnotených hodnôt mikrotvrdosti základného materiálu (prístrihu) (HV_{ZM}) a mikrotvrdosti nameranej na jednotlivých výtvarkoch ($HV_{V(x)}$):

$$PSM = \frac{(HV_{V(x)} - HV_{ZM})}{HV_{ZM}} \cdot 100\ \% \qquad (3.6)$$

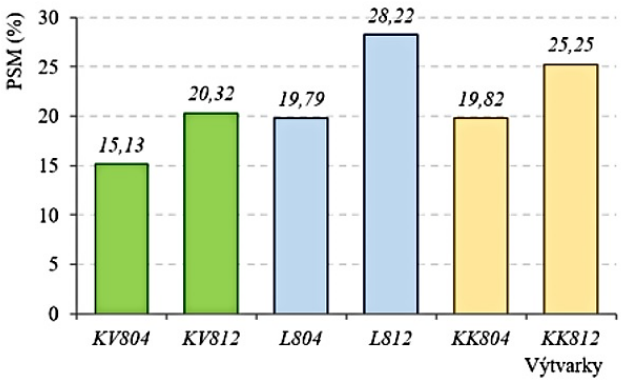
kde HV_{ZM} je mikrotvdosť základného materiálu pred tlačením (125,80 ± 2,70),
$HV_{V(x)}$ – mikrotvrdosť výtvarku v definovanej pozícii na stene výtvarku.

Príklad výpočtu *PSM* pre výtvarok KV804 uvádza vzťah (3.7). Všetky vypočítané hodnoty *PSM* uvádza Tab. 3.15 a ich grafické porovnanie je uvedené na Obr. 3.21.

$$PSM = \frac{\left(HV_{V(KV804)} - HV_{ZM}\right)}{HV_{ZM}} \cdot 100 = \\ = \frac{(144{,}83 - 125{,}80)}{125{,}80} \cdot 100 = 15{,}13\ \% \qquad (3.7)$$

Tabuľka 3.15. Pomerný stupeň spevnenia materiálu na hodnotených výtvarkoch

Výtvarok	***KV804***	***KV812***	***L804***	***L812***	***KK804***	***KK812***
PSM (%)	15,13	20,32	19,79	28,22	19,82	25,25



Obr. 3.21. Porovnanie hodnôt PSM stien výtvarkov

Pri vyhodnocovaní mikrotvrdosti prostredníctvom *PSM* sa vychádzalo z prístupu zohľadnenia výslednej exploatácie výtvarku, a to tým, že vyššie spevnenie materiálu determinuje lepšiu odolnosť povrchu voči abrazívnemu opotrebeniu, a teda najvyšší počet bodov bude pridelený výtvarku s najvyššou hodnotou *PSM*. Na základe získaných hodnôt bol stanovený hodnotiaci interval a hodnotiaca škála *PSM* od 14 do 30 %. Jednotlivé pridelené body sú uvedené v Tab. 3.16.

Hodnotiaci interval na hodnotenie *PSM* steny výtvarku je:

- (od 14 do 18) %: 4 body,
- (od 18 do 22) %: 6 bodov,
- (od 22 do 26) %: 8 bodov,
- (od 26 do 30) %: 10 bodov.

3.6.5 Hodnotenie drsnosti steny výtvarku

Na vyhodnotenie drsnosti steny výtvarku (parameter *Ra*) bola stanovená bodová stupnica na základe priblíženia sa nameranej a vyhodnotenej reálnej hodnoty parametra drsnosti k hodnote predpísanej na výkrese výtvarku (Obr. 3.2), ktorá je vyhovujúca do hodnoty 1,2 μm. Na základe prvého hodnotenia danej hodnote nevyhovujú výtvarky KV812, KK804 a KK812. Na presnejšie hodnotenie bol stanovený prístup, že optimálna drsnosť je drsnosť, ktorá nadobudne čo najnižšiu hodnotu drsnosti, pričom spodná hranica drsnosti bola stanovená drsnosť dokončovacích metód, a to 0,4 μm. Výtvarkom, ktorých hodnota drsnosti prekročila hodnotu 1,2 μm bude pridelených 0 bodov. Jednotlivé pridelené body sú uvedené v Tab. 3.16.

Hodnotiaci interval na hodnotenie parametra drsnosti steny výtvarku *Ra* je:

- (od 0,4 do 0,5) μm: 8 bodov,
- (od 0,5 do 0,6) μm: 7 bodov,
- (od 0,6 do 0,7) μm: 6 bodov,
- (od 0,7 do 0,8) μm: 5 bodov,
- (od 0,8 do 0,9) μm: 4 body,
- (od 0,9 do 1,0) μm: 3 body,

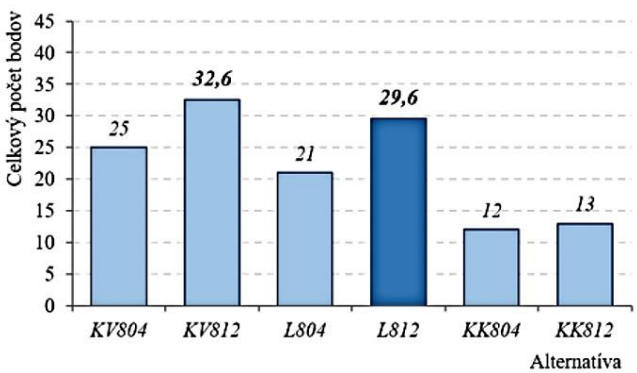
- (od 1,0 do 1,1) μm: 2 body,
- (od 1,1 do 1,2) μm: 1 bod.

3.6.6 Celkové hodnotenie výtvarkov

Na základe vyššie definovaných hodnotiacich intervalov boli jednotlivým výtvarkom hodnotené dosiahnuté odozvy (kritériá), ktoré uvádza Tab. 3.16 a Obr. 3.22, kde sú definované čiastkové aj celkové hodnoty dosiahnutých bodov, na základe ktorých bolo stanovené poradie kvality výtvarkov, resp. poradie alternatív kombinácií technologických parametrov, a tým optimálna kombinácia typu trajektórie nástroja, frekvencie otáčania modelu a posuvu kladky.

Tabuľka 3.16. Hodnotenie dosiahnutej kvality výtvarkov aplikáciou bodovacej metódy

	KV804	***KV812***	***L804***	***L812***	***KK804***	***KK812***
Hrúbka steny	10	8,4	4	6	0	0
Výška steny	0	11,2	0	5,6	0	0
Uhol odpruženia	8	7	8	7	6	5
PSM	4	6	6	10	6	8
Drsnosť	3	0	3	1	0	0
Body spolu	**25**	**32,6**	**21**	**29,6**	**12**	**13**
PORADIE	**III.**	**I.**	**IV.**	**II.**	**VI.**	**V.**



Obr. 3.22. Porovnanie dosiahnutých bodov hodnotených výtvarkov (KV812 – variant s najvyšším počtom bodov, L812 – optimálny variant)

Z čiastového pohľadu na jednotlivé hodnotené odozvy (Tab. 3.16) najvyšší počet bodov pri hrúbke steny výtvarku dosiahla alternatíva KV804 (10 b) a pri výške výtvarku alternatíva KV812 (11,2 b). Čo sa týka uhla odpruženia, tak až v dvoch prípadoch bola bodová hodnota maximálna, a to 8 bodov v prípade výtvarkov KV804 a L804. Pri integrite povrchovej vrstvy steny výtvarku, konkrétne pri *PSM* najvyššia bodová hodnota bola dosiahnutá pri výtvarku L812 (10 b) a pri hodnotení drsnosti povrchu až dve alternatívy (KV804 a L804) dosiahli

3 body, čo je najvyšší počet bodov. Je nutné však aj konštatovať, že z hľadiska predpísaných parametrov na výkrese, ako sú výška a hrúbka steny výtvarku a drsnosť povrchu, sú nevyhovujúce alternatívy KK804 a KK812, pretože ani v jednom prípade neboli tieto hodnoty dosiahnuté, z čoho vyplýva, že pre tento tvarový typ výtvarku nie je vhodné voliť konkávnu trajektóriu tlačného nástroja.

Záver

Cieľom predkladanej štúdie bolo podrobné definovanie návrhu technologického postupu výroby výtvarku technológiou CNC konvenčného tlačenia spolu s návrhom vyrobného stroja a nástrojov (modelu a kladky), kde okrem návrhu ich geometrie bola časť venovaná aj návrhu vhodných nástrojových materiálov a ich tepelnému spracovaniu, ale tiež návrhu rozmeru východiskového polotovaru, ktorý zasadným spôsobom determinuje v kombinácii s geometrickými a technologickými parametrami výslednú kvalitu finálnych výtvarkov.

Nakoľko v procese tlačenia do procesu vstupuje viacero parametrov, ako bolo vyššie spomenuté, na stanovenie optimálnej kombinácie technologických parametrov bola aplikovaná bodovacia metóda, kde boli hodnotené odozvy, ako hrúbka a výška steny výtvarku, uhol odpruženia steny výtvarku, dosiahnutá mikrotvrdosť, resp. pomerné spevnenie povrchovej vrstvy a drsnosť povrchu.

Na základe navrhnutých hodnotiacich intervalov pre jednotlivé kritériá (odozvy procesu) (Tab. 3.16) možno konštatovať, že konkávny typ dráhy pri obidvoch posuvoch kladky a danej frekvencii otáčania modelu (KK804 a KK812) nie je pre tento tvarový typ výtvarku vhodný, nakoľko neboli dosiahnuté hodnoty hrúbky a výšky steny výtvarku, predpísané na výrobnom výkrese. Rovnako uhol odpruženia nadobúdal najväčšie hodnoty. Jediná relatívne pozitívna odozva je pri pomernom spevnení materiálu, však negatívom je, že ani v jednom prípade hodnota parametra drsnosti *Ra* nebola dosiahnutá, teda obidve hodnoty prekročili limitnú hodnotu 1,2 μm, pričom na výtvarku KK812 bola nameraná najvyššia hodnota (1,431 ± 0,036 μm) zo všetkých výtvarkov.

Podobné konštatovanie je možné v prípade výtvarkov KV804 a L804, pri ktorých neboli dosiahnuté vhodné hodnoty výšky steny výtvarkov, ale naopak pri týchto alternatívach boli dosiahnuté veľmi dobré hodnoty uhla odpruženia, pomerného spevnenia materiálu a vynikajúce hodnoty dosiahnutého parametra drsnosti povrchu, pričom na výtvarku KV804 bola nameraná najnižšia hodnota (0,917 ± 0,045 μm) zo všetkých výtvarkov.

Najvyší počet bodov (Obr. 3.20) dosiahli výtvarky vyrobené pri konvexnej dráhe kladky s frekvenciou otáčania modelu 800 min^{-1} a posuve kladky 1,2 mm (KV812/32,6 bodov) a pri lineárnej dráhe kladky s frekvenciou otáčania modelu 800 min^{-1} a posuve kladky 1,2 mm (L812/29,6 bodov). V obidvoch prípadoch boli dosiahnuté dobré parametre hrúbky a výšky steny výtvarkov a rovnaké konštatovanie je možné pri hodnotách uhla odpruženia a pomerného spevnenia materiálu. Čo sa týka parametra drsnosti *Ra*, výtvarok L812 dosiahol predpísanú hodnotu na výkrese (1,190 ± 0,030 μm), však v prípade výtvarku KV812 tento limit bol prekročený (1,389 ± 0,048 μm).

Na základe uvedeného možno definovať optimálne parametre konvenčného tlačenia, a to na základe dosiahnutia najvyššieho počtu bodov z maximálnych možných 51,2 (Obr. 3.20). Pri alternatíve (KV812) s počtom bodov 32,6, čo je dosiahnutie 63,7 % z celkovej maximálnej bodovej kapacity, však z dôvodu prekročenia predpísanej hodnoty drsnosti, nie

je možné konštatovať, že ide o optimálnu altrenatívu výroby. Optimálne parametre výroby sú definované v poradí druhou alternatívou (L812), pri ktorej bolo dosiahnutých 29,6 bodov čo je dosiahnutie 57,8 % z celkovej maximálnej bodovej kapacity, a sú to: lineárny typ dráhy kladky s frekvenciou otáčania modelu 800 min^{-1} a posuvom kladky 1,2 mm.

Zoznam bibliografických odkazov

ALFUN, 2018. *Inspection certificate of DC01 steel.* [online] 2019 [cit. 2019-08-11] Dostupné na internete: http://www. alfun.cz/sk/ produkty/ocel/plechy-a-pasy-valcovane-za-studena.

BEWLAY, B. P. and FURRER, D. U., 2006. Spinning. In: *ASM Handbook: Metalworking – Sheet Forming.* ASM International, pp. 367-374. ISBN 97-8087-1707-1093. [online] 2013 [cit. 2013-08-22] Dostupné na internete:

https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/ACFAB91.pdf.

BOLZANO., 2016. *Materiálový list oceli 90MnCrV8* [online] 2016 [cit. 2016-10-13]. Dostupné na internete: http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/nastrojove-oceli/nastrojove-oceli-pro-praci-za-studena/legovane-nastrojove-oceli-pro-praci-za-studena/materialove-listy/materialovy-list-oceli-90mncrv8.

CÂMARA, J., 2009. PhD. thesis. *Single point incremental forming.* Lisboa: Universidade Técnica de Lisaboa, 2009 [online] 2020 [cit. 2020-06-17] Dostupné na internete: https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/573268/1/dissertacao.pdf.

DENN, 2016. *Denn spinning machines* [online] 2016 [cit. 2016-10-13]. Dostupné na internete: https://www.formetal.cz/wp-content/uploads/2016/08/Prezentace-DENN.pdf.

EMMENS, W, C., SEBASTIANI, G. and van den BOOGAARD, A. H., 2010. The technology of Incremental Sheet Forming – a brief review of the history. In *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 210, Issue 8, 2010, pp. 981-997, ISSN 0924-0136. [online] 2012 [cit. 2012-06-12] Dostupné na: http://doc.utwente.nl/72547/2/Emmens10technology-av.pdf.

KONŠTRUOVANIE I., 2012. *Tolerovanie uhlových rozmerov*. UNIZA Žilina. 2012 [cit. 2020-09-02]. Dostupné na: http://www.konstruovanie1.uniza.sk/Subory/5.3a.html.

MUSIC, O. et al., 2010. A review of the mechanics of metal spinning. *Journal of Materials Processing Technology*, 210 (1), 3-23. ISSN 0924-0136 [online] 2012 [cit. 2012-06-12] Dostupné na: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013609003094.

ŠUGÁR, P. and ŠUGÁROVÁ, J., 2009. *Výrobné technológie.* Zvolen, DALI-BB, 2009. pp. 291. ISBN 978-80-89090-587.

ŠUGÁROVÁ, J., 2008. *Združene ohýbanie materiálu za rotácie*. Zvolen: Vydavateľstvo TU Zvolen. ISBN 978-80-228-1964-0.

ŠUGÁROVÁ, J., 2016. *CNC metal spinning: Study of properties of spun parts*. Plzeň: Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čenek. ISBN 978-80-7380-616-3.

VIRGAMET, 2020. *Physical and mechanical properties 16MnCr5*. [online] 2020 [cit. 2020-07-17] Dostupné na: https://virgamet.com/16mncr5-16mncrs5-20mncr5-20mncrs5-21mncr5-1-2162-case-hardening-steel#properties.

ZHAN, M. et al., 2015. Review on hot spinning for difficult-to-deform lightweight metals. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, 25 (6), pp. 1732-1743. ISSN 1003-6326. [online] 2020 [cit. 2020-03-08] Dostupné na:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1003632615637785.

WONG, C. C. et al., 2003. A review of spinning, shear forming and flow forming processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43 (14), pp. 1419-1435.

ISSN 0890 -6955. [online] 2020 [cit. 2020-05-10] Dostupné na: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089069550300172X.

4 POSTUP VÝROBY LOGA LASEROVÝM OBRÁBANÍM

ŠUGÁR, P. – LUDROVCOVÁ, B.

Úvod

Laserové žiarenie je elektromagnetické žiarenie, vznikajúce na princípe stimulovanej emisie fotónov v aktívnom prostredí, na základe vonkajšieho podnetu. Teoretické základy vynútenej emisie žiarenia podal A. Einstein už v roku 1917, prvé funkčné laserové systémy sa však objavili až v roku 1960, keď prvý rubínový laser zostrojil americký fyzik Teodor Maiman. Neskôr laserové technológie našli uplatnenie v širokom spektre oblastí. Patria sem biológia a medicína (chirurgia, stomatológia, fyzioterapia), energetika, vojenský priemysel (laserový sledovač, laserová pištoľ, laserom navádzané strely) veda a výskum (spektroskopia, atómová fyzika, jadrová fúzia, metrológia), priemysel, stavebníctvo, optická komunikácia, optické spracovanie a zaznamenávanie údajov, litografia a stereolitografia. Používajú sa v geodézii na meranie veľkých vzdialenosti s extrémnou presnosťou, v geofyzike, pri skúmaní deformácie a pohybe kontinentov, pri štúdiu gravitačného poľa Zeme, ale aj na skúmanie oceánov a ľadovcov a na štúdium relativistických efektov v teoretickej fyzike (Hu a kol., 2019).

4.1 Laserový zväzok

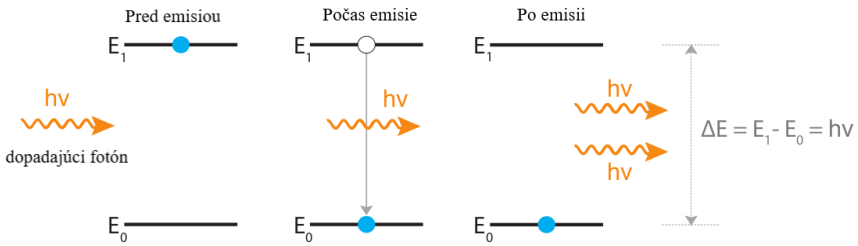
Laser (z angl. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) je kvantovo-elektronický zosilňovač elektromagnetického žiarenia v oblasti viditeľného svetelného spektra a priľahlých vlnových dĺžok. Laserový zväzok predstavuje zväzok usmernených častíc svetla, fotónov a má charakteristické vlastnosti, ktorými sa odlišuje od iných druhov žiarenia. Je monochromatický, koherentný, fokusovateľný a má nízku divergenciu (Mičietová a kol., 2007).

Laserový zväzok je tvorený fotónmi, ktoré sú emitované elektrónmi pri zmene energetickej hladiny, ku ktorej dochádza pri zrážke tzv. budiacej častice (budiacho fotónu) s elektrónom. Elektrón vtedy pohltí energiu fotónu a dôjde k jeho presunu (excitácii) na vyššiu energetickú hladinu (Obr. 1), kde zotrváva veľmi krátky čas (rádovo 10^{-8} s) a potom padá na nižšiu, tzv. metastabilnú hladinu. Tu zotrváva dostatočne dlho (až 100 000 x dlhšie v porovnaní s hladinou, na ktorú bol pôvodne exitovaný. Nasleduje populačná inverzia, ku ktorej dochádza vtedy, ak je viac elektrónov atómu na metastabilnej hladine ako na základnej hladine. Po prílete stimulujúceho fotónu dochádza k presunu elektrónov na základnú hladinu a všetky emitujú jeden fotón. Všetky tieto fotóny, vrátane toho stimulujúceho sa spoja v jednu vlnu s oveľa väčšou amplitúdou. Nakoľko majú fotóny časticový aj vlnový charakter, pri skladaní dvoch vĺn vznikne jedna, ktorá má dvojnásobnú amplitúdu a teda dvojnásobnú energiu. Tým dôjde k zosilneniu svetla stimulovanou emisiou žiarenia.

Prechod elektrónu zo základnej energetickej hladiny E_0 na vyššiu energetickú hladinu E_1 sprevádza absorpcia a prechod z vyššej hladiny na základnú emisia, kde hodnotu energie možno matematicky vyjadriť vzťahom (4.1)

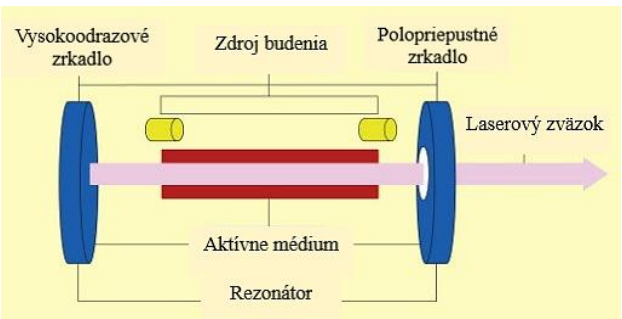
$$E = h.\nu \tag{4.1}$$

kde E je kvantová energia, ν – rezonančná frekvencia žiarenia, h – Planckova konštanta ($6{,}62.10^{-34}$ J.s) (Mičietová a kol., 2007).



Obr. 4.1. Schéma procesu stimulovanej emisie.
Atóm v excitovanom stave je stimulovaný k emitovaniu fotónu dopadajúcim fotónom.
Stimulovaný emitovaný fotón má rovnakú fázu, frekvenciu a polarizáciu ako dopadajúci fotón
(Scientific Volume Imaging)

K usmerneniu emitovaných fotónov dochádza v rezonátore. Rezonátor je sústava dvoch zrkadiel, kde jedno je vysokoodrazové, s odrazivosťou až 99,9 % a druhé zrkadlo je polopriepustné. Zrkadlá sú umiestnené rovnobežne (Obr. 4.2) (Csele, 2004; Mičietová a kol., 2007, Mičietová, 2001).



Obr. 4.2. Základné časti lasera (Opticlabs)

4.2 Obrábanie laserovým zväzkom

Laserové technológie majú v priemysle široké uplatnenie, využívajú sa na laserové obrábanie (laserové rezanie, frézovanie, sústruženie, vŕtanie), laserové mikroobrábanie (gravírovanie, textúrovanie), laserové zváranie, spekanie práškových materiálov, povlakovanie, leštenie a čistenie materiálov (Hu a kol., 2019). Môžu sa používať aj na podporu konvenčných obrábacích metód – laserom podporované obrábanie (LAM), ktoré má uplatnenie pri obrábaní ťažkoobrábateľných materiálov. Laser v súčasnosti má významné postavenie v oblasti aditívnych spôsobov výroby (Hu a kol., 2019).

Laserové obrábanie je progresívnou technológiou založenou na premene svetelnej energie na energiu tepelnú, ktorá spôsobuje intenzívny lokálny ohrev obrábaného materiálu (10^4 °C). Princípom je termálny mechanizmus úberu materiálu. Kinetická energia fotónov sa pri dopade na povrch materiálu mení na tepelnú a dochádza k zahrievaniu, taveniu, odparovaniu a ablácii materiálu (Kibria a kol., 2017).

V závislosti od dĺžky trvania pulzu laserového zväzku sa proces fyzikálneho odstraňovania materiálu mení. Pri pulzoch dlhších ako 1 ns vzniká relatívne veľká teplom ovplyvnená oblasť a môže dôjsť k vzniku prasklín na povrchu alebo vo vnútri materiálu. Vplyvom ultrakrátkych intervalov trvania pulzov a ultravysokej intenzity žiarenia sa nelineárna absorpcia indukuje len v úzko ohraničenej oblasti spracovávaného materiálu. Použitie laserov s ultrakrátkou pulzáciou umožňuje tzv. studenú abláciu, kde sa materiál priamo odparuje, bez prechodu fázou roztavenej kvapaliny. (Renk, 2017; Sugioka et al., 2010).

Zdroje laserového žiarenia, používané v procesoch obrábania, sa delia z viacerých hľadísk, najčastejšie podľa typu aktívneho média (pevnolátkové, plynné, polovodičové, kvapalné a chemické lasery), pracovného režimu (kontinuálne a pulzné) a dĺžky trvania pulzu (nanosekundové, pikosekundové, femtosekundové a attosekundové).

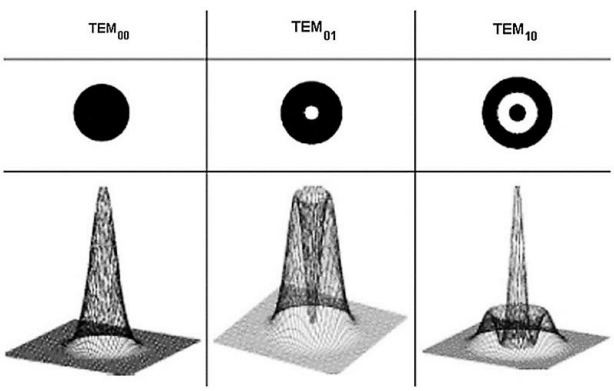
4.3 Parametre laserového obrábania

Neoddeliteľnou súčasťou laserového obrábania sú parametre, ktoré do procesu obrábania vstupujú, pričom výsledok obrábania môžu výrazne ovplyvňovať. Vplyv týchto vstupných parametrov na materiál, časovú a finančnú efektivitu, tvarovú a rozmerovú presnosť, viedli k podrobnému skúmaniu ich vplyvu počas celého procesu obrábania v rôznych podmienkach. Medzi vstupné parametre, na ktoré treba brať ohľad, patria vlastnosti obrábaného materiálu a parametre laserového zariadenia.

Vlastnosti obrábaného materiálu sú dané predovšetkým jeho termofyzikálnymi vlastnosťami (tepelná vodivosť, viskozita taveniny, povrchové napätie, absorpcia, reflexia) a geometriou obrobku.

Vlastnosti laserového zväzku je možné charakterizovať týmito parametrami:

- ***Rozbiehavosť (divergencia)*** – miera rozptylu laserového zväzku. Kvalitu zväzku charakterizuje veľkosť divergencie resp. difrakčný faktor M^2.
- ***TEM mód*** (Transverse Electromagnetic Mode) – tvar priečneho rezu laserového zväzku v rezonátore vplyvom magnetického poľa. Vyjadruje kvalitu laserového zväzku z pohľadu rozdelenia energie v priereze laserového zväzku (Obr. 4.3).



Obr. 4.3. Rôzne rozdelenie energie v priereze laserového zväzku (De Moraes a kol., 2017)

- ***Vlnová dĺžka*** (wavelength λ) – vyjadruje geometrickú vzdialenosť medzi maximami dvoch po sebe nasledujúcich svetelných vĺn. Jej jednotkou je meter (m). Vlnová dĺžka je určená vzťahom (4.2):

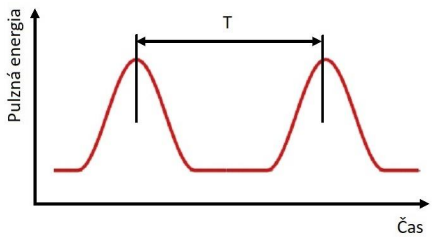
$$\lambda = \frac{v}{f} \tag{4.2}$$

kde v je rýchlosť svetelnej vlny (m.s^{-1}), f – frekvencia (Hz).

- ***Frekvencia*** (frequency f) – je fyzikálna veličina, ktorá udáva periodický dej kmitania zodpovedajúcej elektromagnetickej vlny. Udáva počet opakovaní vyžiarenia laserového zväzku za určitý čas (Obr. 4.4). Jej jednotkou je Hertz (Hz). Frekvencia je definovaná ako obrátená hodnota periódy, vzťahom (4.3):

$$f = \frac{1}{T} \tag{4.3}$$

kde T vyjadruje periódu v sekundách (s).



Obr. 4.4. Grafické znázornenie periódy T

- ***Pulzná energia*** (pulse energy P_e) – energia pulzov vyjadrená v Jouloch (J), daná vzťahom (4.4):

$$Pe = \frac{P_A}{f} \tag{4.4}$$

kde P_A je priemerný vyžiarený výkon (W), f – frekvencia (Hz).

- ***Hustota energie*** (energy density Φ) – množstvo vyžiarenej energie pripadajúcej na jednotku plochy. Jednotkou je J.cm^{-2}. Je udávaná celkovou energiou všetkých fotónov vyžiarených za určitý čas dopadajúcou na jednotku povrchu S podľa vzťahu (4.5):

$$\Phi = \frac{Pe}{S} \tag{4.5}$$

kde P_e je pulzná energia (J), S – plocha, na ktorú žiarenie dopadá (m^2).

- ***Špičkový výkon*** (peak power P_{PEAK}) – táto veličina znamená maximálny optický výkon a predstavuje prácu vykonanú za jednotku času. Jednotkou je Watt (W). Špičkový výkon lasera súvisí s energiou pulzov na výstupe a možno ho vyjadriť vzťahom (4.6):

$$P_{PEAK} = \frac{Pe}{\tau_p} \tag{4.6}$$

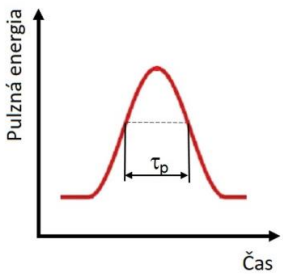
kde P_e je energia pulzu (J), τ_p – dĺžka trvania pulzu (s).

- ***Hustota výkonu*** (power density P_D) – analogická veličina k hustote energie, ktorá vyjadruje pôsobenie špičkového výkonu lasera P_{PEAK} na jednotku plochy kolmej na smer šírenia svetla. Jednotkou je W.cm^{-2}. Vypočíta sa podľa vzťahu (4.7):

$$P_D = \frac{P_{PEAK}}{S} \tag{4.7}$$

kde P_{PEAK} je špičkový vyžiarený výkon (W), S – plocha na ktorú žiarenie dopadá (m^2).

- ***Dĺžka trvania pulzu*** (pulse duration τ_P) – predstavuje šírku v polovici maxima amplitúdy (spojnica bodov A a B na Obr. 4.5).



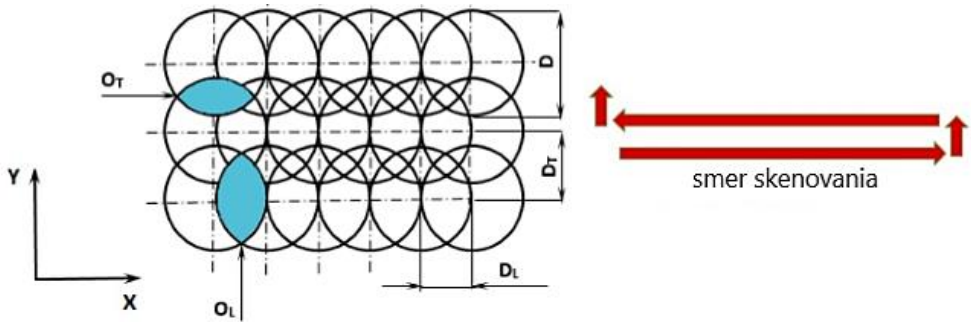
Obr. 4.5. Grafické znázornenie dĺžky trvania pulzu τ_P

- ***Skenovacia rýchlosť*** (scanning speed v_s) – rýchlosť, akou sa laserový zväzok pohybuje po povrchu obrobku, udáva sa v mm.s^{-1}.
- ***Rozstup dráh laserového zväzku*** (track distance D_L, D_T) – vzdialenosť stredov dvoch po sebe nasledujúcich pulzov laserového zväzku (Obr. 4.6). Tento parameter sa uvádza v mikrometroch (μm) a označuje sa D_T (transverzná vzdialenosť pulzov) a D_L (laterálna vzdialenosť pulzov). Vzdialenosť dráh v smere, v ktorom sa pohybuje laserový zväzok sa vypočíta vzťahom (4.8):

$$D = \frac{v_s}{f} \tag{4.8}$$

kde v_s je rýchlosť skenovania (mm.s^{-1}), f – frekvencia (Hz).

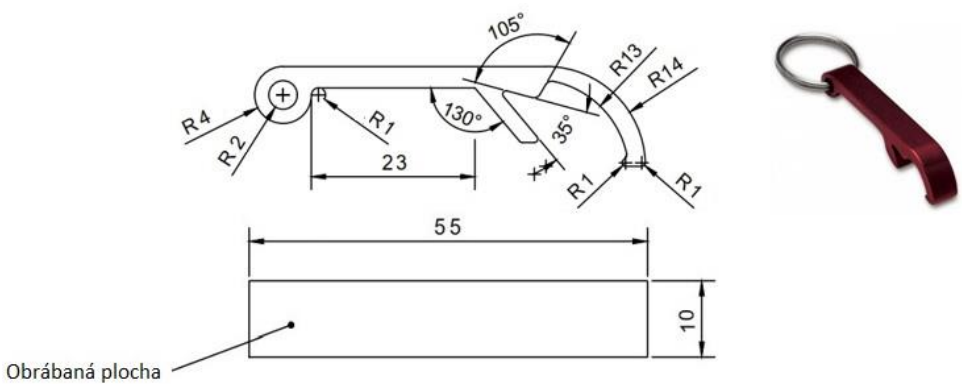
- ***Pulzné prekrytie*** (pulse overlap Ov_x; Ov_y, resp. O_L; O_T) – opisuje priestorové prekrytie medzi dvoma nasledujúcimi laserovými pulzami a je vyjadrené v percentách. Je to percentuálne vyjadrenie, koľko plochy sa z dvoch nasledujúcich pulzov prekrýva. Označuje sa O_{V_x} alebo O_{V_y} podľa toho, v ktorej osi dochádza k prekrytiu pulzov resp. O_L ak ide o laterálne prekrytie alebo O_T ak ide o transverzálne prekrytie. Schematicky je pulzné prekrytie znázornené na Obr. 4.6.



Obr. 4.6. Schematické zobrazenie vzdialenosti dráh laserového zväzku: D – priemer laserového zväzku; D_L – laterálna vzdialenosť pulzov; D_T – transverzálna vzdialenosť pulzov; O_L – laterálne pulzné prekrytie; O_T – transverzné pulzné prekrytie (Šugár a kol., 2019)

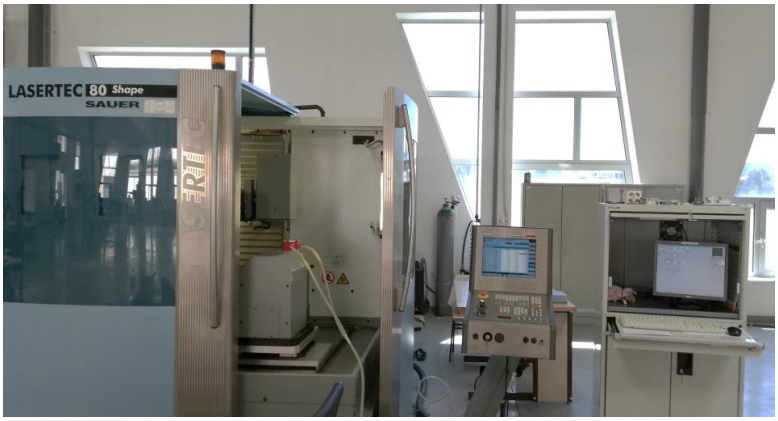
4.4 Laserové obrábanie – značenie

Postup prípravy výroby a vlastnej výroby súčiastky laserovým obrábaním bude predstavený na príklade laserového značenia nápisu a loga na povrchu kľúčenky vyrobenej z eloxovanej Al zliatiny. Tvar a rozmery súčiastky približuje Obr. 4.7.



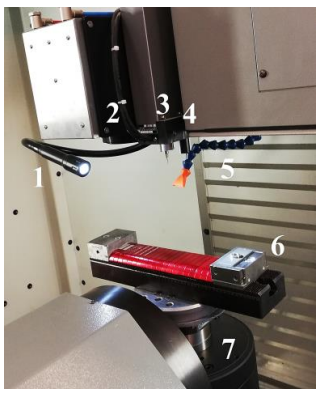
Obr. 4.7. Výkres súčiastky

Na značenie bude použité CNC laserové obrábacie centrum Lasertec 80 Shape (fa DMG Mori) (Obr. 4.8). Stroj je vybavený vláknovým yterbiovým pulzným nanosekundovým laserom s maximálnym výstupným optickým výkonom 100 W pri použití pulznej frekvencie 100 kHz. Dĺžka trvania pulzu je 120 ns a priemer spotu laserového zväzku je 50 µm.



Obr. 4.8. Obrábacie centrum Lasertec 80 Shape

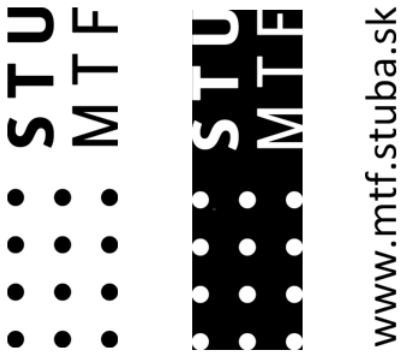
Hlavné časti CNC laserového obrábacieho centra, umiestnené v jeho pracovnom priestore, znázorňuje Obr. 4.9.



Obr. 4.9. Hlavné časti CNC laserového obrábacieho centra
1- osvetlenie, 2 – výstup skenera, 3 – dotyková sonda na meranie Z súradnice, 4 – kamera, 5 – chladenie, 6 – upínací systém EROWA, 7 – rotačný pracovný stôl

4.4.1 Grafický návrh

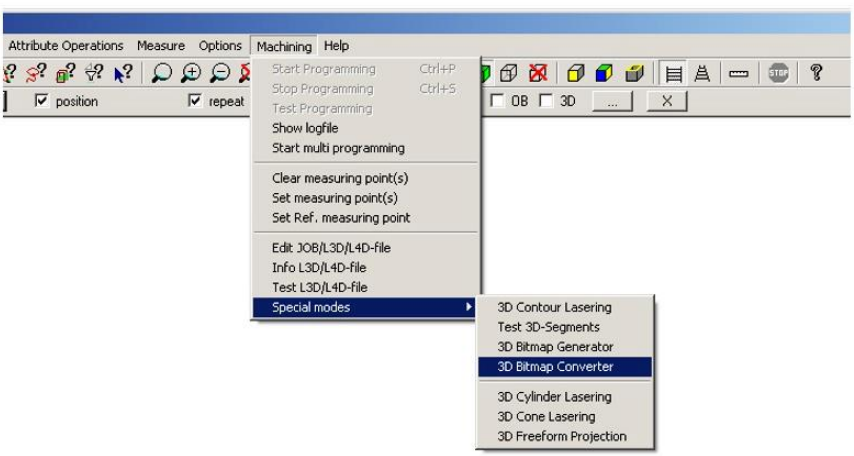
Keď je k dispozícii výkres súčiastky, a teda aj rozmery plochy, ktorá sa bude obrábať (značiť), je nutné pripraviť grafický návrh. Vyrábaný prvok môže byť ľubovoľný, napr. nápis, geometrický tvar alebo obrázok. Softvér, v ktorom sa spracováva grafický návrh nie je predpísaný, podmienkou je však to, aby bol vo formáte bitovej mapy (.bmp). Laserovým zväzkom bude odstraňovaný materiál v miestach, ktoré sú na bitovej mape zobrazené čiernou farbou. V danom prípade to bude logo Materiálovotechnologickej fakulty STU a adresa jej webovej stránky (Obr. 4.10). Umiestnenie loga na kľúčenke je zvolené s ohľadom na dobrú viditeľnosť a jednoduchosť výroby.



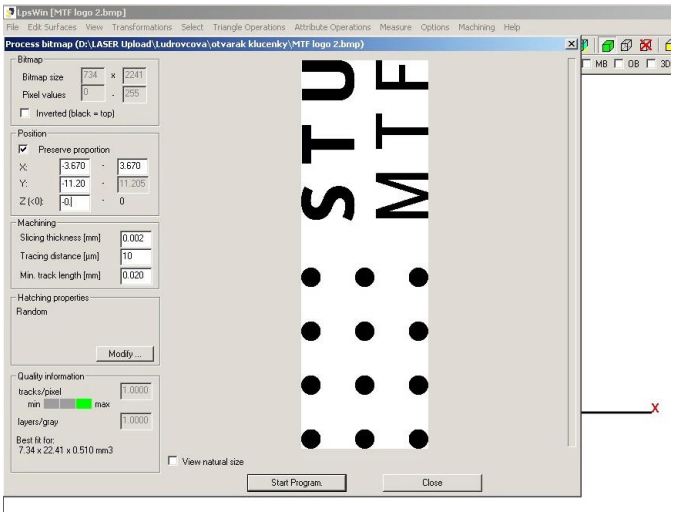
Obr. 4.10. Grafické návrhy vo formáte .bmp

4.4.2 Import grafického návrhu do softvéru LpsWin

Po vytvorení obrázka vo formáte .bmp je grafický návrh importovaný do softvéru LpsWin, kde sú generované dráhy laserového zväzku a nastavené sú tiež rozmery vyrábaného obrazca podľa veľkosti plochy, určenej na obrábanie. Bitovú mapu možno vložiť a konvertovať na dráhy laserového zväzku prostredníctvom funkcie „Special modes – 3D bitmap converter“, ktorá je súčasťou možnosti „Machining“, dostupnej v ponukovom menu na hornej lište v pracovnom prostredí softvéru LpsWin (Obr. 4.11). Na výstupe sa zobrazí okno s bitovou mapou a s funkciami, umožňujúcimi nastavenie dráh laserového zväzku (Obr. 4.12).



Obr. 4.11. Pracovné prostredie softvéru LpsWin s cestou ku konvertovaniu bitovej mapy

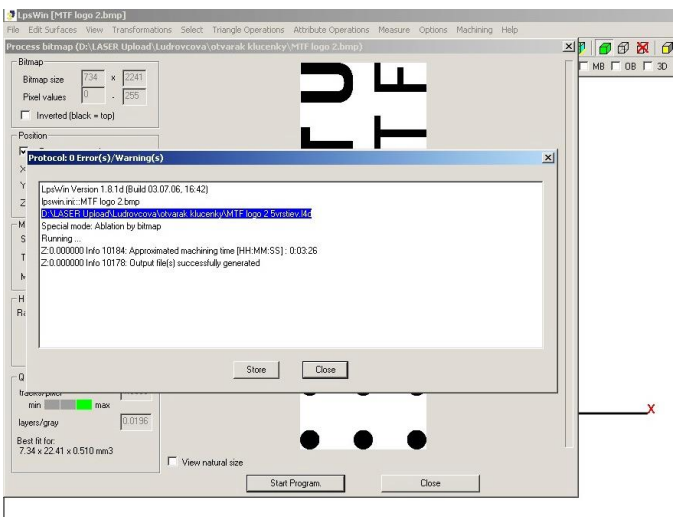


Obr. 4.12. Nastavenie dráh laserového zväzku v softvéri LpsWin

Následne v poli „Position“ (Obr. 4.12) sú zadávané rozmery vyrábaného obrazca X a Y s nulovým bodom programu (bod so súradnicami X0, Y0), ktorý bol pre tento prípad zvolený v strede zobrazenej plochy.

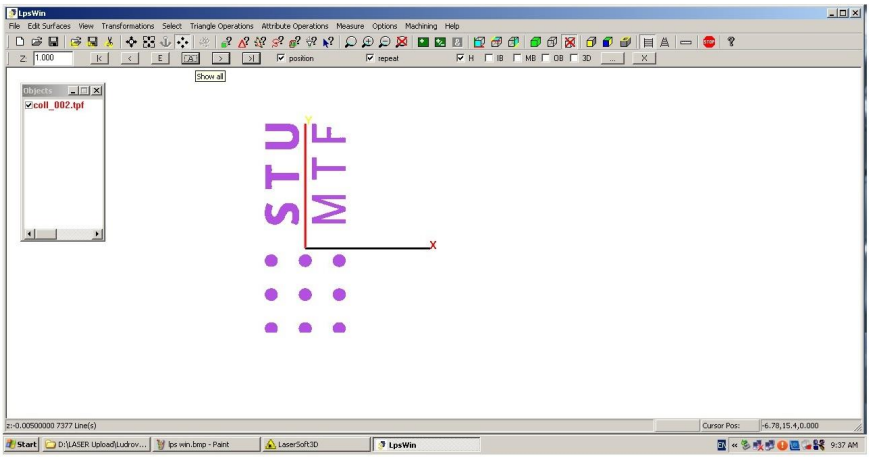
Súradnica Z určuje hĺbku zapustenia obrobenej plochy a závisí od nastavenej hrúbky jednej vrstvy (slicing thickness), ktorá je zvyčajne 1 alebo 2 µm. Pri zvolení hrúbky 2 µm s piatimi opakovaniami, bude výsledná hĺbka zapustenia vyrábanej plochy 0,01 mm.

Položka „Tracing distance“ znamená rozstup dráh laserového zväzku a v danom prípade bola nastavená hodnota 10 µm. Použitím voľby „Start Program“ sú vygenerované dráhy laserového zväzku podľa zadaných údajov (Obr. 4.13).



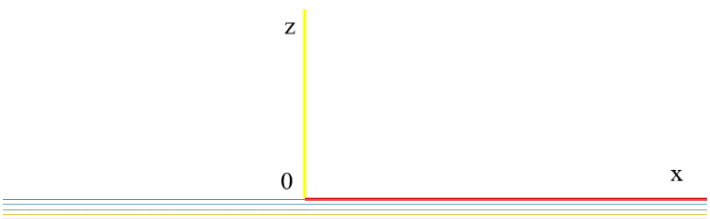
Obr. 4.13. Proces generovania dráh z bitovej mapy

Použitím možnosti „Machining – Test L3D/L4D file“ možno zobraziť vygenerované dráhy pohybu laserového zväzku (Obr. 4.14).



Obr. 4.14. Vygenerované dráhy v softvéri LpsWin

Rovnako možno skontrolovať počet odoberaných vrstiev, farebne zobrazených na Obr. 4.15. Vygenerovaný grafický návrh je uložený vo formáte .l4d.



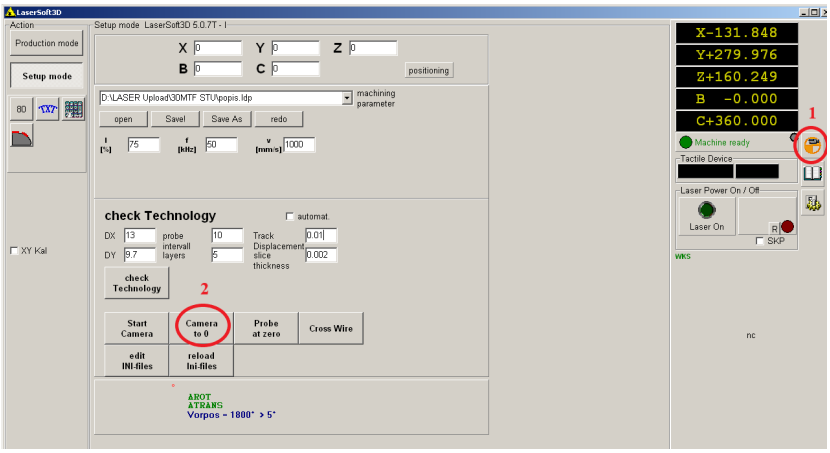
Obr. 4.15. Znázornenie počtu odoberaných vrstiev

4.4.3 Nastavenie nulového bodu obrobku a voľba parametrov procesu

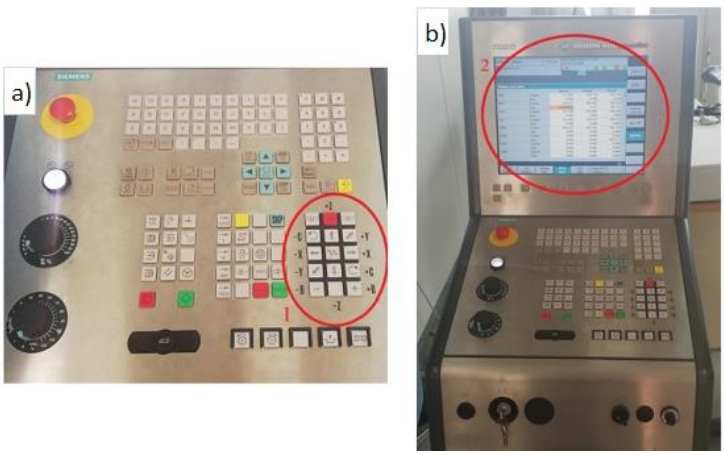
Pred obrábaním sa obrobok upína na pracovný stôl obrábacieho centra použitím upínacieho systému EROWA tak, aby obrábaná plocha bola vo vodorovnej polohe (Obr. 4.9). Vzhľadom na väčšie množstvo vyrábaných kusov je efektívne upnúť viac obrobkov vedľa seba. Aby obrábané plochy boli ustavené v jednej rovine, na podloženie sa používajú kalibračné platničky.

Po upnutí je aktivovaný softvér LaserSoft 3D, kde sa v režime nastavenia (Setup mode) pomocou kamery nastavuje nulový bod obrobku, použitím kamery, integrovanej v pracovnom priestore stroja, pracujúcej s 50-násobným zväčšením. Nulový bod obrobku predstavuje referenčný bod na povrchu obrábanej plochy, ktorý sa stotožní s nulovým bodom programu (v tomto prípade stred grafického obrazca – loga).

Pred spustením kamery je zobrazenie súradníc na monitore riadiaceho systému stroja prepnuté do režimu kamery (Obr. 4.16, poz. 1). Súradnice sa zobrazujú žltou farbou. Kliknutím na voľbu „Camera to zero“ (Obr. 4.16, poz. 2) sa spúšťa kamera s nulovým bodom, ktorý bol stroju zadaný naposledy.



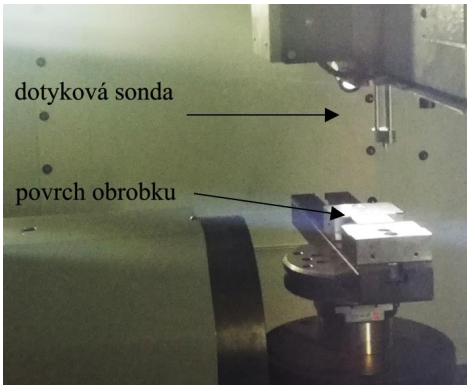
Obr. 4.16. Nastavovací režim softvéru LaserSoft 3D
1 – prepnutie režimu súradníc, 2 – spustenie pohľadu kamery do nulového bodu



Obr. 4.17. Panel riadiaceho systému: a) detailný pohľad na klávesovú časť, b) celkový pohľad; 1 – tlačidlá na polohovanie pracovného stola, 2 – monitor so zobrazenými súradnicami

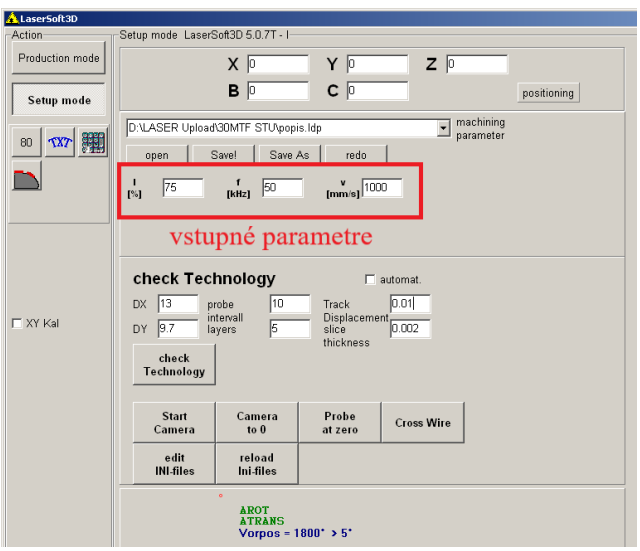
Manuálne, polohovacími tlačidlami na riadiacom paneli (Obr. 4.17, poz. 1), možno pohľad kamery presunúť na miesto na obrobku, zvolené ako nový nulový bod.

Aby sa zabezpečila fokusácia laserového zväzku na povrchu obrobku, je potrebné nastaviť nulovú pozíciu aj v smere osi Z, na čo slúži integrovaná dotyková sonda (Obr. 4.18).



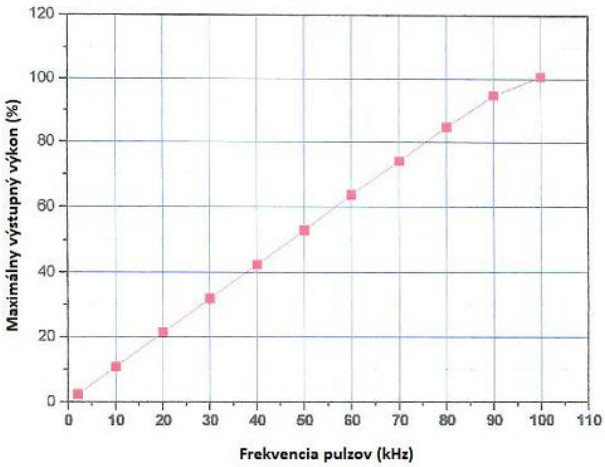
Obr. 4.18. Meranie súradnice z dotykovou sondou

Po nastavení nulového bodu je potrebné pristúpiť k definovaniu parametrov obrábania, ktoré sa nastavujú v režime „Setup mode“ softvéru LaserSoft 3D (Obr. 4.19). Parametre, ktoré sa ukladajú do súboru s príponou .ldp sú percentuálny podiel maximálneho výstupného optického výkonu lasera (*I*) v %, frekvencia (*f*) a rýchlosť skenovacieho pohybu laserového zväzku.



Obr. 4.19. Pole na zadávanie vstupných parametrov procesu obrábania

Výstupný optický výkon lasera sa mení v závislosti na pulznej frekvencii podľa grafu na Obr. 4.20.



Obr. 4.20. Závislosť výstupného optického výkonu lasera na pulznej frekvencii (Manuál Sauer – DMG Mori, Lasertec 80 Shape)

Prehľad zvolených parametrov procesu laserového značenia približuje Tab. 4.1.

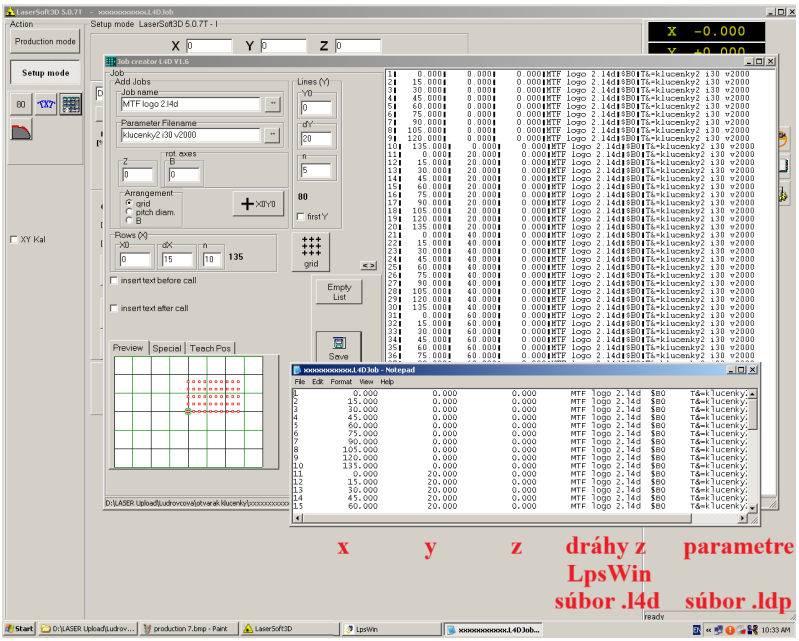
Tabuľka 4.1. Vstupné parametre laserového značenia

Parameter	***Označenie***	***Hodnota***	***Jednotka***
Výkon	I	37,5	W
Frekvencia	f	50	KHz
Rýchlosť skenovania	v_s	1 000	$mm.s^{-1}$
Počet vrstiev	n	5	-
Laterálna vzdialenosť pulzov	D_L	10	µm
Laterálne pulzné prekrytie	O_L	80	%
Transverzná vzdialenosť pulzov	D_T	20	µm
Transverzné pulzné prekrytie	O_T	40	%

4.5 Generovanie riadiaceho programu a výroba súčiastky

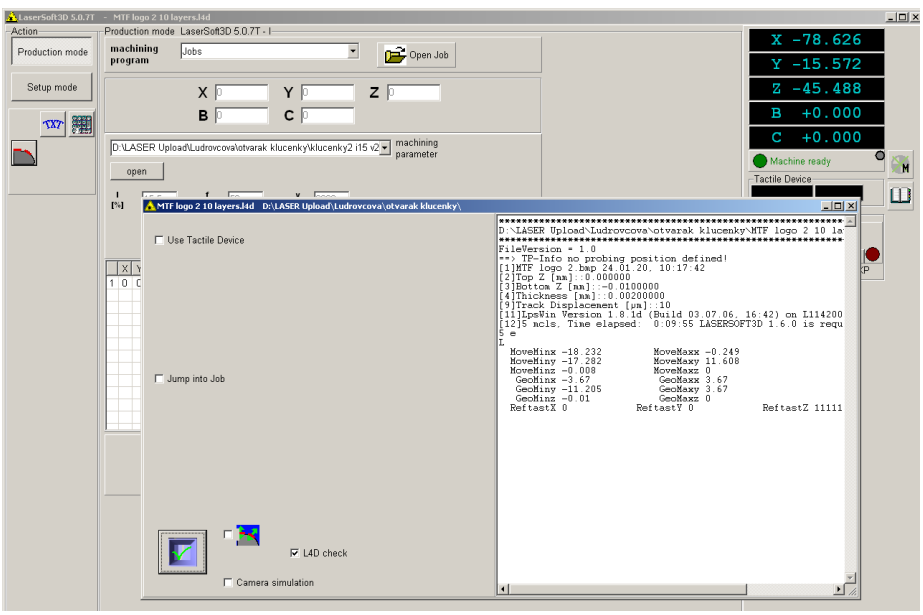
Po uložení vstupných parametrov procesu obrábania v prostredí LaserSoft 3D nasleduje vygenerovanie riadiaceho programu. V režime „JobCreator“ je potrebné otvoriť už vytvorené súbory – súbor s vygenerovanými dráhami (súbor vo formáte .l4d) a súbor s uloženými parametrami procesu (súbor vo formáte .ldp). Aby sa nulový bod obrobku nemusel manuálne pretavovať pre každú obrábanú plochu zvlášť, použije sa systém automatického posúvania nulového bodu (v prezentovanom príklade je to posunutie o hodnotu 10 mm).

Vytvorený riadiaci program, s príslušným počtom opakovaní a posunutí v jednotlivých osiach (Obr. 4.21), možno zobraziť tiež vo forme textového súboru s možnosťou dodatočnej editácie.



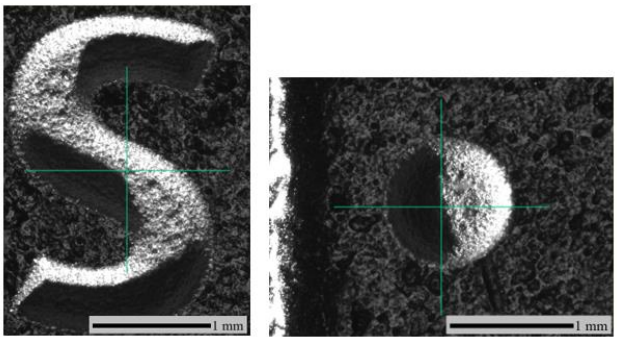
Obr. 4.21. JobCreator L4D s vygenerovaným programom riadiacim programom

Vygenerovaný riadiaci program sa po skontrolovaní spúšťa v režime „Production mode“ (Obr. 4.22).



Obr. 4.22. Spustenie procesu obrábania v prostredí JobCreator L4D

Výsledky procesu laserového značenia sú zobrazené na Obr. 4.23. Prvotnú vizuálnu kontrolu je možné rozšíriť o presnejšie kvalitatívne aj kvantitatívne zhodnotenie výsledku procesu obrábania, použitím integrovanej kamery (Obr. 4.24) a dotykovej meracej sondy.



Obr. 4.23. Pohľad kamery stroja na obrobené plochy

Obr. 4.24. Kľúčenky s logom a webom MTF STU, vyrobené laserovým značením

Záver

Prípadová štúdia priblížila postup technologickej prípravy výroby súčiastky laserovým obrábaním na príklade laserového značenia. Demonštrovaný bol komplex činností nevyhnutných na transformáciu grafického modelu obrábaných plôch do súboru, obsahujúceho informácie o dráhach laserového zväzku pri obrábaní, doplnený o postup vytvorenia súboru technologických informácií, určujúcich podmienky interakcie laserového zväzku s materiálom obrobku.

Predstavený postup výroby loga kľúčenky poslúži ako vhodný praktický príklad, rozširujúci teoretické poznatky o technológii laserového obrábania a jej aplikovateľnosti v súčasnej výrobnej praxi.

Zoznam bibliografických odkazov

CSELE, M. 2004. *Fundamentals of Light Sources and Lasers*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey 2004. p. 349. ISBN 9780471675211.

DE MORAES, A. D. a CZEKANSKI, A. 2017. Thermal Modeling of 304L Stainless Steel for Selective Laser Melting: Laser Power Input Evaluation. *Proceedings of the ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2017.*

HU, G. et al. 2019. Tailoring metallic surface properties induced by laser surface processing for industrial applications. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2(2019), 29-34.

ISSN 2589-5540.

KIBRIA, G., BHATTACHARYYA, B. et. al. 2017. *Non-traditional Micromachining Processes: Fundamentals and Applications*. Springer International Publishing AG, 2017, p. 431. ISBN 9783319520094.

MAHAMOOD, R. M. 2018. *Laser Metal Deposition Process of Metals, Alloys, and Composite Materials*. Springer Nature, 2018. p. 225. ISBN 9783319649849.

MIČIETOVÁ, A., MAŇKOVÁ, I. a VELÍŠEK, K. 2007. *Top trendy v obrábaní V. časť Fyzikálne technológie obrábania*. MEDIA/ST, 2007. p. 232. ISBN 8096895472.

MIČIETOVÁ, A. 2001. *Nekonvenčné metódy obrábania*. Žilinská univerzita v Žiline/ EDIS vyd. ŽU, 2001. p. 376. ISBN 8071008532.

OPTICLABS *Laser Principle* [online]. [cit. 2020-10-14]. Dostupné na internete: http://www.opticlabs.ca/laser-principle/.

PASCHOTTA, R. *Optical frequency* [online]. [cit. 2020-10-14]. Dostupné na internete: https://www.rp-photonics.com/optical_frequency.html.

PASCHOTTA, R. *Peak power* [online]. [cit. 2020-10-14]. Dostupné na internete: https://www.rp-photonics.com/peak_power.html.

RENK, F. K. 2017. *Basics of Laser Physics*. Springer International Publishing AG, 2017. 2. vyd. p. 677. ISBN 9783319506517.

Scientific Volume Imaging. Stimulated Emission [online]. [cit. 2020-10-14]. Dostupné na internete: https://svi.nl/StimulatedEmission.

SUGIOKA, K., MEUNIER, M. a PIQUÉ, A. 2010. *Laser Precision Microfabrication*. Berlin: Springer, 2010. p. 353. ISBN 9783642105227.

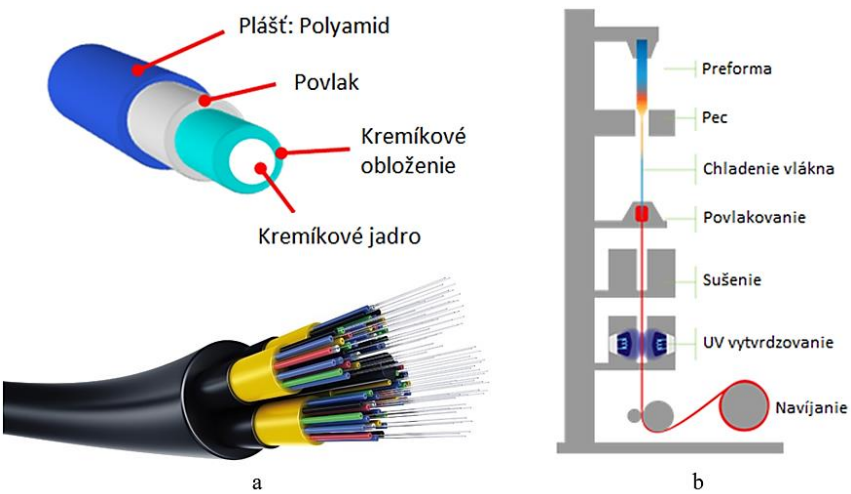
ŠUGÁR, P., KOVÁČIK, J., ŠUGÁROVÁ, J. a LUDROVCOVÁ, B. 2019. A Study of Laser Micromachining of PM Processed Ti Compact of Dental Implants Applications. *Materials*, 12(14). ISSN 1996-1944. Dostupné na internete: https://www.mdpi.com/1996-1944/12/14/2246/htm.

5 ANALÝZA VARIANTNÝCH SPÔSOBOV ULTRAZVUKOVÉHO OBRÁBANIA SiO_2 TYČE S PROFILOM MNOHOUHOLNÍKA

KURUC, M.

Úvod

Výroba optických vlákien je náročný proces s vysokými požiadavkami na výslednú kvalitu produktu. Optické vlákno musí byť schopné prenášať vysokú energetickú hustotu, mať čo najmenšie straty, dobrú pevnosť a odolnosť voči teplu a UV žiareniu. Na zlepšenie spomínaných vlastností sa využívajú ochranné vrstvy. Jadro optického kábla (Obr. 5.1a) tvorí optické vlákno schopné prenášať optický signál rôznych vlnových dĺžok. Jeho priemer býva 0,2 až 1,5 mm. Na jadro sa nanáša reflexná vrstva, ktorej úlohou je odrážať signál späť do vlákna a tým znížiť prenosové straty. Jej hrúbka je závislá od priemeru jadra a môže sa pohybovať od 0,01 do 0,075 mm. Po nanesení tejto vrstvy sa priemer vlákna zväčší približne o 10 %. Túto reflexnú vrstvu chráni ďalší povlak, ktorého účelom je zlepšiť mechanické vlastnosti optického vlákna a zároveň zabezpečiť lepšiu priľnavosť vonkajšieho plášťa. Vonkajší plášť chráni optické vlákno pred poškodením a pred negatívnym vplyvom prostredia. Jeho materiál a hrúbka sú ovplyvnené najmä prostredím, v ktorom sa má optické vlákno nachádzať (optické vlákna môžu byť vedené v zemi, ale aj pod morom). Zvyčajne sa vyrába z polymaidov (PA) a môže odolávať teplotám od -40 do 300 °C. Samotné jadro sa vyrába z oxidu kremičitého, ale môže byť vyrobené aj z plexiskla (PMMA). Princíp zariadenia na výrobu optických vlákien vidieť na Obr. 5.1b. V jednom optickom kábli môžu byť aj spletené viaceré optické vlákna (Fujikura, 2020; Alicat, 2020; Sikora, 2020; Abrate, 2013).



Obr. 5.1. Prierez optického kábla a schéma ťahania optických vlákien (Fujikura, 2020; Alicat, 2020; Sikora, 2020)

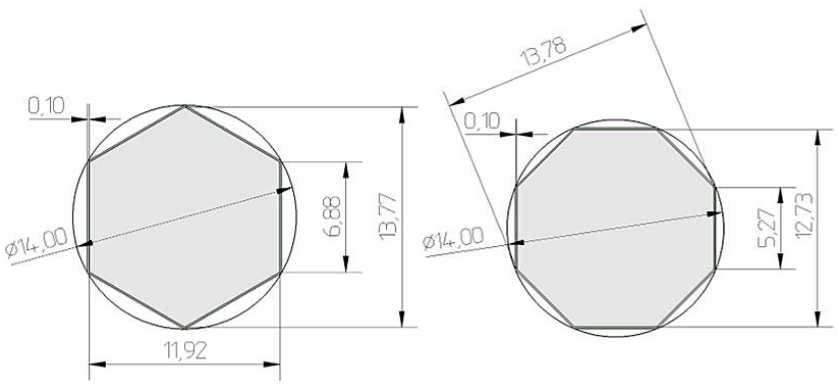
5.1 Charakteristika obrobku

Oxid kremičitý (SiO_2) je tvrdý a krehký materiál, ktorý sa používa v mnohých priemyselných oblastiach. Širšie zastúpenie má v elektronike a optike. Využíva sa aj ako preforma pri výrobe optických vlákien. Preforma je vstupný polotovar z ktorého sa ťahajú optické vlákna. Kým optické vlákna sú dlhé a tenké, preformy sú krátke a hrubé tyče. Na tento účel sa vyžaduje šesťuholníkový alebo osemuholníkový priečny prierez, avšak kvôli

vlastnostiam vstupného procesu majú polotovary kruhový prierez, preto je nevyhnutné ďalšie opracovanie. Zvyčajne ním býva brúsenie, avšak tento proces je časovo náročný.

Táto štúdia ponúka riešenia problému nízkej produktivity brúsenia kruhových SiO_2 tyčí nahradením technológiou rotačného ultrazvukového obrábania (RUM), pričom sú analyzované dva rôzne princípy výroby šesťuholníkového a osemuholníkového profilu z valcovej tyče z hľadiska dosiahnutej tvarovej presnosti. Cieľom je dosiahnuť čo najkratší možný čas výroby pri dodržaní adekvátnej rozmerovej presnosti získaného produktu. Čas sa zaznamenával stopkami, kým presnosť pomocou optického 3D skenera, ktorý výsledný produkt digitalizuje a potom porovná s CAD modelom.

Polotovarom je kryštálový valček s priemerom 14 mm. Jeho dĺžka sa pohybuje od 80 do 150 mm. Z neho sa vytiahne vlákno s priemerom 0,125 *až* 0,4 mm, pričom z 10 mm dĺžky preformy možno získať 12 *až* 125 m vlákna. Maximálna odchýlka tvaru predstavuje 1 % (čiže ± 0,14 mm). Napriek tomu rozmery samotné nie sú dôležité – vyžaduje sa najväčší možný rovnostranný mnohouholník vyrobiteľný z kruhovej tyče priemeru 14 mm. Rozmery takýchto profilov sú znázornené na Obr. 5.2. Vzhľadom na možné nepresnosti vstupného valcového polotovaru môžu vzniknúť na výslednom profile zaoblenia. Aby sa tomu zabránilo a zabezpečili sa ostré hrany, bol najväčší možný vpísaný mnohouholník zmenšený o 0,1 mm z každej strany (UFE, 2020).



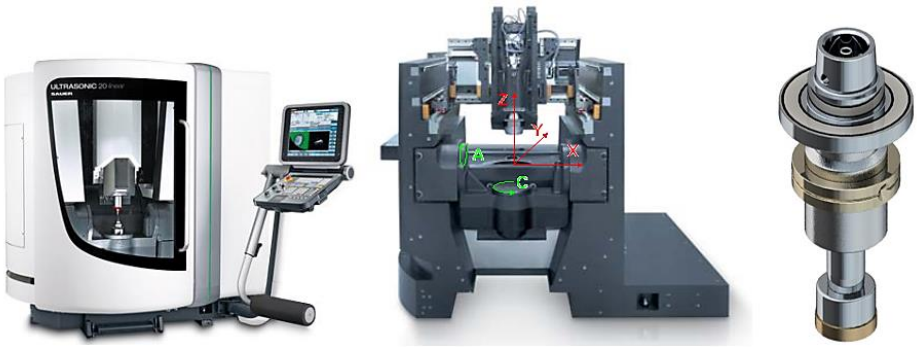
Obr. 5.2. Zakótované rovnostranné mnohouholníkové profily v kruhovom polotovare

5.2 Technológia rotačného ultrazvukového obrábania

Čas brúsenia kruhových SiO_2 tyčí je 10 *až* 16 h (v závislosti od počtu hrán mnohouholníka a dĺžky kruhovej tyče). Technológia RUM má potenciál výrazného zníženia času obrábania. Výhody procesu RUM zahŕňajú zvýšenie úberu a zníženie rezných síl, kým obrobený povrch dosahuje výbornú kvalitu (Ra ≈ 0,2 μm). Princíp tejto metódy spočíva v ultrazvukovom kmitaní nástroja pozdĺž jeho osi pri súčasnej rotácii okolo svojej osi. Nástroj pripomína brúsne teliesko – obsahuje diamantové zrná v mosadznej matrici. Ultrazvukovým kmitaním sa na povrchu obrobku vytvárajú mikrotrhliny, ktoré sú následným abrazívnym účinkom diamantových zŕn a kavitačným účinkom procesnej kvapaliny rozrušované.

V experimentoch bolo použité obrábacie centrum DMG Ultrasonic 20 linear (výrobca DMG Mori). Tento stroj disponuje vysokorýchlostným vretenom (do 42 000 min^{-1}), ktoré umožňuje prenos ultrazvukových kmitov do držiaka nástrojov. Kinematická štruktúra stroja

umožňuje kontinuálne 5-osové obrábanie. Do vretena stroja sa upína nástrojový držiak pomocou krátkeho kužeľa HSK 32. Na samotný držiak nástrojov sa upína nástroj. V tomto prípade bola použitá ultrazvuková fréza s priemerom 24 mm hrncovitého tvaru (takýto tvar sa označuje ako 6A9). Nástroj sa upína pomocou skrutky, ktorá má vo svojej osi priebežnú dieru kvôli vnútornému prívodu procesnej kvapaliny. Použitý stroj, jeho kinematika a ultrazvukový držiak nástrojov s upnutým rezným nástrojom sú zobrazené na Obr. 5.3 (Kuruc, 2015).

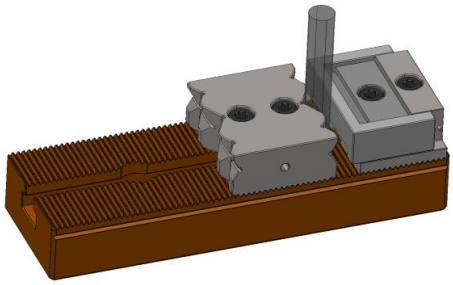


Obr. 5.3. Obrábacie centrum, jeho kinematika a rezný nástroj použitý v experimentoch

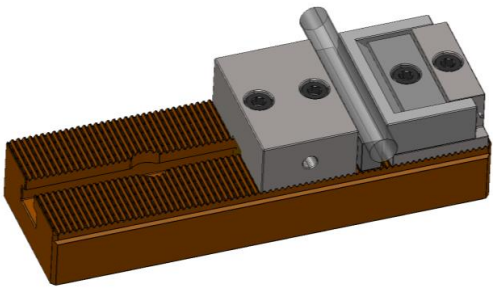
5.3 Návrh výrobných variantov

Prvý spôsob obrábania mnohouholníkového profilu tyče je zobrazený na Obr. 5.4. Jeho výhodou je takmer dokonalý mnohouholníkový profil vďaka dráham nástroja vygenerovaným CAM softvérom. Nevýhodou je rozhranie medzi obrobenými plochami pri prvom a druhom ustavení obrobku a tiež obmedzená dĺžka obrábania. Tá je v tomto prípade limitovaná na 42 mm. Prizmatická čeľusť môže byť po zmene ustavenia obrobku vymenená za čeľusť s rovinnými plochami.

Druhý spôsob, zobrazený na Obr. 5.5, nie je obmedzený dĺžku obrobku na základe rozmerov držiaka nástrojov, ale na základe pracovného priestoru. Pracovný priestor stroja má rozmery $200 \times 200 \times 280$ mm, čo znamená, že najväčšia dĺžka tyče, ktorú možno obrobiť je 200 mm. Počas výroby sú potrebné viaceré zmeny ustavenia obrobku (na obrobenie šesťuholníka aj osemuholníka by mali stačiť štyri ustavenia), avšak počet stratégii frézovania je ovplyvnený počtom vrcholov mnohouholníka (tzn. 6 pre šesťuholník a 8 pre osemuholník). V tomto prípade je čas obrábania, v porovnaní s prvým variantom, nižší a žiadne rozhranie, spôsobené napojením obrobených plôch nie je pozorované. Dokonca nie je nevyhnutný ani CAM softvér – program možno jednoducho vytvoriť priamo v riadiacom systéme obrábacieho stroja, avšak tvarová presnosť môže byť nižšia, nakoľko je ovplyvnená zmenami ustavenia obrobku, správnym umiestnením súradnicového systému, vypočítanou hĺbkou rezu, a opotrebením nástroja.

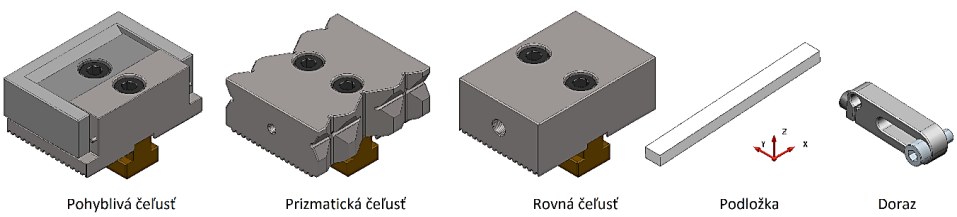


Obr. 5.4. Upínanie tyče v prvej etape obrábania



Obr. 5.5. Upínanie tyče pre druhý prístup obrábania

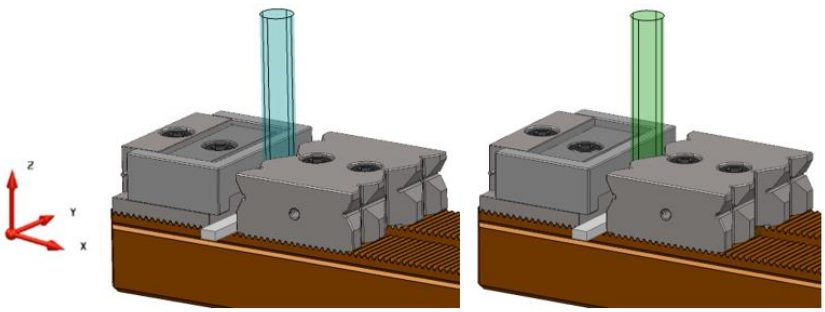
Oba varianty sa síce odlišujú vo svojich princípoch a tým aj v presnosti a produktivite, v oboch prípadoch je však použitý rovnaký upínací systém, ktorého hlavné časti sú zobrazené na Obr. 5.6. Rozdielne boli len rozmery použitých podložiek. Kým pri prvom variante sa použila nízka podložka, aby sa zbytočne neskracovala upínacia plocha obrobku a aby obrobok nemal príliš veľké vyloženie, v druhom variante sa použila vysoká podložka, aby bolo možné na ňu obrobok položiť a zároveň, aby obrábané plochy dostatočne presahovali okraje upínacích čeľustí.



Obr. 5.6. Hlavné časti upínacieho zariadenia

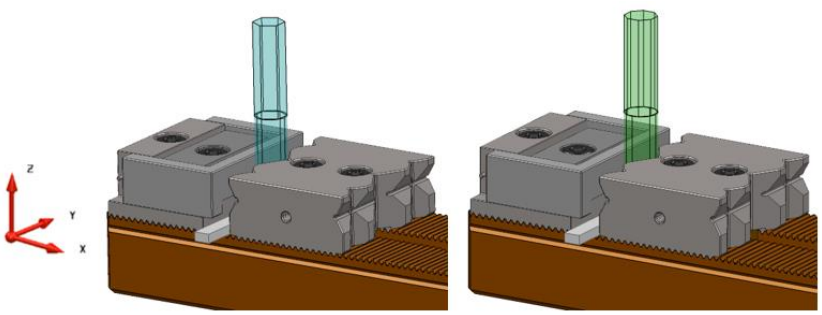
5.3.1 Postup výroby – prvý variant

Postup obrábania mnohouholníkovej tyče je zdokumentovaný na Obr. 5.7 *až* 5.10. Obrábaný materiál – oxid kremičitý je priehľadný kryštál, ale z dôvodu sprehľadnenia mu bola doplnená farba – tyrkysová pre šesťhran a zelená pre osemhran. Nakoľko je vstupným polotovarom kruhová tyč, upnutie sa realizovalo pomocou pevnej prizmatickej čeľuste. Pohyblivá čeľusť bola rovná. Aby sa polotovar nedotýkal zubov upínacieho zariadenia (Erowy), resp. aby sa polotovar nedostal do T-drážky, je na spodnej čelnej ploche podopretý brúsenou podložkou. Toto upnutie je znázornené na Obr. 5.7.



Obr. 5.7. Upnutie obrobku – prvé ustavenie

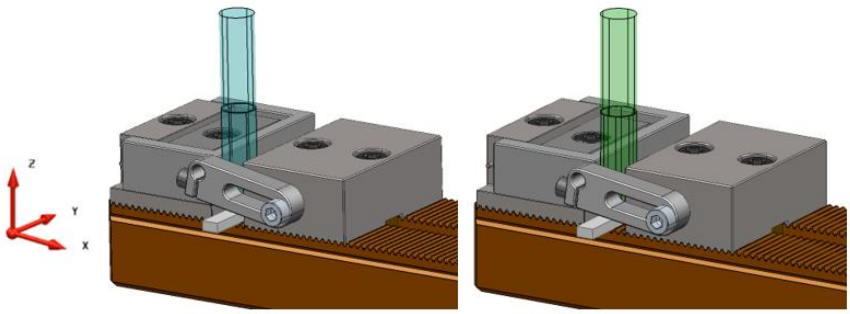
Po upnutí polotovaru bol stanovený nulový bod obrobku – súradnicový systém na základe ktorého stroj počíta dráhy, vygenerované CAM systémom Autodesk PowerMILL Ultimate 2020. Nulový bod bol umiestnený do stredu vrchnej čelnej plochy obrobku. Vzhľadom na už spomínané obmedzenie hĺbky, ktorú možno použitým nástrojom dosiahnuť, bola vzorka obrábaná iba do hĺbky 41 mm (o 1 mm hlbšie ako je polovica vzorky z dôvodu zabezpečenia presahu). Vzorku po obrobení vrchnej časti je vidieť na Obr. 5.8.



Obr. 5.8. Obrobené plochy – prvé ustavenie

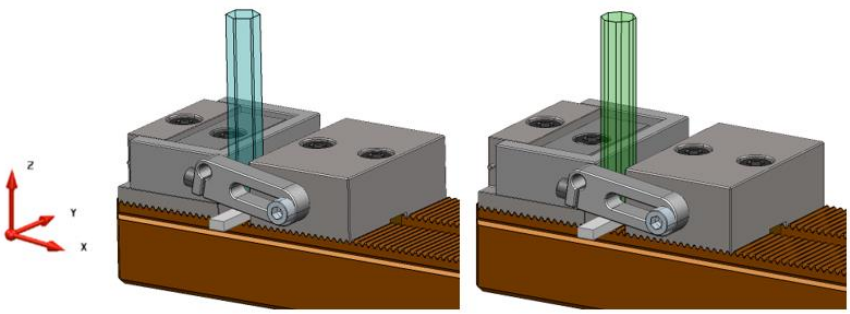
Keď už bola polovica obrobku obrobená, bolo potrebné zmeniť jeho ustavenie a upnúť za už obrobené plochy. Nakoľko aj šesťhran aj osemhran majú rovnobežné plochy, boli tieto plochy využité pri upínaní. A keďže profil mal rovinné plochy, tak vhodnejšia bola rovná

čeľusť než prizmatická. Pri rovnej čeľusti sa využil závitový otvor, ktorý sa nachádza na oboch bokoch čeľuste a pomocou skrutky sa namontoval doraz. Ten poskytol dodatočnú oporu – pri šesťhrane sa oň opiera hrana profilu, pri osemhrane celá plocha. Toto upnutie je zobrazené na Obr. 5.9.



Obr. 5.9. Upnutie obrobku – druhé ustavenie

Po upnutí sa musel znova stanoviť nulový bod obrobku, ktorý bol opäť zvolený do stredu (novej) vrchnej plochy (malo by dôjsť iba k posunu v smere osi Y). Potom mohlo nasledovať obrobenie zostávajúcej časti obrobku. Nebolo nutné generovať nový NC program, nakoľko dráhy sú tie isté ako na predošlej strane. V prípade, že nedošlo k posunutiu vzorky, malo by dôjsť k dokonalému napojeniu jednotlivých obrobených plôch, ako je vidieť na Obr. 5.10.

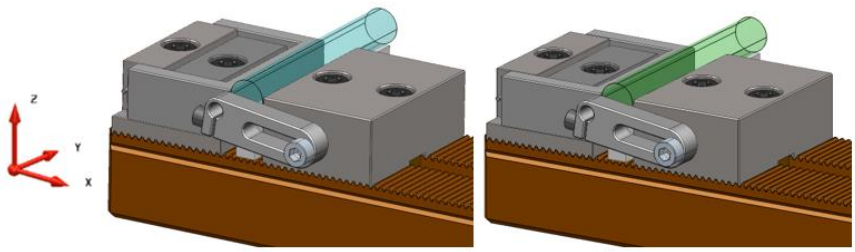


Obr. 5.10. Obrobené plochy – druhé ustavenie

Na takto obrobených vzorkách bolo vykonané meranie tvarovej presnosti za účelom posúdenia vhodnosti tohto prístupu na obrábanie polygonálnych vzoriek. Toto meranie bolo realizované pomocou digitalizácie obrobenej vzorky optickým 3D skenerom a následným porovnaním s referenčným CAD modelom, na základe ktorého boli generované dráhy obrábania.

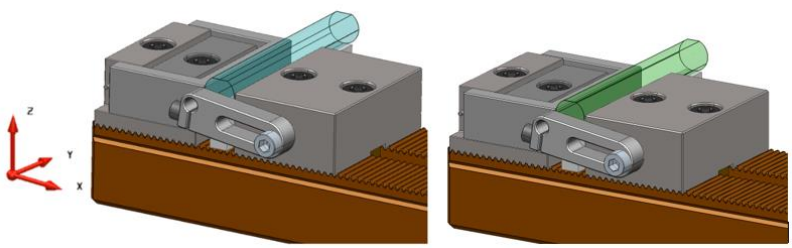
5.3.2 Postup výroby – druhý variant

Postup obrábania mnohouholníkovej tyče druhým spôsobom je zdokumentovaný na Obr. 5.11 až 5.20. V tomto prípade sa používala iba rovná čeľusť s bočným dorazom. Aby sa zabezpečila adekvátna výška polotovaru a jeho dostatočné podopretie, bola použitá brúsená podložka. Ak by bola podložka príliš vysoká, obrobok by nebolo možné upnúť, ak by bola podložka príliš nízka, nástroj by v procese obrábania mohol naraziť do častí upínacieho systému. Vhodnú zostavu upnutia dokumentuje Obr. 5.11.



Obr. 5.11. Upnutie kruhovej tyče v rovných čeľustiach

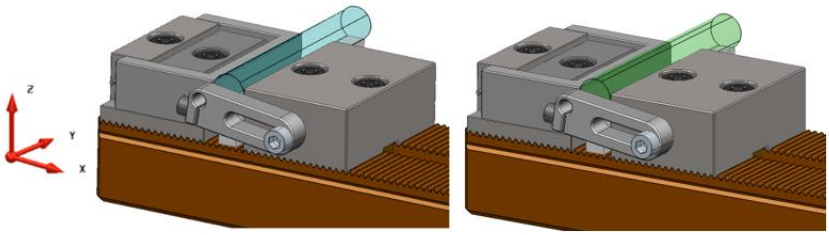
Po upnutí polotovaru bol definovaný nulový bod obrobku. Ten bol zvolený v strede (os X) na prednej čelnej ploche (os Y) v najvyššom bode povrchu valca (os Z). Na vytvorenie dráh obrábania nie je nutné využívať CAM softvér – pohyb nástroja je priamočiary. Taký jednoduchý pohyb sa jednoduchšie naprogramuje priamo v riadiacom systéme stroja, než sa stanovia všetky potrebné podmienky v CAM softvéri. Bolo nastavené obrábanie na jeden záber. Hĺbka rezu sa vypočítala na základe geometrie profilu (1,038 mm pre šesťuholník a 0,633 mm pre osemuholník). Pohyb nástroja bol nastavený takým spôsobom, aby rezná sila tlačila polotovar na doraz, ktorý zabraňoval posunutiu. Táto fáza obrábania je najkritickejšia, nakoľko obrobok je v minimálnom kontakte s upínacími plochami prípravku (teoreticky čiarový dotyk), iba doraz pôsobí na dostatočne veľkú plochu. Výsledok obrábania je znázornený na Obr. 5.12.



Obr. 5.12. Obrobenie prvej plochy

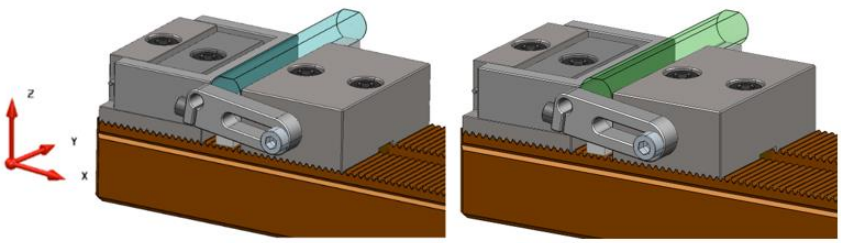
Po obrobení prvej plochy nasleduje prvá zmena ustavenia obrobku. Už obrobená plocha bola natočená tak, aby dosadla na brúsenú podložku upínacieho prípravku (otočenie o 180°).

Tým sa zvýšila stabilita upnutia a zabezpečila sa rovnobežnosť s druhou obrábanou plochou (Obr. 5.13)



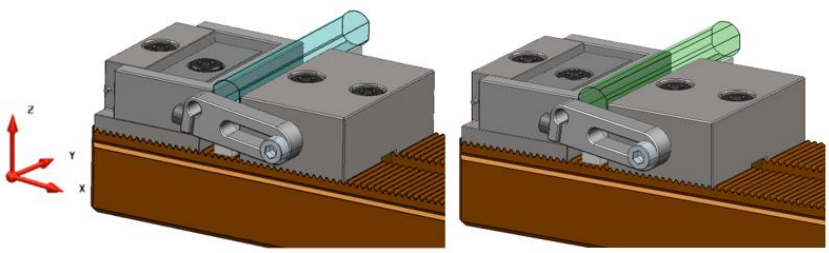
Obr. 5.13. Prvá zmena ustavenia obrobku

Opäť je potrebné premerať nulový bod (mal by iba klesnúť v smere osi Z o hodnotu hĺbky rezu). Následne je možné opäť realizovať obrábanie. Podmienky sú rovnaké ako pri predošlej ploche (hĺbka rezu 1,038 mm pre šesťuholník a 0,633 mm pre osemuholník). Obrobenie druhej plochy je znázornené na obr. 5.14.



Obr. 5.14. Obrobenie druhej plochy

Po obrobení druhej plochy je možné na upnutie využiť rovnobežnosť vytvorených plôch. Rovnobežné plochy sa upnú do čeľustí (otočenie o 90°) čím sa výrazne zlepší upnutie vzorky v porovnaní s upnutím pri prvom ustavení obrobku. Toto upnutie je vidieť na Obr. 5.15.

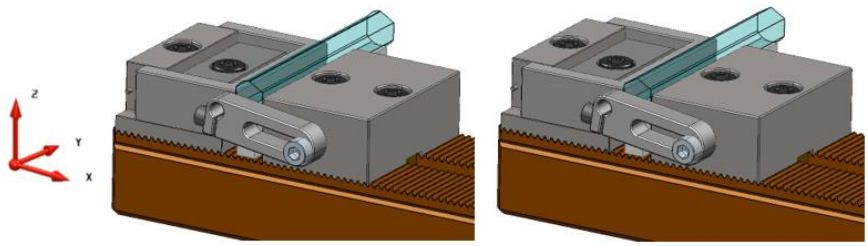


Obr. 5.15. Druhá zmena ustavenia

Po tejto operácii je potrebné opäť premerať nulový bod (mal by stúpnuť v smere osi Z o hodnotu hĺbky rezu a posunúť sa v smere osi X o dvojnásobok hodnoty hĺbky rezu). Na

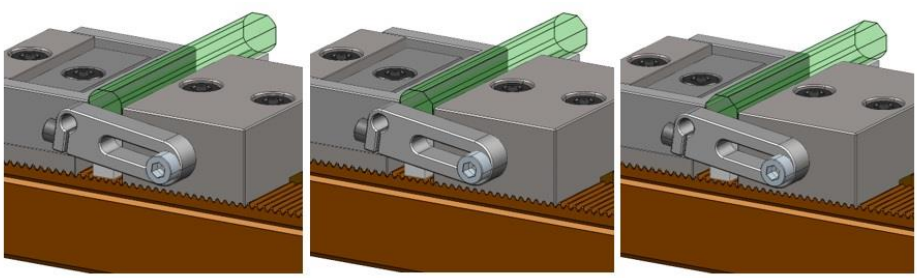
výrobu zostávajúcich plôch je potrebné využiť naklápací cyklus (v Sinumerik-u známy ako Cycle800). Tento cyklus využíva riadené rotačné osi stroja na naklopenie (otáčanie okolo osi X – zabezpečené kolískou) a natočenie obrobku (otáčanie okolo osi Z – zabezpečené otočným stolom). Následné obrábanie je potom realizované iba v troch osiach. Tomuto spôsobu obrábania sa hovorí 3+2 D frézovanie, alebo 5D frézovanie s indexovaním. Pri naklápaní je potrebné si dať pozor na to, aby nástroj nenabúral do upínacieho systému – v tomto prípade už nie je vhodné viesť nástroj stredom plochy, ale jeho periférioU (s minimálnym presahom) po hrane plochy priklonenej k zveráku. Prezentovaný postup bol do tohto kroku rovnaký pre šesťuholník aj pre osemuholník.

Pri šesťuholníkovom profile sa nakloní kolíska o požadovaný uhol (60°) a vyrobí sa tretia plocha. Otočením stola o 180° je možné bezprostredne vyrobiť aj štvrtú plochu. Hĺbka rezu bola 1,038 mm.Výrobu týchto dvoch plôch zobrazuje Obr. 5.16.



Obr. 5.16. Obrobenie tretej a štvrtej plochy šesťuholníkového profilu

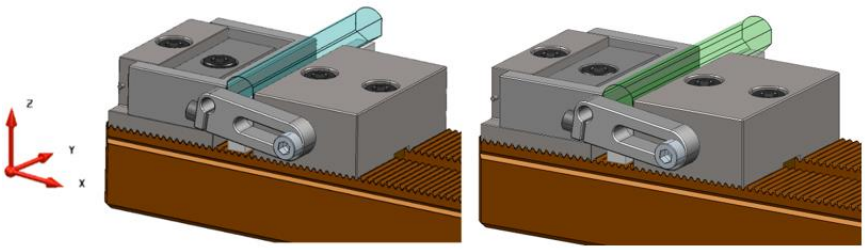
Pri osemuholníkovom profile možno vyrobiť tretiu plochu, ktorá je kolmá na predošlé dve. Následne sa nakloní kolíska o požadovaný uhol (45°) a vyrobí sa štvrtá plocha. Otočením stola o 180° možno hneď vyrobiť aj piatu plochu. Hĺbka rezu bola 0,633 mm. Vytvorenie týchto troch plôch je zobrazené na Obr. 5.17.



Obr. 5.17. Obrobenie tretej, štvrtej a piatej plochy osemuholníkového profilu

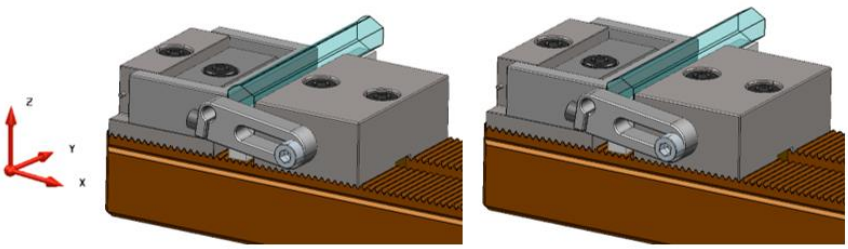
Na obrobenie posledných plôch je nutné opäť otočiť vzorku (o 180°). V prípade šesťhranu sa o podložku opiera hrana profilu, čo môže pri vyššom zaťažení viesť k jej poškodeniu. V prípade osemhranu sa o podložku opiera celá plocha, čo naopak zlepšuje kvalitu upnutia. Po upnutí je opäť potrebné premerať nulový bod (pri šesťhrane by mal v osi Z o trochu

klesnúť, pri osemhrane by mal v osi Z klesnúť o hodnotu hĺbky rezu). Výsledok upnutia je na Obr. 5.18.



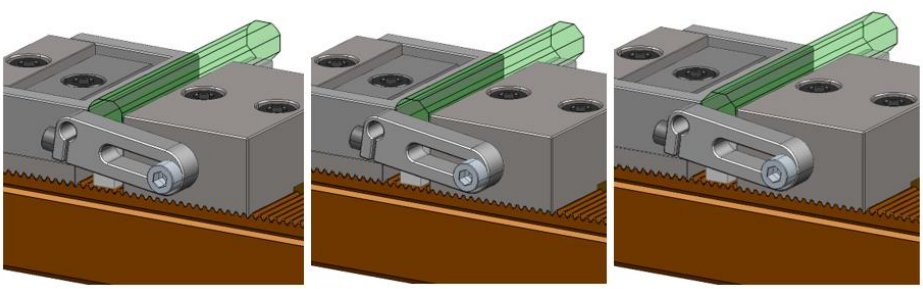
Obr. 5.18. Tretia zmena ustavenia

Ďalší postup je rovnaký ako bol pri predošlých dvoch plochách. V prípade šesťuholníka sa nakloní kolíska o požadovaný uhol (60°) a vytvorí sa piata plocha. Otočením stola o 180° možno vyrobiť aj šiestu plochu. Hĺbka rezu bola 1,038 mm. Tieto kroky dokumentuje Obr. 5.19.



Obr. 5.19. Obrobenie piatej a šiestej plochy šesťuholníkového profilu

Pri osemuholníkovom profile sa tiež postupuje rovnako ako pri predošlých troch plochách. Vytvobí sa šiesta plocha, ktorá je kolmá na zvislé plochy. Potom sa nakloní kolíska o požadovaný uhol (45°) a vyrobí sa siedma plocha. Otočením stola o 180° možno vyrobiť aj ôsmu plochu. Hĺbka rezu bola 0,633 mm. Tieto kroky dokumentuje Obr. 5.20.



Obr. 5.20. Obrobenie šiestej, siedmej a ôsmej plochy osemuholníkového profilu

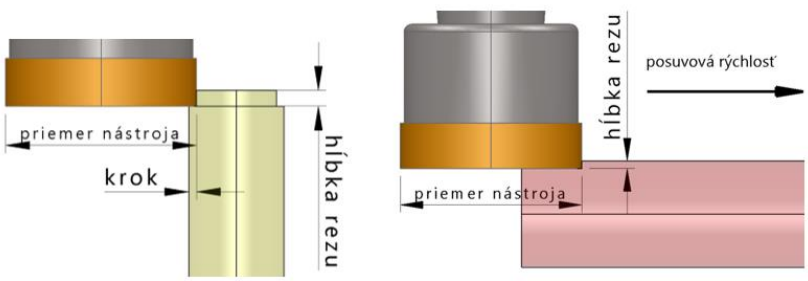
5.4 Parametre obrábania

Porovnanie parametrov obrábania je zaznamenané v Tab. 5.1. Pri prvom variante obrábania bol nastavený plný krok (nástroj zaberal celou svojou šírkou (priemerom)). Hĺbka rezu bola relatívne malá, čo bolo kompenzované vyššou posuvovou rýchlosťou. V druhom variante obrábania bolo tiež možné využiť plný krok, ale použitá bola väčšia hĺbka rezu. Tá bola kompenzovaná nižšou posuvovou rýchlosťou.

Tabuľka 5.1. Parametre obrábania

Variant	***#1***		***#2***	
Profil	šesťuholník	osemuholník	šesťuholník	osemuholník
Hĺbka rezu (mm)	0,050	0,150	1,038	0,633
Krok (mm)	1,038	0,633	7,116	5,817
Posuvová rýchlosť (mm.min^{-1})	1 200	1 200	100	150
Rezná rýchlosť (m.min^{-1})	250,0			
Ultrazvuková frekvencia (kHz)	21,5			
Priemer nástroja (mm)	24,0			
Čas obrábania (min)	180	62	10	10
Vedľajší čas (min)	10	10	15	15
Celkový čas (min)	190	72	25	25

Na Obr. 5.21 sú znázornené významné parametre z Tab. 5.1. Obrobok (znázornený žltou farbou) zodpovedá prvému variantu, kde veľkosť kroku bola závislá od vyrábaného profilu (1,038 mm pre šesťuholník a 0,633 mm pre osemuholník). Po obrobení jednej vrstvy klesol nástroj o hodnotu hĺbky rezu (0,05 mm a 0,15 mm). Obrobok (znázornený červenou farbou) zodpovedá druhému variantu. Hĺbka rezu bola závislá od vyrábaného profilu (1,038 mm pre šesťuholník a 0,633 mm pre osemuholník). Krok bol nastavený na celú šírku nástroja, čo predstavovalo pri šesťuholníku 7,116 mm a pri osemuholníku 5,817 mm. Rezná rýchlosť bola 250 m.min^{-1}, čo pri nástroji s priemerom 24 mm zodpovedá frekvencii otáčania vretena 3 316 min^{-1}.



Obr. 5.21. Zakótované parametre obrábania

Odporúčaná hĺbka rezu pre použitý materiál obrobku (SiO_2) je 0,05 mm. Táto hodnota bola nastavená pri obrábaní šesťhranu prvým spôsobom. Avšak kvôli nízkej hodnote kroku

boli pozorované veľmi malé hodnoty zaťaženia stroja. Preto sa táto hodnota strojnásobila pri osemuholníku. Pozorované zaťaženie stroja bolo stále veľmi malé, čo znamená, že je tu ešte priestor na zlepšenie (zvýšenie produktivity zvýšením hĺbky rezu). Avšak kvôli relatívne veľkému vyloženiu a krehkosti obrábaného materiálu by ďalšie zvýšenie hĺbky rezu mohlo zvýšiť riziko poškodenia obrobku.

Druhý prístup umožňuje tuhšie upnutie obrobku vďaka veľmi malému vyloženiu (je tu skôr riziko kolízie nástroja s upínacím systémom), preto tu bola použitá maximálna možná hĺbka rezu. Avšak zaťaženie stroja bolo príliš vysoké a preto bolo nevyhnutné kompenzovať oveľa väčšiu hĺbku rezu významne menším posuvom. Hodnota rýchlosti posuvu bola nastavená na základe pozorovaného zaťaženia stroja, pričom sa nezabúdalo ani na krehkosť vzorky. Geometria osemuholníka vyžaduje menšiu hĺbku rezu, čo znamená, že je tu možné využiť vyššiu rýchlosť posuvu (v porovnaní so šesťuholníkovým profilom). Kvôli vyššiemu počtu plôch bol výsledný čas obrábania približne rovnaký, ako pri obrábaní šesťuholníkového profilu.

V čase výroby obrobku nie sú zahrnuté vedľajšie časy, potrebné na činnosti, súvisiace so zmenou ustavenia obrobku. Prvý prístup vyžaduje iba jednu zmenu ustavenia, avšak tiež je potrebná výmena čeľustí. Táto činnosť vyžaduje približne 10 minút (profil nemá vplyv na tento čas). Druhý prístup vyžaduje tri zmeny ustavenia (pri poslednej zmene ustavenia sa vyrobia dve plochy pri šesťuholníku a tri plochy pri osemuholníku, to isté platí aj pre predposlednú zmenu ustavenia). Výmena čeľustí nie je potrebná. Na túto činnosť je potrebných približne 15 minút.

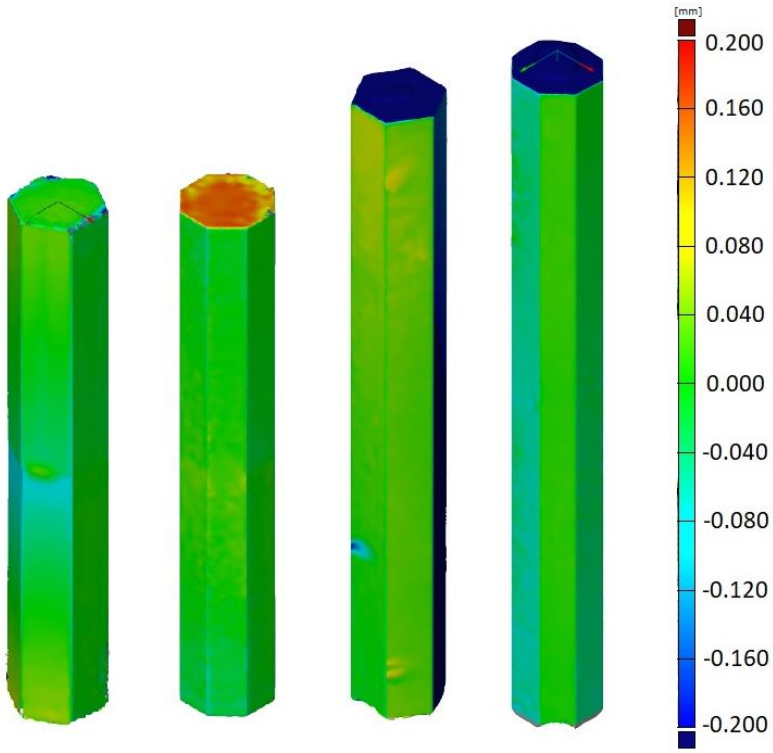
5.5 Výsledky merania rozmerových odchýlok

Pomocou prvého prístupu boli vytvorené dva hranolovité obrobky s dĺžkami 80 mm – jeden so šesťuholníkovým profilom a jeden s osemuholníkovým profilom. Druhým prístupom sa vyrobili ďalšie dva hranolovité obrobky tiež jeden so šesťuholníkovým profilom a jeden s osemuholníkovým profilom, ale s dĺžkami 100 mm a 110 mm. Všetky štyri vzorky boli digitalizované pomocou optického 3D skenera GOM Atos II Triplescan. Ten využíva na skenovanie modré štruktúrované svetlo. Jeho lom na skenovanej súčiastke zaznamenávajú dve CCD kamery. Ich výstupom je mrak bodov, ktoré po následnej polygonizácii vytvoria sieťový model. Nastavenie parametrov digitalizačného zariadenia je zaznamenané v Tab. 5.2.

Tabuľka 5.2. Parametre skenovacieho procesu

Parametre of 3D skenovania	
Merací objem (mm)	MV 170 (170 × 130 × 130)
Vzdialenosť meraných bodov (pre MV 170) (mm)	0,071
Uhol medzi CCD kamerami (°)	20
Meracia vzdialenosť (mm)	490
Priemer referenčných bodov (mm)	0,8
Expozičný čas (s)	3
Kvalitatívne nastavenie (-)	viac bodov
Rozlíšenie (Mpx)	5

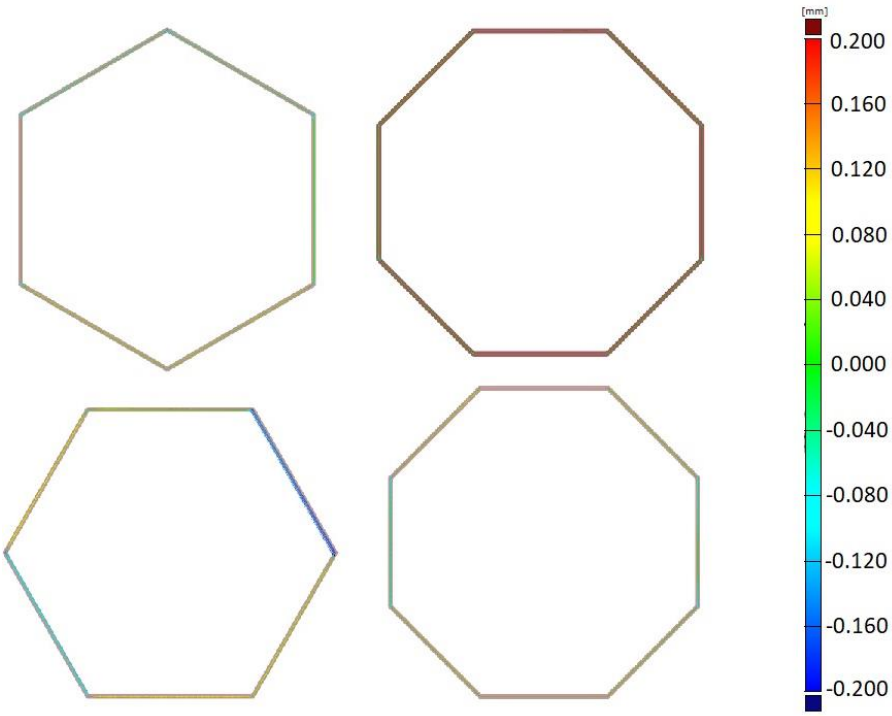
Výsledky merania sú zobrazené na Obr. 5.22 a 5.23. Na Obr. 5.22 je znázornená farebná mapa odchýlok. Možno tu vidieť rozhranie na kratšom šesťuholníku spôsobené zmenou ustavenia pri obrábaní, pri použití prvého variantu výroby. Toto rozhranie je výrazne menšie v prípade osemuholníka kvôli ďalšej ploche, ktorá môže byť použitá pri upínaní (šesťuholník mal na tento účel k dispozícii minimálnu stykovú plochu (teoreticky čiarový dotyk), ktorá nestačila na zabezpečenie požadovanej presnosti). V tomto prípade (prvý prístup) sa obrábali aj čelné plochy kvôli skráteniu dĺžky vzoriek na 80 mm. Pri druhom prístupe nebolo nutné obrábať čelné plochy, preto tu možno pozorovať vysokú nepresnosť. Na farebnej mape odchýlok je vidieť celé povrchy znázornené modrou farbou – to znamená, že je tam zaznamenaná vysoká hodnota zápornej odchýlky. Je to spôsobené nepresnosťou naklápania kolísky, malým posunutím počas upnutia alebo opotrebením nástroja. Opotrebenie sa prejaví skrátením nástroja – a pokiaľ je rezný nástroj kratší, nedosiahne požadovanú hĺbku rezu. Aj pri tomto prístupe boli dosiahnuté lepšie výsledky pri osemuholníku.



Obr. 5.22. Farebná mapa odchýlok

Obr. 5.23 znázorňuje rozdiely profilov od požadovaného tvaru. Výsledky potvrdili predpoklad – prvý prístup vytvorí presnejší tvar profilu. Odchýlka sa pohybovala od -0,05 do +0,03 mm pre šesťuholníkový profil a od -0,02 do +0,02 mm pre osemuholníkový profil. Druhý prístup vykazoval odchýlky tvaru od -0,18 do +0,16 mm pre šesťuholníkový profil a od -0,06 do +0,02 mm pre osemuholníkový profil. Počas obrábania dlhšieho šesťuholníkového profilu mohli nastať posunutia počas upnutia kvôli malým kontaktným

plochám a väčšej hĺbky rezu (o 64 % väčšia oproti osemuholníkovému profilu), preto sú v tomto prípade dosiahnuté výrazne horšie výsledky ako v ostatných prípadoch.



Obr. 5.23. Odchýlky profilu

Záver

Na základe získaných výsledkov možno vyvodiť záver, že technológia RUM dokáže zabezpečiť dostatočne presné obrobenie preforiem na ťahanie optických vlákien. Pri výrobe je odporúčané pravidelne kontrolovať rozmerové opotrebenie rezného nástroja, merať a korigovať uhol sklonu upnutého obrobku a využiť brúsené podložky a dorazy. Čas výroby prvých dvoch obrobkov bol 4 h 22 min. Profil by nemal mať žiaden výrazný vplyv na čas obrábania. Pri druhom prístupe bol čas obrábania 50 min. V tomto čase bol zahrnutý čas potrebný na činnosti súvisiace so zmenu ustavenia obrobku. Celkový čas je výrazne nižší oproti času obrábania pôvodnou metódou – brúsením (kde bol uvádzaný čas výroby 10 *až* 16 h). Technológiu RUM možno považovať za vhodnú náhradu brúsenia preforiem vzhľadom na jej produktivitu; alebo v prípadne vysokých nárokov na presnosť je táto metóda vhodná na hrubovanie preforiem pred samotným brúsením, aby sa čo najviac znížil čas výroby a zároveň dosiahla požadovaná kvalita povrchu.

Zoznam bibliografických odkazov

ABRATE, S., GAUDINO, R. and PERRONE, G. 2013. Step-Index PMMA Fibers and Their Applications, *Current Developments in Optical Fiber Technology*, Sulaiman Wadi Harun and Hamzah Arof, IntechOpen, DOI: 10.5772/52746. [online]. [cit. 2020-01-12]. Dostupné na internete: <https://www.intechopen.com/books/current-developments-in-optical-fiber-technology/step-index-pmma-fibers-and-their-applications>.

Alicat. 2020. *Precision & repeatability in fiber optic manufacturing*. [online]. [cit. 2020-09-09]. Dostupné na internete: <https://www.alicat.com/knowledge-base/precision-repeatability-in-fiber-optic-manufacturing/>.

Fujikura. 2020. *Large core optical fibers (Energy transmission, Signal transmission).* [online]. [cit. 2020-09-09]. Dostupné na internete: <https://www.fujikura.co.jp/eng/products/optical/appliedoptics/01/2050108_12901.html >.

FUNKE, Ch. 2016. *GOM 3D Metrology Systems.* 1.SCR-Forum Weiβenburg. [online]. [cit. 2020-01-12]. Dostupné na internete: https://www.k3works.de/fileadmin/user_upload/News/005_presentation_optical_measurement.pdf>.

KURUC, M. 2015. *Ultrasonic Machining.* Dizertačná práca. STU MTF, 172 s.

LAURESEN, J. H. 2020. ATOS Triple Scan. Robust and Flexible industrial scanner. [online]. [cit. 2020-01-12]. Dostupné na internete: <https://www.zebicon.com/en/metrology-systems/3d-scanning/atos-triple-scan/>.

Sikora. 2020. *Quality assurance at the production of optical fiber cables.* [online]. [cit. 2020-09-09]. Dostupné na internete: <https://sikora.net/it/sikora-quality-assurance-at-the-production-of-optical-fiber-cables/>.

UFE. 2020. *Ústav fonetiky a elektroniky, Akadémie věd ČR. Vláknové lasery a nelineárna optika.* [online]. [cit. 2020-01-12]. Dostupné na internete: http://www.ufe.cz/cs/tym/vlaknove-lasery-nelinearni-optika>.

6 CNC SÚSTRUŽENIE V SCHAEFFLER SKALICA

ŠMIDA, M.

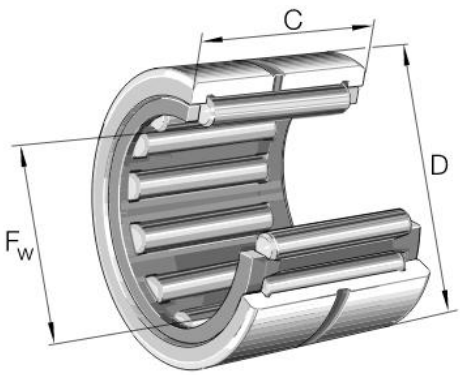
Úvod

V súčasnosti sú zo strany zákazníkov kladené vysoké požiadavky nielen na kvalitu a efektivitu výrobkov, ale aj na služby týkajúce sa ich životného cyklu. Dodávateľ musí spĺňať vysoké nároky vo viacerých oblastiach. Preto aj firma Schaeffler zavádza do svojich procesov najnovšie poznatky z manažmentu, technológie, personalistiky a iných oblastí.

6.1 Zákaznícky dopyt

Firma Schaeffler realizuje výrobu produktov doma spôsobmi. Jedným z nich je návrh a vývoj vlastného riešenia, druhým je reakcia na dopyt zákazníka po konkrétnom produkte. Kým v prvom prípade prieskum trhu a konštrukčný návrh je vykonávaný priamo vo firme Schaeffler, pri zákazníckom dopyte táto fáza prebieha u zákazníka, prípadne v úzkej spolupráci s firmou Schaeffler.

Predkladaná štúdia uvádza príklad návrhu výroby valčekového (ihlového) ložiska, zobrazeného na Obr. 6.1.



Obr. 6.1. Model súčiastky (Interné materiály Schaeffler, 2020)

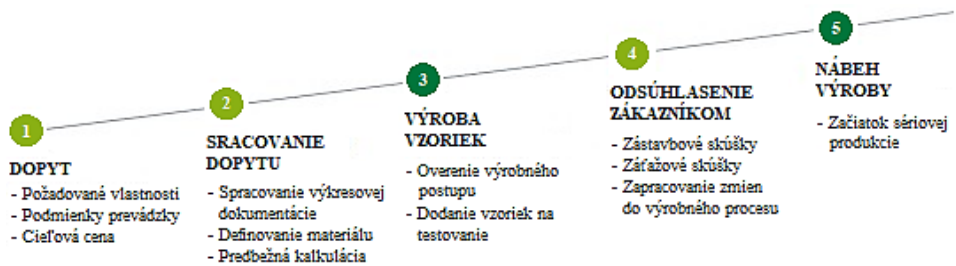
Aby bolo možné produkt vyrobiť v požadovanej kvalite, je potrebné poznať jeho cieľové vlastnosti, prípadne podmienky budúcej prevádzky (Tab. 6.1), medzi ktoré možno zaradiť:

- spôsob a veľkosť zaťaženia,
- frekvenciu otáčania,
- prostredie, v ktorom bude vyrábaná súčiastka pracovať, čo zahrňuje:
  - spôsob mazania,
  - prašnosť prostredia,
  - teplotné pomery.

Tabuľka 6.1. Vybrané parametre ihlového ložiska NK35/20 (Interné materiály Schaeffler, 2020)

Vlastnosť	***Hodnota***
Vnútorný priemer F_w (mm)	35
Vonkajší priemer D (mm)	45
Šírka C (mm)	20
Hmotnosť (g)	69,4
Dynamické zaťaženie radiálne C_r (N)	31 000
Statické zaťaženie radiálne C_{0r} (N)	48 500
Medza únavy radiálne C_{ur} (N)	8 600
Maximálna frekvencia otáčania (min^{-1})	12 900
Referenčná frekvencia otáčania (min^{-1})	7 400

Priebeh nábehu výroby je uvedený na Obr. 6.2, kde na základe dopytu a jeho následného spracovania nasleduje proces výroby vzoriek a po ich odsúhlasení zákazníkom nastáva samotný nábeh výroby.

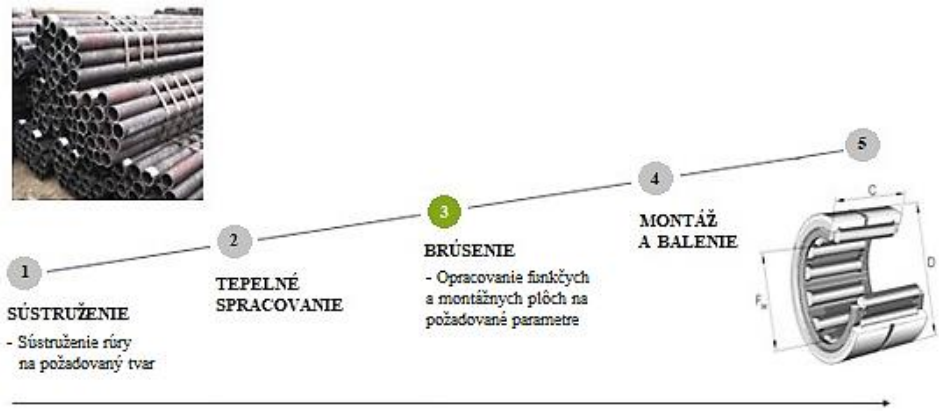


Obr. 6.2. Priebeh nábehu výroby (Interné materiály Schaeffler, 2020)

6.2 Výrobný postup – zohľadnenie presnosti a veľkosti výrobnej dávky

Podľa požadovaných tolerancií a najmä kvality funkčných plôch vyrábanej súčiastky je potrebné zvoliť postupnosť výrobných operácií. Napr. pre vysoko presné ložiská, príp. ak je požiadavka na ich nízku hlučnosť, je potrebné zaradiť ako dokončovaciu operáciu honovanie. Čo sa týka sústruženia, všetky sústruhy sú schopné vyrábať obrobky v toleranciách požadovaných pre následné operácie brúsenia a preto pri voľbe vhodného stroja rozhoduje komplexnosť výrobku a veľkosť výrobnej dávky.

CNC sústružnícke centrá sú využívané na výrobu súčiastok v objemoch výrobnej zákazky od niekoľkých desiatok kusov až po približne 5 000 ks. Nad tento objem už výroba súčiastok prechádza na viacvretenové automaty. U CNC sústruhov sa tieto objemy pohybujú od niekoľko sto kusov až po približne 25 000 ks. Oblasť sústruženia týchto strojov sa zvyčajne sústreďuje na dokončovacie operácie (Šmida, 2013). V prípade zadaného typu výrobku, ktorý je predmetom predloženej štúdie, zákazník požaduje dodať 25 000 ks ročne. Postup výroby je znázornený na Obr. 6.3.



Obr. 6.3. Bloková schéma výrobných operácií (Interné materiály Schaeffler, 2020)

6.3 Výber materiálu

Materiál dodávaný do firmy Schaeffler musí spĺňať podmienky definované internou normou. Tá predpisuje vlastnosti pre všetky formy materiálu: kruhové a ploché tyče, drôty, rúry a polovýrobky na ďalšie opracovanie. Napr. pre rúry stanovuje nasledovné stavy pri dodaní (Interné materiály Schaeffler, 2020):

- GKZ – žíhané na globulárny cementit, bez napätia,
- GKZW – žíhané na globulárny cementit, mäkké,
- GKZW+SH – žíhané na globulárny cementit, mäkké + lúpané,
- GKZ+K – žíhané na globulárny cementit + ťahané za studena,
- GKZ+K+G – žíhané na globulárny cementit + ťahané za studena + žíhané na hotovo,
- GKZ+K+SL – žíhané na globulárny cementit + ťahané za studena + brúsené,
- GKZ+KP – žíhané na globulárny cementit + valcované za studena na pútnickej stolici.

Z toho, v akom stave je materiál dodávaný, vychádzajú aj jeho mechanické vlastnosti, ktoré sú uvedené v Tab. 6.2.

Tabuľka 6.2. Mechanické vlastnosti materiálu (Interné materiály Schaeffler, 2020)

Polotovar	***Stav pri dodávke***	R_m (MPa)	***HBW 2,5/187,5***	***HV***	***HRB***
rúry, krúžky z rúry	GKZ	≤ 700	≤ 210	≤ 220	≤ 95
	GKZW	≤ 640	≤ 190	≤ 200	≤ 92
	GKZW+SH	≤ 640	≤ 190	≤ 200	≤ 92
	GKZ+K	870 *až* 1 080	259 *až* 319	272 *až* 335	-
	GKZ+K+G	≤ 880	≤ 261	≤ 275	≤ 103
	GKZ+K+SL	870 *až* 1 080	259 *až* 319	272 *až* 335	-
	GKZ+KP	870 *až* 1 080	259 *až* 319	272 *až* 335	-

Ďalej norma opisuje:

- vlastné napätia,
- chemické zloženie,
- štruktúru,
- vnútorné chyby,
- mikroskopický stupeň čistoty,
- makroskopické nekovové vtrúseniny,
- oduhličenie.

Nemenej dôležité na stanovenie optimálneho rozmeru polotovaru sú rozmerové tolerancie. Schaeffler má pre každého dodávateľa vypracovaný predpis, stanovujúci prípustné odchýlky rozmeru pre vonkajší priemer (Tab. 6.3) a hrúbku steny rúry (Tab. 6.4).

Tabuľka 6.3. Rozmerové tolerancie vonkajšieho priemeru rúry (Interné materiály Schaeffler, 2020)

Rozmer materiálu (mm)	***Odchýlka*** (mm)
< 30	± 0,2
> 30 ≤70	± 0,3
> 70 ≤101	± 0,3
>101 ≤120	± 0,4

Tabuľka 6.4. Rozmerové tolerancie pre hrúbku steny rúry (Interné materiály Schaeffler, 2020)

Rozmer materiálu (mm)	***Hrúbka steny*** (mm)	***Odchýlka***
<30	<3,75	± 0,15 mm
	>3,75	± 4 %
>30≤101	<5	± 0,2 mm
	>5<8,75	± 4 %
	>8,75	± 0,35 mm
>101≤120	-	± 5 %

6.3.1 Voľba polotovaru

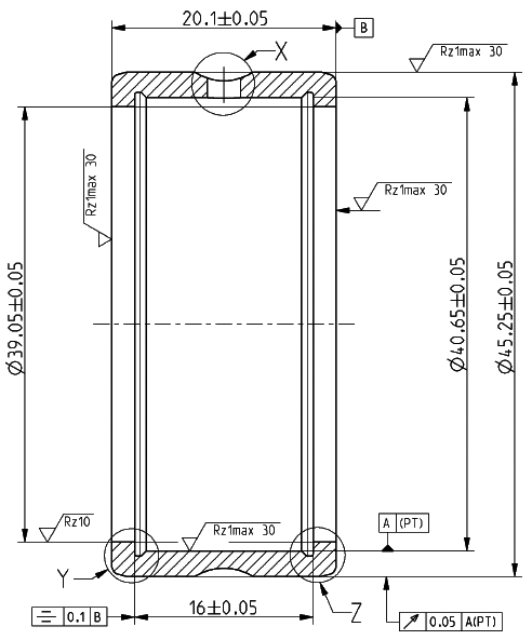
Na výrobu ložísk sa v prevažnej miere využíva materiál s označením 100Cr6, podľa EN 101 32-4. Slovenský ekvivalent je 14 109, podľa STN 41 4109. Polotovary sú vo forme rúr, tyčí, plechov, ale aj výkovkov rôznych tvarov. Medzi hlavných dodávateľov polotovarov pre firmu Schaeffler patria firmy Maxhütte Rohrwerk a Ovako. Vlastnosti materiálu 100Cr6, použitého na výrobu vonkajšieho krúžku NK35/20 (Obr. 6.4) sú uvedené v Tab. 6.5.

Tabuľka 6.5. Vlastnosti materiálu 100Cr6 (Jana, 2014)

Polotovar	***Pevnosť v ťahu*** (MPa)	***Tvrdosť HB***	***Teplota žíhania na mäkko*** (°C)	***Teplota kalenia*** (°C)	***Teplota popúšťania*** (°C)
bezšvové rúrky	608 *až* 726	max. 220	720 *až* 760	820 *až* 850	150 *až* 220
výkovky		max. 210			

Ide o chrómovú oceľ s obsahom 0,9 *až* 1,1 hm. % C. Vhodná je na výrobu guľôčok od priemeru 0,25 mm, ihličiek a súdkov od priemeru 0,18 mm a krúžkov valivých ložísk do hrúbky steny 16 mm. Oceľ je dobre obrábateľná a tvárna za studena (Řasa a Švercl, 2007).

Takmer každý dodávateľ hutného materiálu má stanovené minimálne odberné množstvo. Pred rozhodnutím o objednaní nového materiálu, alebo využitie už existujúcej položky, je potrebné stanoviť rozmer potrebnej rúry.



Obr. 6.4. Výrobný výkres vonkajšieho krúžku NK35/20

Pre vonkajší priemer rúry platí vzťah (6.1):

$$P_{vo} = MP_{vo} + HT + 2 \cdot P \tag{6.1}$$

kde P_{vo} je vonkajší priemer rúry (mm),

MP_{vo} – menovitý priemer obrobku (mm),

HT – horná tolerancia obrobku (mm),

P – prídavok na obrábanie (mm).

Pre hrúbku steny rúry platí vzťah (6.2):

$$P_{vn} = \frac{P_{vo} - MP_{vn} + DT - P}{2} \tag{6.2}$$

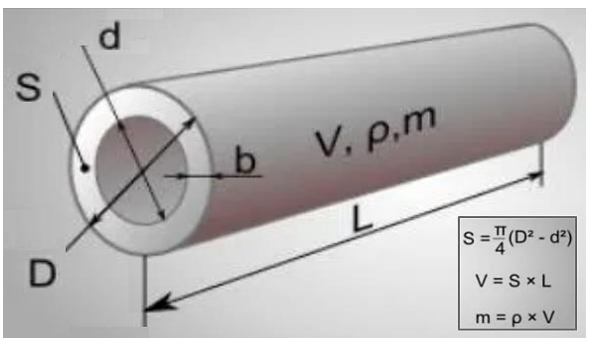
kde P_{vn} je vnútorný priemer rúry (mm),
P_{vo} – vonkajší priemer rúry (mm),
MP_{vn} – menovitý priemer obrobku (mm),
DT – dolná tolerancia obrobku (mm),
P – prídavok na obrábanie (mm).

Pre prípad vonkajšieho krúžku NK35/20 platí:

$$P_{vo} = 45{,}25 + 0{,}05 + 2 \cdot 0{,}3 = 45{,}9 \text{ mm}$$

$$P_{vn} = \frac{45{,}90 - 39{,}05 + (-0{,}05) - 0{,}2}{2} = 3{,}325 \text{ mm}$$

Z výpočtu je zrejmé, že vhodné rozmery rúry sú 45,9 × 3,33 mm. Následne je potrebné stanoviť množstvo (hmotnosť) materiálu potrebného na ročnú výrobu, čo je súčin objemu medzikružia a mernej hustoty materiálu (Obr. 6.5).



Obr. 6.5. Výpočet hmotnosti polotovaru

K dĺžke dielu L, na výpočet potreby materiálu, je nutné pripočítať prídavok na zarovnanie čelnej plochy 0,5 mm a prídavok na odpichnutie osústruženého obrobku 2 mm. Potom pre hmotnosť platí vzťah (6.3):

$$m = \rho . \frac{\pi}{4} . (D^2 - d^2) . L \tag{6.3}$$

Pre prípad vonkajšieho krúžku NK35/20 platí:

$$m = 7850 \cdot \frac{3{,}14}{4} \cdot (0{,}0459^2 - 0{,}0317^2) \cdot 0{,}0226 = \ 0{,}153 \text{ kg}$$

Hmotnosť polotovaru pre jeden diel je 0,153 kg, z toho vyplýva spotreba materiálu na ročnú výrobu dielov 25 000 · 0,153 = 3 825 kg. Dodávateľ rúrkového polotovaru má podmienku minimálneho dodacieho množstva 2 000 kg. Toto množstvo je splnené, v inom

prípade by bolo nutné nájsť vhodný materiál z už dodávaných typov polotovarov. Použitím alternatívneho rozmeru materiálu môže dôjsť k nárastu prídavkov na obrábanie a tým aj nárastu cyklového času pri sústružení.

6.4 Kalkulácia výrobných nákladov

Strojová tarifa sa skladá z viacero zložiek, nie je tu len spotreba energie a spotreba náradia, ale aj náklady na personál. Ďalej je potrebné zohľadniť všetky podporné činnosti v celom podniku. Sem vstupujú všetky oddelenia od nákladov na stráženie závodu až po upratovacie služby. Čím je podnik väčší, tým viac podporných útvarov obsahuje a s tým sa aj pomer „vedľajších“ nákladov zvyšuje. Náklady na náradie je samostatná položka strojovej tarify.

Veľkosť výrobnej dávky, alebo optimálna výrobná dávka, je kompromisom medzi zákazníkom požadovanom intervale dodávok, počtom zoraďovaní stroja a veľkosťou skladovej zásoby.

Kalkulácie pre všetky produkty vytvára kalkulačný technik v prostredí programu ProKalk. Do databázy programu sú nahraté parametre pre všetky výrobné pracoviská v Schaeffler Skalica. Kalkulačný technik najprv vytvorí výrobný plán z potrebných operácií na výrobku a následne týmto operáciám priradí cyklové časy a čas potrebný na zoradenie. Vo výsledku sú prehľadne zobrazené dáta pre každú operáciu. Príklad kalkulácie v programe ProKalk je uvedený na Obr. 6.6.

Fertigungskosten I und II

Bezeichnung	Externe Fertigung [EUR/Stk]	Arbeitssystem [EUR/Stk]	Rüsten [EUR/Stk]	Direkte Arbeitskosten [EUR/Stk]	Werkzeuginstandhaltung [EUR/Stk]	FK I [EUR/Stk]	RFGK [EUR/Stk]	Ausschuss [EUR/Stk]	Werkzeugumlage [EUR/Stk]	FK II [EUR/Stk]
0001-QS Direkt	0,00	0,0022	0,00	0,011	0,00	0,013	0,00	0,00	0,00	0,013
0002-QS Direkt	0,00	0,00075	0,00	0,0019	0,00	0,0026	0,00	0,00	0,00	0,0026
0003-QS Direkt - Messmittelvorbereitung	0,00	0,0016	0,00	0,0042	0,000014	0,0058	0,00	0,00	0,00	0,0058
0020-DREHEN CNC - SUSTRUZENIE SBL NAHOTOVO	0,00	0,46	0,031	0,31	0,33	1,12	0,00	0,00	0,00	1,12
0040-WASCHEN-PRANIE KB2	0,00	0,024	0,00	0,016	0,00	0,040	0,00	0,00	0,00	0,040
0060-ROLLHAERTEN - KALIT LOI	0,00	0,44	0,12	0,084	0,00	0,65	0,00	0,00	0,00	0,65
0080-HOEHE SCHLF-BRUS. VYSKY K LAPOVANIU	0,00	0,041	0,014	0,030	0,0013	0,087	0,00	0,00	0,00	0,087
0085-" rucne ukladat na plastove mriezky "	0,00	0,0057	0,00095	0,029	0,00	0,036	0,00	0,00	0,00	0,036
0090-WASCHEN-PRANIE	0,00	0,0040	0,00	0,0053	0,00	0,0093	0,00	0,00	0,00	0,0093
0100-VORSCHLEIFEN - PREDBRUS ADM	0,00	0,010	0,048	0,0086	0,0011	0,068	0,00	0,00	0,00	0,068
0120-WASCHEN - PRANIE KB5	0,00	0,0040	0,00	0,0053	0,00	0,0093	0,00	0,00	0,00	0,0093
0132-HOEHE LAEPPEN-LAPOVAT CELA	0,00	0,29	0,0052	0,14	0,047	0,48	0,00	0,00	0,00	0,48
0138-WASCHEN-PRANIE	0,00	0,0040	0,00	0,0028	0,00	0,0068	0,00	0,00	0,00	0,0068
0140-BRUSENIE OTVORU+Brusenie vnutornej hrany	0,00	0,21	0,033	0,17	0,075	0,48	0,00	0,00	0,00	0,48
0150-WASCHKON.KB5-PRAT A KONZER. KB5	0,00	0,0040	0,00	0,0053	0,00	0,0093	0,00	0,00	0,00	0,0093
0160-HONOVANIE OBEZNEJ DRAHY	0,00	0,047	0,017	0,054	0,023	0,14	0,00	0,00	0,00	0,14
0167-WASCHEN - PRANIE KB5	0,00	0,0040	0,00	0,0053	0,00	0,0093	0,00	0,00	0,00	0,0093
0200-SCHLEIF.ADM - BRUS.POVRCHU NAHOTOVO	0,00	0,24	0,052	0,11	0,027	0,43	0,00	0,00	0,00	0,43
0230-WASCHEN-PRANIE KB5 / HOJDAT !	0,00	0,0040	0,00	0,0053	0,00	0,0093	0,00	0,00	0,00	0,0093
0231-PRAT A KONZER. KB9	0,00	0,0065	0,00	0,0028	0,00	0,0093	0,00	0,00	0,00	0,0093
0260-KONTROL. HAND - KONTROLA Duramax	0,00	0,22	0,0046	0,73	0,00	0,96	0,00	0,00	0,00	0,96
0290-KONSER.KA1 B.BED.- KONZ.KA 1 P. POTR.	0,00	0,021	0,00	0,0056	0,00	0,026	0,00	0,17	0,00	0,20
Summe	**0,00**	**2,04**	**0,33**	**1,73**	**0,51**	**4,60**	**0,00**	**0,17**	**0,00**	**4,77**

Obr. 6.6. Prostredie programu ProKalk

6.5 Správa náradia

Kompletnú správu náradia v Schaeffler Skalica zastrešuje sklad náradia. Správa skladu náradia zabezpečuje činnosti, ako sú:

- evidencia skladových položiek,
- uskladnenie v regáloch alebo liftoch,
- výdaj náradia na výrobné stredisko,

- príjem náradia z výrobného strediska,
- dopĺňanie zásob náradia, kde má nastavenú objednávaciu hladinu, tzv. signálny stav náradia,
- servis náradia, ktorý zahŕňa opravu poškodeného náradia, preostrenie opotrebovaného náradia, kontrolu náradia pred uskladnením.

Rozdelenie náradia podľa spôsobu použitia je na:

- Katalógové náradie ISO.
- Tvarové rezné náradie.
- Upínacie náradie.
- Základné náradie.

Katalógové náradie ISO

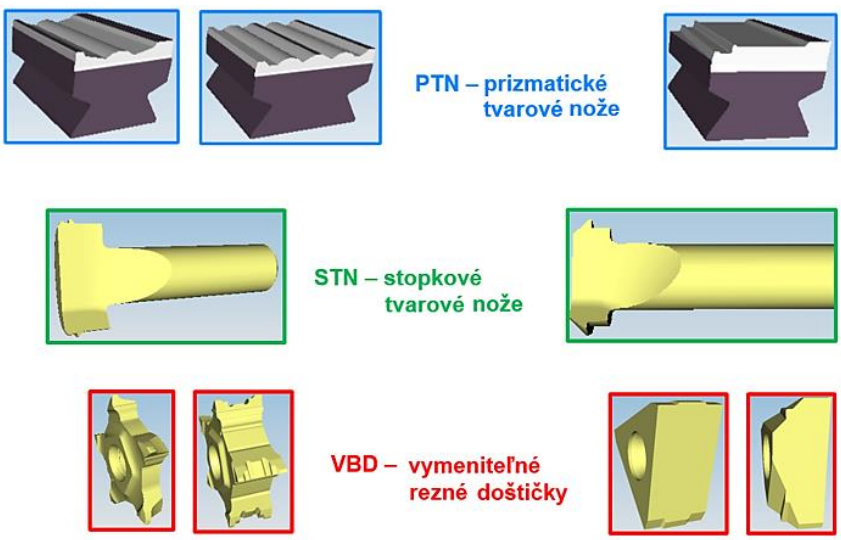
Tento druh náradia sa objednáva od rôznych dodávateľov a má jednotné základné katalógové označenie. Rozdelenie katalógového náradia ISO je vizualizované na Obr. 6.7. V sklade náradia sa najčastejšie nachádza v liftoch a vo výrobe je vydávané pomocou výdajných automatov (Obr. 6.8).

Obr. 6.7. ISO – rezné nástroje

Obr. 6.8. Výdajný automat (CMT, 2020)

Tvarové rezné náradie

Tento druh náradia sa objednáva na základe existujúceho výkresu, prevažne je viazané na daný typorozmer (TPRM), alebo vhodnú skupinu výrobkov. Zastúpenie dodávateľov na trhu je nižšie ako v prípade katalógového náradia. Rozdelenie tvarového rezného náradia je uvedené na Obr. 6.9.



Obr. 6.9. Tvarové rezné nástroje

Upínacie náradie

Upínacie hlavy s vymeniteľnou klieštinou (Obr. 6.10) dokážu upnúť len daný priemer obrobku, na ktorý boli vyrobené, dosahujú však vyššiu presnosť a tuhosť upnutia pri zanedbateľných deformáciách obrobku.

Obr. 6.10. Upínač s vymeniteľnou klieštinou

Upínacie skľučovadlá čeľusťové (Obr. 6.11) sú univerzálne vzhľadom na priemer obrobku, ale môžu spôsobiť deformácie pri upínaní a to pri menšej upínacej sile.

Obr. 6.11. Skľučovadlo čeľusťové

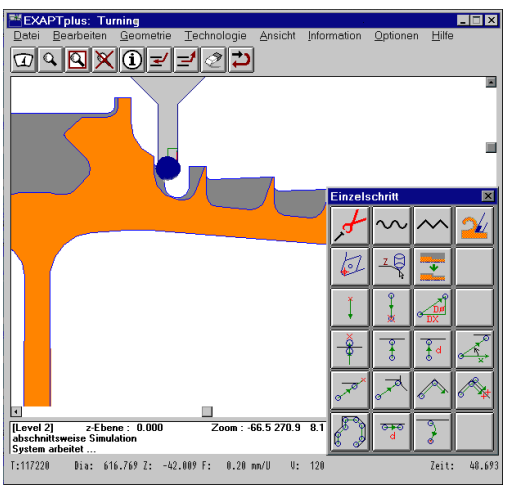
Základné náradie

Na CNC strojoch sa používa upínací systém VDI 40. Ide o upínací systém s valcovou časťou a ozubením, s upínacím rozmerom ø 40 mm. Slúži na upnutie do revolverovej hlavy obrábacieho stroja (Obr. 6.12).

Obr. 6.12. Vymeniteľné základné držiaky nástrojov

6.6 Tvorba NC programu

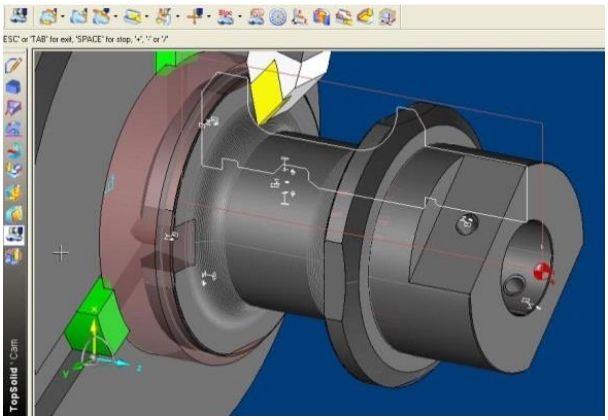
Programátorské centrum firmy Schaeffler Skalica má za úlohu vytvárať NC programy pre jednotlivé výrobné stroje v podniku. Organizačne je začlenené pod útvar centrálnej (podnikovej) technológie. V minulosti programátorské centrum využívalo na tvorbu NC programov software EXAPT plus (EXAPT Systemtechnik GmbH) (Obr. 6.13). V začiatkoch existencie firmy bol tento software dostačujúci, no postupným rozrastaním sa a zvyšovaním nárokov prestal vyhovovať.



Obr. 6.13. Ukážka prostredia Exapt plus (EXAPT Systemtechnik GmbH)

V súčasnej dobe firma používa CAD/CAM systém TopSolid (MISSLER software) (Obr. 6.14). S týmto softvérom možno realizovať úplnú parametrickú CAD konštrukciu od najjednoduchších súčiastok až po kompletné zostavy, celky, scény, kinetiku, renderovanie, generovanie výkresovej dokumentácie a pod. Na konštrukčný modul nadväzujú jednotlivé technologické CAM moduly – knihovne ďalšieho programového vybavenia, ktoré umožňujú realizovať výrobu v rôznych odboroch. Možno napr. navrhnúť frézovanie až v piatich osiach v oblasti spracovania kovových materiálov, ale aj drevných alebo iných materiálov, ďalej sústruženie, kombináciu sústruženia a frézovania a pod. Systému umožňuje komplexnú

simuláciu stroja s kontrolou kolízií a to aj pre kontinuálne obrábanie v piatich osiach. (CENTERSOFT)

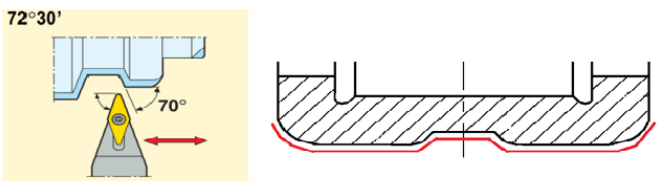


Obr. 6.14. Ukážka prostredia v prostredí TopSolid (CENTERSOFT)

Požiadavky na programátorské centrum sú zadávané cez plánovaciu tabuľu, v ktorej sú zoradené jednotlivé výrobné zákazky pre konkrétne stroje. Poradie výrobných zákaziek určuje feinplánovač po konzultácii s disponentmi na základe zákazníckych požiadaviek. O aktuálnosť plánovacej tabule sa stará feinplánovač, taktiež sa stará o priradenie výrobnej zákazky k danému stroju. Programátor na základe plánovacej tabule má prehľad o poradí a potrebách vytvorenia NC programu na konkrétne stroje. Aby sa zabránilo zbytočným nezhodám v práci programátorov, bol dohodnutý 48-hodinový fix pred štartom zákazky, v ktorom sa nesmie meniť poradie zákaziek. (Šmida, 2013)

6.6.1 Databáza nástrojov

Programátor alebo technológ vychádza z katalógov jednotlivých výrobcov náradia (elektronických alebo knižných), ktorí dodávajú náradie do podniku. Na Obr. 6.15 je znázornený výber nástroja s vymeniteľnou reznou platničkou (VRP) na základe reálnej kontúry a katalógového znázornenia možnej výroby kontúry konkrétnym nástrojom.



Obr. 6.15. Výber rezného náradia na základe vyrábanej kontúry

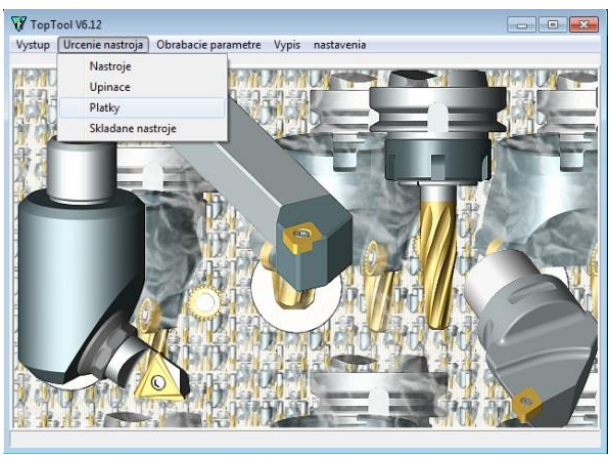
Takýmto spôsobom možno vybrať nástroje s VRP na obrábanie vonkajších krúžkov, a to pre kontúru na vonkajšom priemere. Držiak má označenie SVVBN, v podniku sa nachádzajú

varianty 2020 K16 a 2525 M16. Tento držiak je vhodný na výrobu vonkajších kontúr typovej rady ložísk AU.NK **/**. Ďalším krokom je voľba vhodnej VRP.

Ak je použitý nástroj s rôznymi VRP (VBMT1604**), pri voľbe je rozhodujúci len polomer hrotu VRP, v závislosti na spôsobe obrábania – polohrubovanie alebo dokončovanie. Z praktických skúseností sú pre typovú radu AU.NK postačujúce tieto VRP (Šmida, 2013):

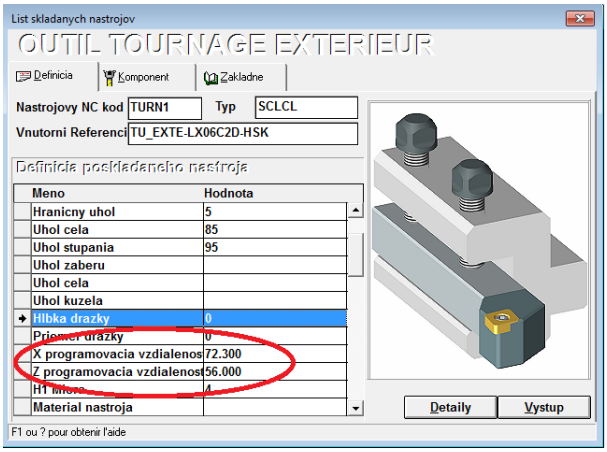
- VBMT 16 04 12 – na polohrubovanie.
- VBMT 16 04 08 – na dokončovanie.
- VBMT 16 04 04 – na dokončenie kombinovaných tvarov mazacích drážok.

Princíp kontúr, z hľadiska cieľov riešenej úlohy, často stačí opísať iba profil súčiastky v niektorom reze. Zvyčajne je rez totožný s rovinou dvojice posuvov. V reze je profil súčiastky definovaný čiarou, ktorá sa zvyčajne skladá z úsečiek a kruhových oblúkov. Tento spôsob reprezentácie súčiastky je vhodný a postačujúci pre rotačné súčiastky (Kuric a kol., 2002). Modely nástrojov sú vytvárané na základe výkresových podkladov jednotlivých výrobcov. S týmito modelmi možno pracovať v podprograme TopTool (Obr. 6.16), ktorý je súčasťou CAM modulu softvéru TopSolid.



Obr. 6.16. Podprogram na prácu s nástrojmi (TopSolid-Demos)

Podprogram TopTool pracuje s modelmi jednotlivých nástrojov usporiadaných do databáz. Umožňuje ich zostavovanie, prideľovanie jednotlivých údajov (napr. uhlových, rozmerových, technologických parametrov), následkom čoho sa vytvára databáza zostavených nástrojov s pridelenými vzdialenosťami X a Z (Obr. 6.17).

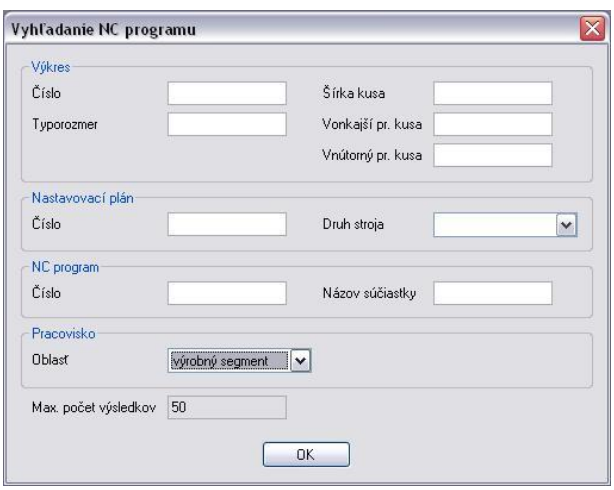


Obr. 6.17. Ukážka možnosti vytvorenia zostavy nástroja s VRP (TopSolid-Demos)

Elektronické zostavy náradia slúžia k uľahčeniu práce programátorov, čím odpadá neustále zostavovanie náradia pre potreby simulácie. Týmto sa vykoná i štandardizácia jednotlivých vytvorených zostáv náradia a ich vzdialeností v osiach X a Z. (Šmida, 2013)

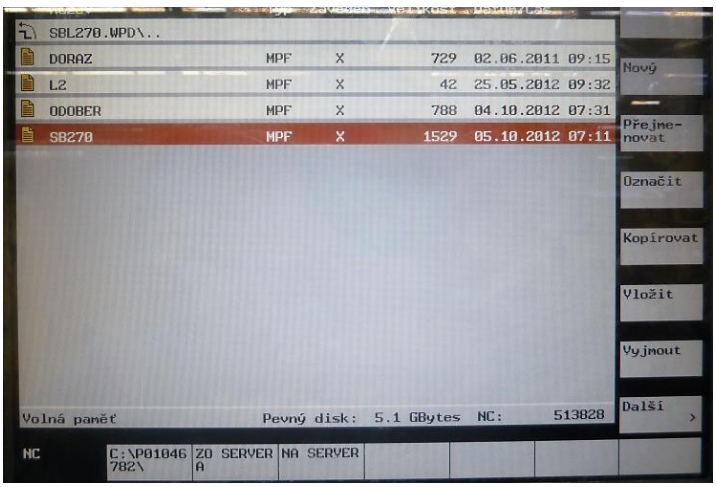
6.6.2 Databáza NC programov a DNC

Vytvorené NC programy sa ukladajú na vyhradené miesto na serveri, ku ktorému majú prístup programátori a určení zamestnanci. Na prácu s databázou NC programov slúži programová aplikácia s názvom „NC program“ (Obr. 6.18). Spôsob vyhľadávania je rozčlenený do viacerých úrovní: cez pole Výkres, Nastavovací plán, NC program a Pracovisko.



Obr. 6.18. Ukážka NC program – Vyhľadávanie

Tento program slúži tiež na distribúciu NC programov na jednotlivé pracoviská (CNC stroje) (Obr. 6.19). Databáza uchováva súbory, obsahujúce NC program, nastavovací plán a zoznam náradia vo formáte xls., ktoré slúžia na vytvorenie listu náradia v systéme SAP (tzv. kusovníky náradia). Využívajú ju títo pracovníci, začlenení do výrobného procesu: nastavovač (zoraďovač), prípravár, zmenový majster a technológ. Tak, ako funguje distribúcia NC programov smerom k výrobným strojom, funguje aj posielanie opačným smerom, pričom program je ukladaný do inej zložky, aby nedošlo k prepísaniu pôvodne vytvoreného NC programu. (Šmida, 2013)

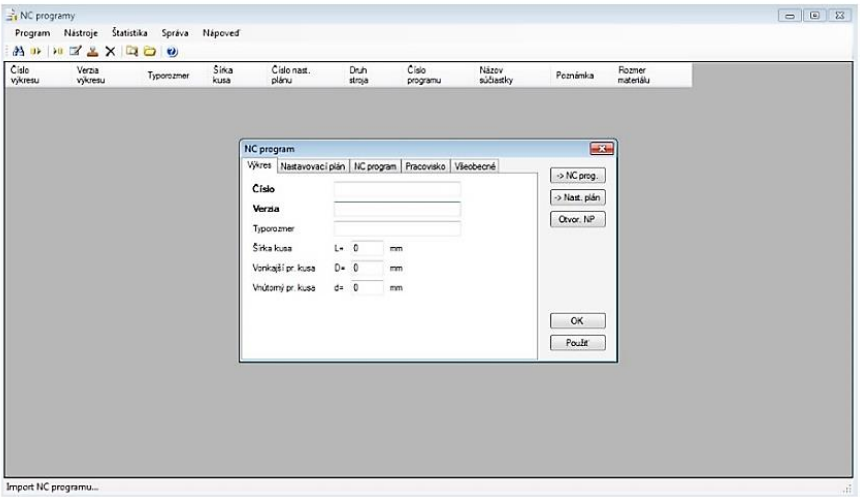


Obr. 6.19. Obrazovka stroja v zložke NC

6.6.3 Programovanie

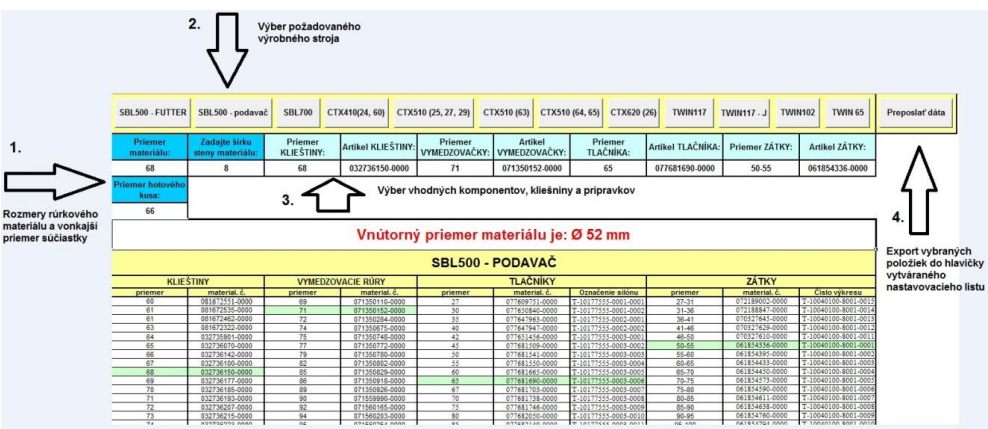
Ako pri väčšine ľudských činností, aj tvorba NC programov je založená z veľkej časti na odbornosti programátora. Pri štandardných katalógových výrobkoch je zavedená tzv. skupinová technológia, kedy sú technologicky podobné súčiastky obrábané rovnakým spôsobom. Pri neštandardných požiadavkách programátor vychádza z aktuálnych poznatkov z oblasti výrobných technológií, ktoré získava na školeniach a seminároch, organizovaných firmou Schaeffler alebo rôznymi dodávateľmi náradia. Týmto je zabezpečená aktuálnosť a efektivita výrobných procesov.

Pred samotným vytvorením NC programu musí programátor vykonať určité úkony, aby zabezpečil správne vygenerovanie NC programu a nastavovacieho plánu. Cez program „NC program“ (Obr. 6.20) musí vytvoriť zložku v úložisku na podnikovom serveri, do ktorej bude uložený NC program a nastavovací plán.



Obr. 6.20. Program NC program

Ak sú vytvorené všetky náležitosti okolo označenia a archivácie, prejde programátor k vyhľadaniu komponentov, potrebných na upnutie obrobku, manipuláciu a pod. Systém vyhľadávania funguje na tabuľkových zoznamoch jednotlivých komponentov pre daný výrobný stroj. Obr. 6.21 znázorňuje tento tabuľkový vyhľadávač. Princíp spočíva v zadaní rozmerov vstupného materiálu, a to vonkajšieho priemeru a hrúbky steny, ak ide o rúru (krok 1). V prípade ak stroj disponuje odoberacím zariadením na hotové obrobky, je potrebné zadať i jeho vonkajší priemer. Potom programátor vyberie požadovaný sústruh (krok 2) a na základe algoritmov, vytvorených v programe Microsoft Visual Basic, je vykonaný výber vhodných komponentov (krok 3). Ak programátor vytvára nový nastavovací plán, môže tieto vybrané komponenty exportovať do hlavičky nastavovacieho plánu (krok 4).



Obr. 6.21. Vytvorený tabuľkový vyhľadávač pre upínače a ostatné komponenty

Tieto komponenty sú použité v hlavičke nastavovacieho plánu (Obr. 6.22).

Typ:	AU,NK90/25-0012-HAR	Čís.výkr.:	NK90/25-12	Čís.prog.:	SB404	Verzia výkresu :	AD		
						Verzia NP :	00		
Mat.číslo :	051020467-0000					číslo zakázky :			
Zástrepky do nástr.hlavy :		Ks	KOMPONENTY			Upínací tlak :	8-25	bar	
Upínacia kliešťina :	D=111	Materiál ø	110,9X6,75	Vymedzovacia rúra :	D=115				
	032738188-0000				074635123-0000				

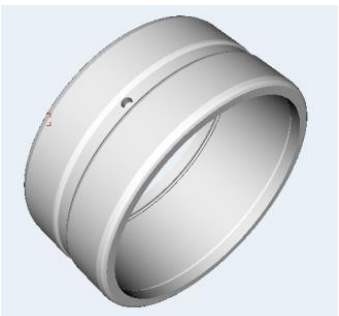
Obr. 6.22. Ukážka hlavičky nastavovacieho plánu

Ako je uvedené na Obr. 6.22, v hlavičke nastavovacieho plánu je ku každému komponentu pridelené trinásťmiestne číslo, tzv. materiálové alebo artiklové číslo. Materiálové čísla zabezpečujú správne vydanie a vrátenie komponentov a náradia z/do skladu náradia.

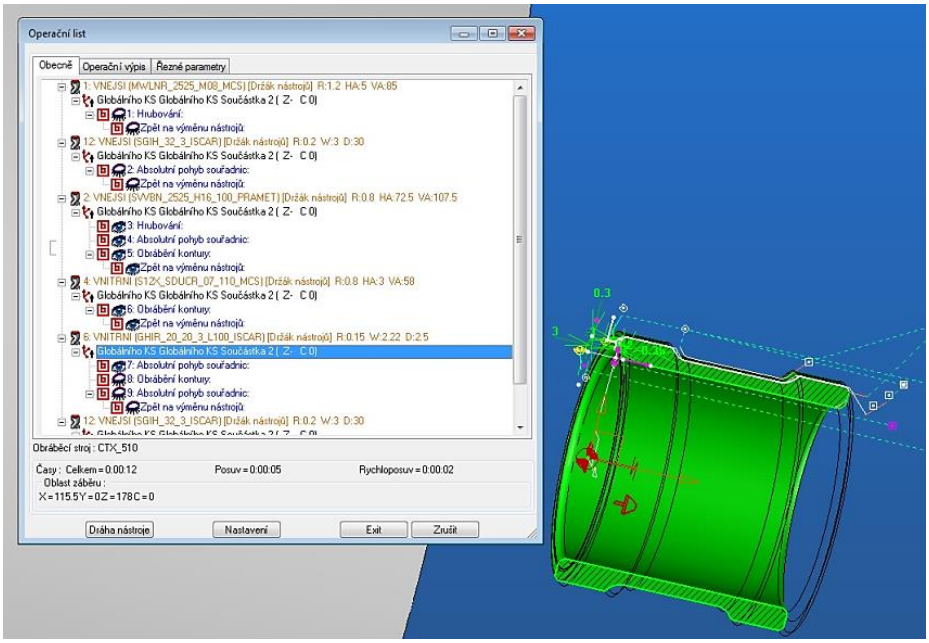
V ďalšom kroku programátor pristúpi k modelovaniu súčiastky. V prípade existencie modelu súčiastky (Obr. 6.23), programátor exportuje tento model priamo do prostredia CAM v systéme TopSolid. V druhom prípade, ak neexistuje model súčiastky, na základe výkresu súčiastky vytvorí programátor priestorový model v CAD prostredí TopSolidu.

Práca v CAM module systému TopSolid zahrňuje (Šmida, 2013):

- definovanie polotovaru,
- definovanie nástrojov,
- definovanie stratégií obrábania (Obr. 6.24),
- simulácii a verifikáciu procesu obrábania,
- vytvorenie CLDATA,
- vygenerovanie NC programu s použitím postprocesora,
- vytvorenie nastavovacieho plánu,
- vytvorenie materiálového čísla FHM (súpis náradia v elektronickej tabuľkovej forme),
- odoslanie vytvoreného programu na server,
- odoslanie programu na príslušný CNC obrábací stroj.



Obr. 6.23. 3D Model súčiastky



Obr. 6.24. Stratégie obrábania

6.7 Overenie vo výrobe

Štart výroby produktu je podmienený kontrolou vybraných parametrov všetkých operácií, vykonávaných na obrobku. Túto kontrolu uskutočňuje oddelenie kvality príslušného výrobného segmentu. Výsledky kontrol sú archivované po celý čas výroby produktu. V prípade zmeny vo výrobnom procese je nutné kontroly vykonať opakovane.

Z pohľadu technológie sa pri nábehu hodnotí stabilita procesu a trvanlivosť rezného náradia. Tieto výsledky sú následne zaznamenané do produkčného systému SAP. Na základe dosiahnutých trvanlivostí je v budúcnosti objednávané potrebné náradie.

6.8 Optimalizácia procesu obrábania

Úlohy optimalizácie obrábania predstavujú navrhovanie optimálnych technologických postupov. Cieľom optimalizácie je dosiahnutie (Neslušan a Čilliková, 2007):

- požadovanej trvanlivosti nástrojov,
- dostatočnej pevnosti rezného klina,
- minimálnej spotreby energie,
- stabilného priebehu rezania,
- presnosti a kvality povrchu obrobkov,
- vhodného tvarovania triesky,
- minimálnych výrobných nákladov.

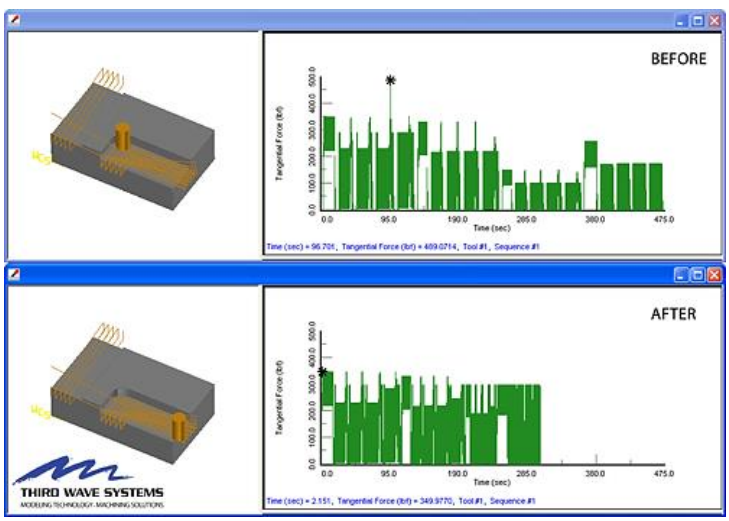
Zabezpečenie týchto požiadaviek je možné prostredníctvom výberu rezného materiálu, geometrických parametrov rezného nástroja, rezného prostredia a rezných parametrov (Neslušan a Čilliková, 2007):

Na výsledný kusový čas nevplývajú len parametre rezania, ale aj vedľajšie strojové časy. Sem patrí napr. prísun polotovaru do stroja, odvod hotových obrobkov z pracovného priestoru, výmena nástrojov a iné. Vedľajšie časy obrábania patria medzi faktory, ktoré zásadne ovplyvňujú výsledné náklady na obrábanie (Vasilko a kol., 2006).

6.8.1 Optimalizácia pomocou softvéru PMTWS

Jednou z možností ako optimalizovať proces sústruženia, je využitie softvéru Production Module od spoločnosti Third Wave Systems (PMTWS). Program pracuje na princípe prepočtu zaťaženia rezného klina v procese obrábania Obr. 6.25.

Program po nahratí NC programu a zadaní parametrov obrábaného materiálu a rezného nástroja, vykreslí krivku zaťaženia s možnosťou stanoviť maximálnu/optimálnu veľkosť zaťaženia. Výsledkom optimalizácie je NC program s modifikovanými posuvmi nástroja tak, aby jeho zaťaženie bolo v stanovenom intervale zaťaženia. Tým sa dosiahne vo väčšine prípadov skrátenie cyklového času a zvýšenie trvanlivosti nástroja.



Obr. 6.25. Optimalizácia v PMTWS (Third Wave Systems, 2020)

6.8.2 Zmena rezného náradia

V oblasti sústruženia na sústruhoch s CNC riadením sa uprednostňuje použitie ISO náradia. Vyplýva to z nižších výrobných dávok, pri výrobe ktorých je použitie zložitých tvarových nástrojov neefektívne a tiež zo schopnosti CNC riadenia generovať takmer akúkoľvek dráhu nástroja. To umožňuje použitie jedného náradia k obrábaniu viacerých plôch, prípadne jeho použitie na obrábanie na hrubo a následné dokončovanie (Obr. 6.26).

Avšak pri vyšších výrobných dávkach je na zváženie využitie tvarového rezného nástroja, s ktorým je možné zlúčiť viacero pohybov ISO nástroja a jednoduchým zápichom, s využitím zlomku času, vytvoriť komplexnú tvarovú plochu (Obr. 6.27).

Obr. 6.26. Katalógový nástroj na sústruženie vnútorných zápichov

Obr. 6.27. Združený tvarový nástroj na sústruženie vnútorných zápichov a plochy obežnej dráhy

Záver

Cieľom predloženej štúdie bolo oboznámiť sa s okolnosťami, ktoré vplývajú na rozhodovanie pri definovaní postupu výroby vonkajšieho krúžku valivého ložiska technológiou obrábania. Vytvorenie výrobného postupu a jeho zavedenie do „života“ nie je konečný proces. Potrebný je neustály monitoring jeho stability a prípadná ďalšia optimalizácia, implementovaním najnovších technologických poznatkov.

Zoznam bibliografických odkazov

CENTERSOFT. (rok neznámy). *CAD/CAM TopSolid obecně.* [online] [cit. 2012-09-30]. Dostupné na internete: http://www.centersoft.cz/produkty/alphacam-obecne.html

CMT. 2020. *Matrix.* [online] [cit. 2020-10-02]. Dostupné na internete: https://www.ctms-imc.com/index.php/en/home/.

EXAPT Systemtechnik GmbH. (rok neznámy). *EXAPTplus Basic System.* [online] [cit. 2012-09-30]. Dostupné na internete: http://www.exapt.de/en/products/NC-Planning/EXAPTplus-Basic-System.htm

JANA, Č. 2014. *Chrómová ocel pro valivá ložiska. Ložiskové kuličky.* [online] cit. [2014-03-21]. Dostupné na internete: http://kulicky.wbs.cz/Ocel-14-109.html.

KURIC, I., KOŠTURIAK, J., JANÁČ, A., PETERKA, J., a MARCINČIN, J. 2002. Počítačom podporované systémy v strojárstve. ŽU Žilina. EDIS Žilina. ISBN 80-7100-948-2).

NESLUŠAN, M. a ČILLIKOVÁ, M. 2007. Teória obrábania. ŽU Žilina. EDIS Žilina. ISBN 978-80-8070-790-3, 167 s.

ŘASA, J. a ŠVERCL, J., 2007. Strojnické tabulky 2 pro školu a praxi. Materiály, polotovary, technologie, upínání, měření. Praha: SCIENTA. ISBN: 978-80-86960-20-3.

Interné materiály Schaeffler. 2020. Medias. [online] cit. [2020-03-21]. Dostupné na internete: https://medias-internal.schaeffler.com/de!hp.ec.br.pr/NK*NK35%2f20-TV-XL

ŠMIDA, E., 2013. Racionalizácia vybraných operácií obrábania v INA Skalica, spol. s r. o. Trnava: MTF.

Third Wave Systems. (rok neznámy). *3D Cad Portal.* [online] cit. [2020-10-02]. Dostupné na internete: https://www.3dcadportal.com/cad-news/2842-third-wave-systems-presentara-el-production-module-7-0-dias-en-el-imts.

TopSolid Demos. (rok neznámy). [online] cit. [2019-09-30]. Dostupné na internete: https://www.topsolid.com/download/videos/topsolid-demo-library/mechanical-design/free-modeling.htm.

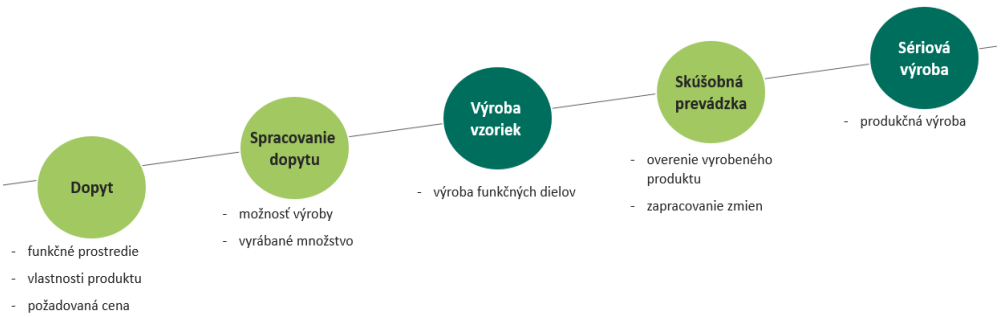
VASILKO, K. a kol. 2006. *Top trendy v obrábaní III. Technológia obrábania.* Žilina: MEDIA/ST. 214 s.

7 NÁVRH VÝROBY DIŠTANČNÉHO KRÚŽKU NA OHÝBACOM – ZVÁRACOM AUTOMATE

ZAHNAŠ, L.

Úvod

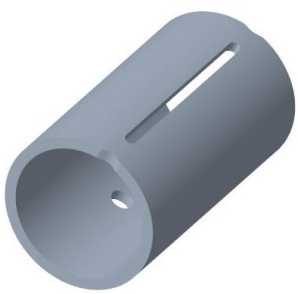
Konkurencieschopnosť a flexibilita sú vlastnosti, ktoré by mala mať úspešná firma počas celej svojej existencie a v každom čase. Dnes je však na tieto vlastnosti kladený zvýšený dôraz vzhľadom na veľké množstvo faktorov, ktoré nútia produkovať spoločnosti rýchlejšie za čo najnižšiu cenu a niekedy až v rekordne krátkom čase, no zároveň zákazník vyžaduje čo najinovatívnejšie riešenie danej problematiky. Vzhľadom na bohatú históriu firmy Schaeffler takéto nie je problém splniť požiadavky, ktoré zákazník požaduje. Tento prístup bol aplikovaný aj pri výrobe dištančného krúžku, ktorej sa venuje predkladaná prípadová štúdia. Ku každému novému produktu, prípadne produktu, pri ktorom dochádza ku zmene technológie jeho výroby sa pristupuje individuálnym, no pevne stanoveným postupom krokov. Každá etapa má presne stanovený svoj časový harmonogram, potrebné vstupné a očakávané výstupné informácie. Celý postup je znázornený na Obr. 7.1



Obr. 7.1. Postup priebehu výroby nového produktu (Interné dokumenty Schaeffler Skalica, 2020)

Každá etapa má zásadný vplyv na začatie/nezačatie nasledujúcej etapy no z technologického hľadiska je významná až „Výroba vzoriek“ kedy sa zisťuje schopnosť uspokojiť potreby zákazníka z technického hľadiska.

Táto príkladová štúdia je zameraná na výrobu dištančného krúžku (Obr. 7.2), ktorý plní funkciu zachovania rozmerovej vzdialenosti dvoch ozubených kolies v prevodovej skrini osobného automobilu. Tým, že diel nepotrebuje prenášať žiadne výrazné sily, spojené so zaťažovaním v prevádzke, v konečnom dôsledku sa dá povedať, že sa jedná o simplexnú súčiastku. Táto jeho charakteristika ho však nezbavuje prejsť si všetkými potrebnými krokmi prípravy výroby ako iné súčiastky komplexnejšieho charakteru.



Obr. 7.2. 3D model dištančného krúžku (Interné dokumenty Schaeffler Skalica, 2020)

7.1 Voľba vhodnej technológie výroby

V tejto kapitole bude priestor venovaný jednotlivých druhom technológií, ktoré by bolo možné využiť pri výrobe tohto druhu produktu s prihliadnutím na disponibilitu technológií firmy Schaeffler, spol. s r. o., Skalica, pričom najdôležitejším faktorom je ekonomický aspekt výroby.

7.1.1 Sústruženie

Sústruženie je jeden zo základných priemyselných procesov, ktorý sa vyvíjal niekoľko desaťročí. Oproti neustálemu zlepšovaniu tuhosti strojov, upínaniu obrobkov a v neposlednom rade aj neustále sa zlepšujúcim rezným nástrojom, sa metodika sústruženia ako taká za posledné desaťročia vôbec nezmenila. Najčastejšou požiadavkou pri optimalizácii technológie obrábania je zvyšovanie produktivity a znižovanie vstupných nákladov na čo najnižšiu úroveň. (Hoferica, 2018)

Pri produkcii dielov technológiou sústruženia, je prvoradou úlohou dosiahnutie čo najnižších nákladov na každý vyrobený diel avšak pri zachovaní požadovanej výrobnej kvality. Medzi hlavné faktory, ktoré majú hlavný vplyv na optimálnu úroveň nákladov patrí výber stroja, rezného nástroja, ale aj voľba samotnej technológie sústruženia čo je v konečnom dôsledku priamo závislé od zložitosti výrobku alebo veľkosti produkčnej série.

7.1.2 Zváranie

Účelom zvárania je vyhotoviť pevný spoj, ktorý má požadované vlastnosti, a to pevnosť a húževnatosť, ako aj odolnosť proti degradačným procesom, ktoré môžu prebiehať počas celej plánovanej životnosti spoja. Zváranie sa považuje za „zvláštny“ technologický postup a príslušné normy kvality vyžadujú, aby sa technologické postupy vykonávali v súlade s legislatívnymi predpismi. Stanovenie postupov zvárania je potrebné na určenie správne definovaných podkladov na plánovanie zváračských prác a kontrolu ich kvality. (Ledzík a Devečka, 2017)

Tento technologický proces možno považovať za vyvážený sled všetkých vstupných premenných, ktorých výsledkom je konečný produkt v požadovanej kvalite a presnosti (Obr. 7.3). Pri produkčnej výrobe je často veľmi ťažko nájsť správny pomer jednotlivých vstupných premenných, lebo nie na všetky môže mať výrobca priamy vplyv. Pri výbere optimálneho materiálu sú k dispozícii rôzne normy a štandardy, na základe ktorých je definovaná jeho vstupná kvalita. Tie však majú určité tolerancie, ktoré sú nevyhnutné najmä potom pri zastúpení jednotlivých chemických prvkov v zložení materiálu. Tu sa otvára priestor pre dodávateľov materiálu, aby si aj oni našli najvhodnejšiu cestu z ekonomického hľadiska. Rôzne zastúpenie chemických prvkov má pri každej technológii významný dopad na samotný priebeh výroby a správanie sa výrobku pri jeho opracovaní. Tento jav neobchádza ani proces zvárania, dokonca je možné povedať, že technológia zvárania patrí z tohto hľadiska k zásadným procesom. Pod vplyvom všetkých týchto faktorov je nutné prispôsobovať výrobu aktuálnemu stavu, možnostiam a schopnostiam, ktoré materiál ponúka, čo môže mať negatívny dopad na ekonomickú stránku výroby. V neposlednom rade je nutné zohľadniť aj požiadavky, ktoré definuje zákazník v dokumentácii produktu. Takto

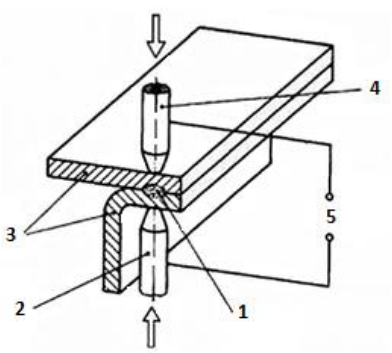
sa teda výrobca dostáva do ťažkej situácie kedy musí pracovať s často sa meniacou kvalitou vstupného materiálu, zvyšujúcimi sa požiadavkami zákazníkov na kvalitu a vlastnosti produktov avšak zároveň vnášať do celého procesu čo najnižšie potrebné množstvo ekonomických stimulov.

Obr. 7.3. Pomer jednotlivých oblastí a ich vplyv na konečný produkt (Interné dokumenty Schaeffler Skalica, 2020)

Dôležité je preto poznať všetky dostupné možnosti, aby sa naplno využil potenciál výrobcu na dosiahnutie požadovaného výsledku. Technológia zvárania a konkrétne odporového zvárania ponúka viacero druhov, z ktorých každý má svoje špecifické vlastnosti a možnosti, ktoré sú opísané v nasledujúcich častiach štúdie.

7.1.2.1 Odporové zváranie

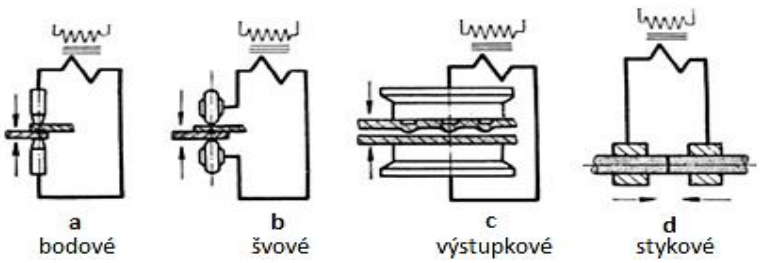
Spoj pri odporovom zváraní vzniká pri prechode elektrického prúdu cez stlačené zvárané časti. Pri vzniku spoja sa využíva jav, že pri prechode elektrického prúdu vodičom vzniká teplo, prostredníctvom ktorého sa dosiahne zvýšenie teploty spájaných materiálov na požadované hodnoty. Prechodom elektrického prúdu zváraným miestom sa materiál zváraných súčastí ohreje odporovým teplom, stane sa tvárnym, alebo sa roztaví, pričom sa spájané materiály následne stlačia, a tým sa metalurgicky spoja (Obr. 7.4). Zdrojom tepla je elektrický prechodový odpor v mieste styku zváraných materiálov. (Kubíček, 2002)



Obr. 7.4. Schéma odporového zvárania (Matnet, 2006)
1 – bodový zvar, 2 – zváracia elektróda, 3 – zváraný dielec, 4 – zváracia elektróda, 5 – zdroj prúdu

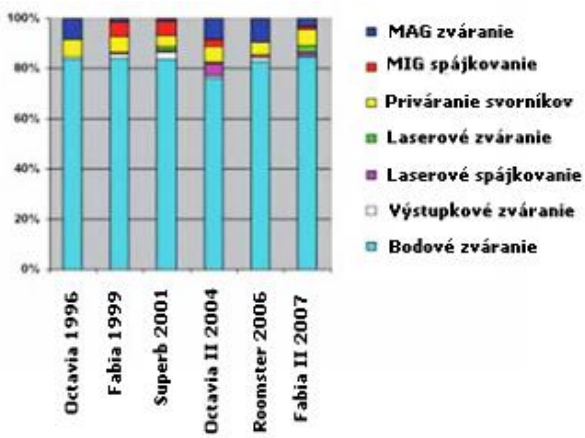
Zvárací proces je charakterizovaný tým, že na dosiahnutie zváracej teploty sa využíva teplo, vyvinuté zváracím prúdom pri spolupôsobení odporov v oblasti zvaru. (Tolnai, 2002) Zváranie elektrickým odporom sa rozdeľuje podľa vzájomnej polohy zváraných súčastí na dve základné skupiny (Koutný, 2008), a to:

1. ***Zváranie s preplátovaním***, ktoré sa rozdeľuje na zváranie bodové (Obr. 7.5a), švové (Obr. 7.5b) a výstupkové (Obr. 7.5c). Zváranie s preplátovaním je ideálne na zváranie tenkých plechov.
2. ***Zváranie stykové*** (na tupo), ktoré sa ďalej rozdeľuje na zváranie stykové stlačením (Obr. 7.5d) a zváranie stykové odtavením, ktoré sa používa napr. na zváranie tyčí na tupo.



Obr. 7.5. Rozdelenie metód odporového zvárania (Kubíček, 2002)

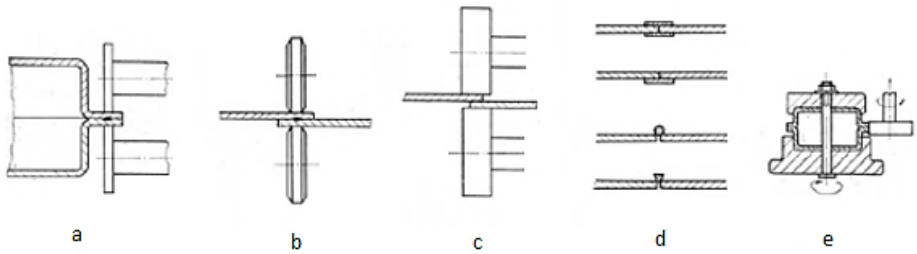
Pri technológii bodového zvárania vzniká medzi preplátovanými spájanými súčasťami spoj v tvare šošovky. Ide o najpoužívanejší spôsob odporového zvárania. Jeho využitie je najmä v spotrebnom priemysle (napr. výroba skríň prístrojov), alebo v automobilovom priemysle (napr. výroba karosérií) (Obr. 7.6).



Obr. 7.6. Relatívny podiel jednotlivých spôsobov zvárania pri výrobe vozidiel Škoda (Janota, 2008)

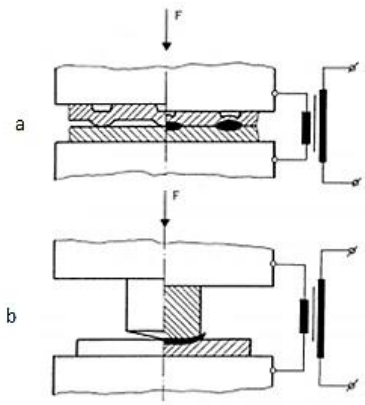
Švové zváranie (Obr. 7.7) je veľmi podobné bodovému zváraniu. Pri švovom zváraní sú tyčové elektródy nahradené otočnými kotúčovými elektródami – kladkami. Kotúčové elektródy sú takisto medené, ako v prípade bodového zvárania. Elektródy sú upevnené na

prítlačné ramená a sú napájané zo zdroja zváracieho prúdu. Otáčaním kotúčov sa, za súčasného prechodu elektrického prúdu, vytvára zvarový spoj (šev). Keďže priebeh prúdu je prerušovaný, zvarový šev má vzhľad radu bodových zvarov, ktoré sa navzájom prekrývajú. (Lipa, 2000; Tolnai, 2002)



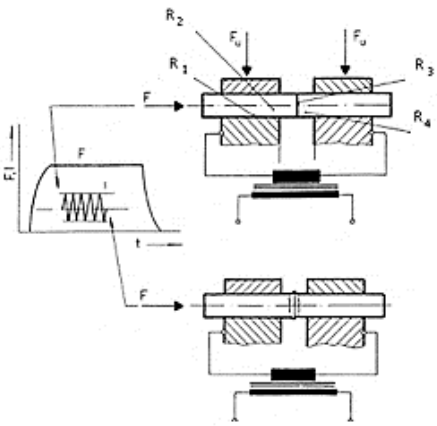
Obr. 7.7. Možnosti švového odporového zvárania (Hlavatý, 2009)
a, b – zvar medzi preplátovanými súčiaskami, c – rozvalcovacie švové zváranie,
d – švové zvárania s prídavnými páskami, e – švové zváranie putujúcim kotúčom

Je to v podstate niekoľkobodové odporové zváranie, pri ktorom je rozloženie bodov určené výstupkami. V najjednoduchšom prípade ide o preplátované spoje, pričom na jednom plechu sú vopred vylisované výstupky. Stlačením súčiastok medzi plochými elektródami (čeľusťami) zváracieho lisu sa prúd koncentruje na miestach výstupkov (Obr. 7.8). Počas ohrevu sa natavia výstupky, ako aj priľahlá oblasť druhého dielca. Malé výstupky možno nahradiť jedným výstupkom väčších rozmerov (Tolnai, 2002)



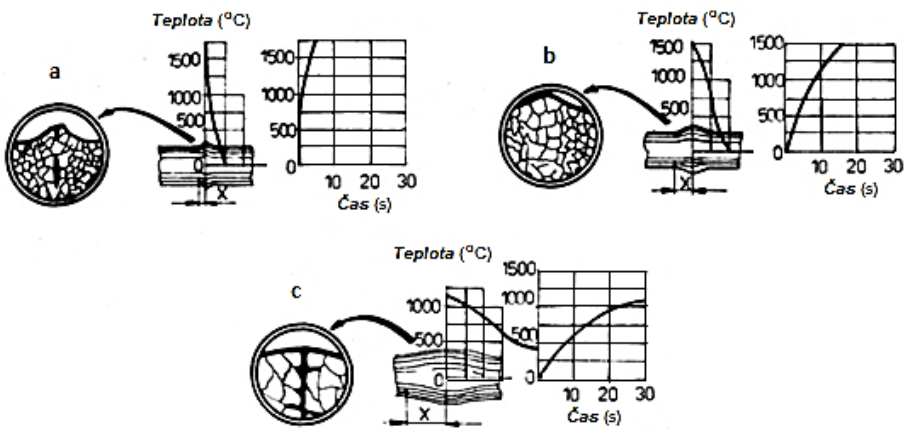
Obr. 7.8. Princíp výstupkového odporového zvárania (Lipa, 2000)
a – s prelisovanými výstupkami, b – s masívnymi výstupkami

Stykové stláčacie odporové zváranie je druh odporového zvárania, pri ktorom sú zvárané súčasti pritlačené styčnými plochami a zvárajú sa v celej styčnej ploche (Obr. 7.9). Zvárané dielce sa uchytia do delených čeľustí – elektród, pričom sú orientované, na rozdiel od predošlých spôsobov odporového zvárania, v horizontálnom smere. Jedna alebo obe čeľuste sú pohyblivé v smere vzájomného stláčania zváraných dielcov. Dielce sú na seba pritlačené zvarovými plochami určitou silou a až potom sa zapne zvárací prúd. Prítlačná sila pôsobí ešte určitý čas po vypnutí prúdu (Adamka a kol., 1985; Tolnai, 2002).



Obr. 7.9. Princíp odtavovacieho stykového zvárania (Lipa, 2000)

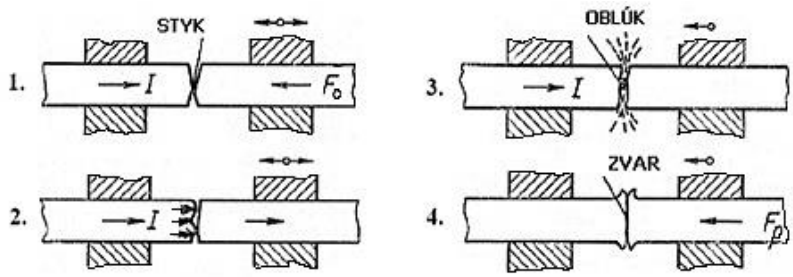
Z hľadiska zváracieho prúdu a zváracieho času existuje pri stykovom stláčacom zváraní tvrdý a mäkký režim zvárania. Veľkosť zváracieho prúdu a času majú vplyv na výslednú štruktúru a vlastnosti zvarového spoja. Ak je zvárací prúd vysoký, teplota v dotyku materiálov dosiahne teplotu tavenia za veľmi krátky čas (tvrdý režim). Potom do plastického stavu budú zohriate iba povrchové vrstvy a pri stlačení dôjde k vzniku necelistvostí (Obr. 7.10a). Výronok bude mať relatívne ostrý tvar. V prípade pomalého ohrevu a ochladzovania (mäkký režim) dosiahne zvarový spoj hrubozrnnú štruktúru, ale bez defektov (Obr. 7.10b). Výronok bude mať oblý tvar. Pri nedostatočnom ohreve dotykových plôch a veľkej prítlačnej sile môžu vzniknúť neprievary (Obr. 7.10c) (Lipa, 2000).



Obr. 7.10. Mechanizmy tvorby zvarového spoja pri stykovom stláčacom zváraní (Adamka a kol., 1985)

Stykové odtavovacie zváranie má podobný princíp ako stykové stláčacie zváranie. Rozdiel je iba v mechanizme vzniku zvarového spoja (Obr. 7.11). Zvárané dielce sú ešte pred zvarením pripojené na zvárací transformátor, ktorý je pod napätím. Použité napätie je nízke (4 *až* 5) V, aby nevznikol elektrický oblúk. Dielce sa k sebe priblížia na dotyk, čím

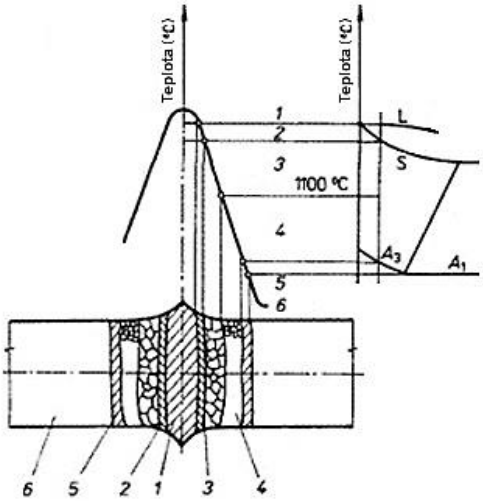
vznikajú prúdové mostíky. Pretože prítlačná sila je minimálna, prechodový odpor medzi dielcami je veľmi veľký, materiál sa v mieste dotyku okamžite nataví a vystrekne. Dielce sa opäť k sebe priblížia, dotknú sa a proces sa opakuje. Takýmto postupom sa natavia celé styčné plochy, na ktorých sa vytvorí jemná vrstva roztaveného kovu a nad ňou sa materiál nahreje do určitej hĺbky a vtedy nasleduje rýchle stlačenie dielcov k sebe, zvýšenie a vypnutie zváracieho prúdu. Pretože počas zvárania odstrekuje spálený kov a s ním aj rôzne nečistoty a pary spáleného kovu, vytvára sa tým ochranná atmosféra, zabraňujúca oxidácii povrchu, čím vzniká dokonalý zvarový spoj. Výronok v mieste zvaru je tvorený čiastočne oxidovaným kovom a je potrebné ho odstrániť (Adamka a kol., 1985; Kuncipál a kol., 1986; Lipa, 2000)



Obr. 7.11. Princíp odtavovacieho stykového zvárania (Hlavatý, 2009)
I – zvárací prúd, F_o – sila, pôsobiaca pri prvotnom odtavovaní, F_p – prítlačná sila

Druhy stykového odtavovacieho odporového zvárania možno podľa priebehu predohrievacej fázy rozdeliť na (Hlavatý, 2009):

- zváranie bez predohrevu (priame odtavovacie zváranie), pri ktorom sa súčasti odtavujú hneď od začiatku procesu bez predbežného predhriatia,
- zváranie s predohrevom, pri ktorom sa súčasti najprv predhrejú a až potom nasleduje plynulá odtavovacia fáza,
- zváranie s prerušovaným predohrevom, pri ktorom sa súčasti predhrievajú opakovanými dotykmi,
- zváranie s neprerušovaným predohrevom, pri ktorom sa súčasti predhrievajú pri neprerušovanom odtavovaní pri programovej zmene napätia.

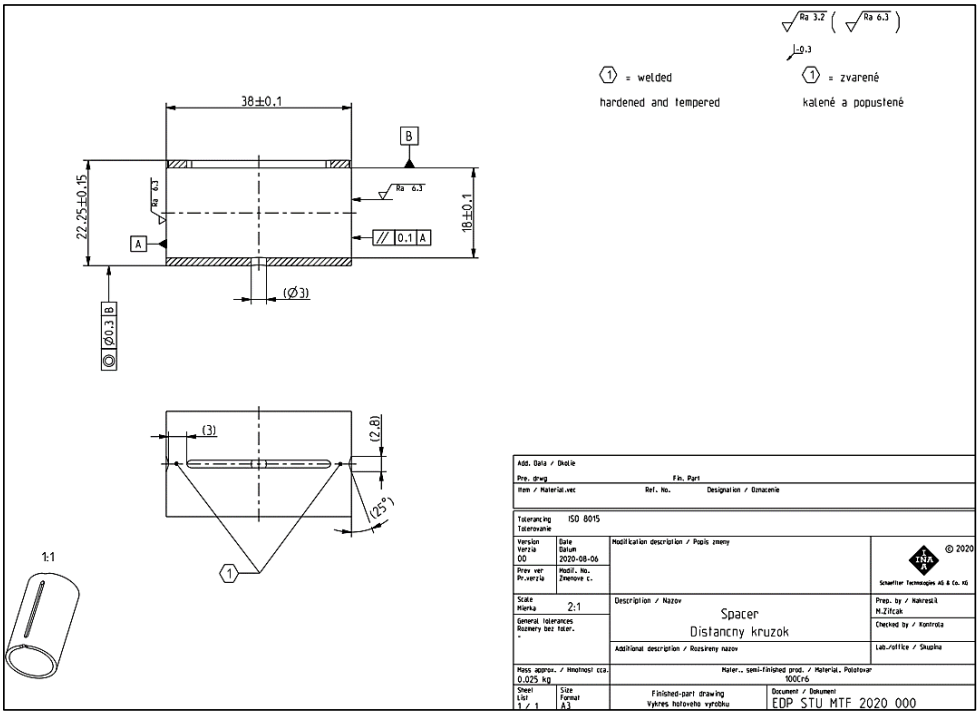


Obr. 7.12. Vplyv teplotného účinku zváracieho procesu na štruktúru zvarového spoja pri odtavovacom stykovom zváraní (Kuncipál a kol., 1986)
1 – natavená oblasť, 2 – oblasť čiastočného natavenia, 3 – oblasť prehriatia, 4 – oblasť normalizácie, 5 – oblasť čiastočnej prekryštalizácie, 6 – tepelne neovplyvnená oblasť

Metalurgia vzniku zvaru pri stykovom odtavovacom zváraní je odlišná od bodového zvárania. Vznik tavného spojenia je charakterizovaný prítomnosťou malého množstva taveniny a tepelne ovplyvnenej oblasti, ktoré sú tvorené účinkom tepelne-deformačných cyklov v jednotlivých fázach procesu zvárania (Obr. 7.12). Vzniká natavená oblasť s dendritickou lejacou štruktúrou v mieste bezprostredného styku oboch zváraných materiálov. Šírka pásma natavenia je závislá od použitých teplotných parametrov a režimu stláčania. (Kuncipál a kol., 1986)

7.2 Postup výroby súčiastky a voľba vhodných nástrojov

Pri výrobe je veľmi dôležité správne definovať jednotlivé výrobné etapy. Prvým a najdôležitejším ukazovateľom je výrobný výkres s definovanými informáciami, ktoré predstavujú jeho konečné vlastnosti. Dôležité je tiež správne prečítanie výkresu, nakoľko je základom na jednoznačné definovanie výrobného postupu. Každá výrobná etapa a (niekedy aj technológia) má svoj vlastný výrobný výkres. Je nutné mať viacero výkresov pretože by sa mohlo stať, že by výkres nebol správne pochopený a mohlo by prísť k chybe. V prípade, ktorý je predmetom tejto štúdie, ide o výkres priamo určený na technológiu zvárania (Obr. 7.13). Je to simplexný produkt, čo možno vidieť aj na pravej hornej strane výkresu, kde je definované len miesto zvárania. Často sa však stáva, že je určený aj smer, druh alebo sila zaťaženia dielu, mechanické vlastnosti, či iné špecifické požiadavky interného prípadne externého charakteru.

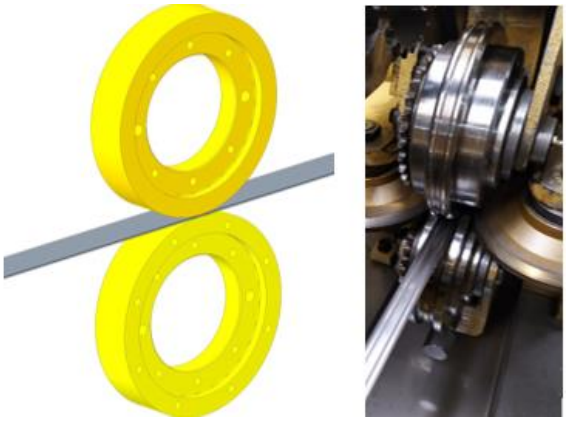


Obr. 7.13. Výkresová dokumentácia k vyrábanému dielu
(Interné dokumenty Schaeffler Skalica, 2020)

Aj keď ide o pomerne jednoduchý produkt, nie je možné ho vyrobiť v jednej operácii a tak sa bude používať produkčná linka, kde je použitých viacero zástupcov technológie tvárnenia a keď konečnou operáciou bude zvarenie dielu.

7.2.1 Profilovacie nástroje

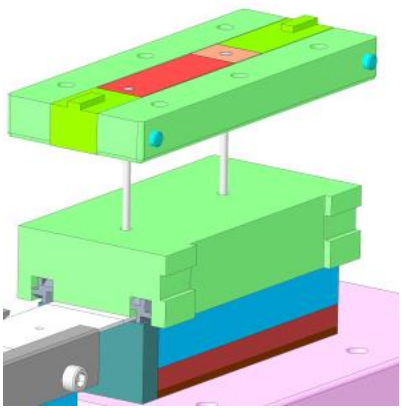
Profilovacie kotúče predstavujú prvú stanicu z celej produkčnej linky a ich úlohou je vytvarovať nekonečný plochý pás do požadovaného tvaru a to použitím technológie tvárnenia za studena. Ide o dva (štyri) proti sebe odvaľujúce sa kotúče, ktoré na materiál pôsobia definovanou silou (Obr. 7.14). Takéto pretvorenie je dané ako v axiálnom, tak aj v radiálnom smere čo je určené hrúbkou vstupného materiálu a požadovaným stupňom pretvorenia. V určitých prípadoch je nutné aplikovať pretvorenie na dva priechody, teda sa aplikuje 8 profilovacích kotúčov, štyri v každom smere pretvorenia. V prípade tvárnenia dištančného krúžku sú použité len 4 profilovacie kotúče, ktoré tvárnia materiálový pás do požadovanej hrúbky a šírky.



Obr. 7.14. Schéma a fotografia profilovacích nástrojov
(Interné dokumenty Schaeffler Skalica, 2020)

7.2.2 Strižné nástroje

Technológia strihania je zastúpená v nasledujúcej stanici po profilovaní. Ide o relatívne jednoduchý strih keď je presná poloha strižného nástroja daná vedením strižníka a jeho dráha končí v strižnej matrici, cez ktorú sa odvádza odpad v tohto priestoru. Na tejto stanici dochádza k vystrihnutiu polohovacieho otvoru (Obr. 7.15), ktorý má významnú úlohu pri poslednej pracovnej stanici celej produkčnej linky.

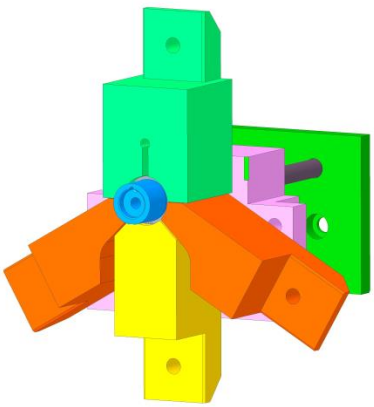


Obr. 7.15. Schéma strižného nástroja na výrobu polohovacieho otvoru
(Interné dokumenty Schaeffler Skalica, 2020)

7.2.3 Ohýbacie nástroje

Na voľbu vhodných ohýbacích nástrojov sa pri výrobe daného typu súčiastky kladie veľký dôraz. Proces ohýbania pozostáva z viacerých na seba nadväzujúcich operácií, ako je vidieť

na Obr. 7.16 sú použité 4 ohýbacie nástroje, ktoré sú implementované v troch krokoch: vrchný ohyb – bočné ohyby – spodný ohyb.

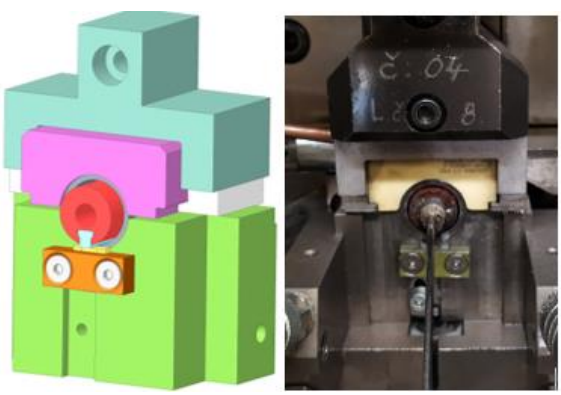


Obr. 7.16. Schéma ohýbacieho nástroja (Interné dokumenty Schaeffler Skalica, 2020)

Každý krok má presne definovaný tvar vyrábaného dielu a časovú postupnosť. Ohýbací nástroj musí zvládnuť výrobu ďaleko náročnejších tvarov, ktoré sú spojené s výrobou ložiskových klietok, kedy nastávajú problémy pri deformácii nosných častí valivých teliesok. Ohnutie do požadovaného tvaru pri tejto súčiastke neprináša relatívne žiadne komplikácie, nakoľko sa tvárni polotovar s dostatočným objemom materiálu. Po ukončení operácie je diel do poslednej stanice presunutý pomocou transportných kolíkov lineárnym pohybom.

7.2.4 Zváracie náradie

Príprava polotovaru má rovnako dôležitý význam ako zvolená postupnosť operácií jeho ďalšieho spracovania, čo je zvlášť dôležité pri technológii zvárania.



Obr. 7.17. Schéma náradia v procese zvárania (Interné dokumenty Schaeffler Skalica, 2020)

Pri výrobe dielov zváraním možno všetky použité operácie považovať za prípravné. V prípade, že bude niektorá z týchto operácií realizovaná nekvalitne, s najväčšou pravdepodobnosťou bude vyprodukovaný nezhodný výrobok. V takomto prípade konvenčné bodové zváranie je nutné nahradiť inými technológiami. Zvárané diely musia byť presne ustavené (Obr. 7.17), na čo sa využívajú zváracie elektródy, ale aj prítlačný prvok z keramiky. Keramický pridržiavač najprv pritlačí diel na keramický zvárací tŕň a potom spodnú polovicu pritlačia elektródy (realizujú kontakt zváracích plôch) a diel zvaria. Kvalitný finálny zvarový spoj významne determinujú parametre zvárania.

7.2.4.1 Voľba zváracích parametrov

Firma Schaeffler sa zameriava pri aplikovaní technológie zvárania na 3 hlavné kritériá, a to na:

- uhlíkový ekvivalent,
- kvalitu prípravy geometrických plôch,
- zvárací prierez.

Uhlíkový ekvivalent

Jeden z aspektov posúdenia komplexnej charakteristiky ocele pre danú súčasť je určenie tzv. ekvivalentného obsahu uhlíka C_{ekv} keď možno informačne stanoviť zvariteľnosť nelegovaných, nízkolegovaných a stredne legovaných tvárnených a odlievaných ocelí. Tento parameter sa vypočíta podľa vzťahu (7.1), bol navrhnutý medzinárodným zváračským inštitútom (IIW/IIS) a používa sa na odsúhlasenie prvotných informácií o zvariteľnosti materiálu (Svarinfo, 2019).

$$C_{ekv} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \tag{7.1}$$

Keď hodnota uhlíkového ekvivalentu neprekročí hodnotu 0,45 % pre hrúbku materiálu 4 (0,4 % pre hrúbku materiálu 6,5 mm; 0,35 % pre hrúbku materiálu 25 mm a 0,3 % pre hrúbku materiálu 50 mm) možno daný materiál zvárať bez použitia predohrevu. V prípade vyrábaného dielu, keď ide o materiál C15M, je hodnota uhlíkového ekvivalentu 0,29 %. Hrúbka dielu je 2,125 mm, čo zaraďuje tento materiál medzi dobre zvariteľné.

Kvalita prípravy geometrických plôch

Príprava geometrických plôch patrí medzi zásadné parametre, pretože pri ich nesprávnej a nevhodne realizovanej často prichádza k poškodeniu zváracích elektród ich opálením, čo potom spôsobuje zlý kontakt medzi elektródami a zváraným produktom. Najväčší vplyv má na to operácia ohýbania, lebo ide o poslednú operáciu pred samotným zváraním. Dobre predpripravený diel má minimálnu, resp. nulovú zváraciu medzeru medzi oboma koncami produktu. Vtedy je odpor, ktorý kladie materiál najnižší a nedochádza tak k neprimeranému opotrebeniu zváracích elektród, a teda dochádza k eliminácii nákladov spojených s ich údržbou.

Zvárací prierez

Zvárací prierez predstavuje plochu, ktorá musí byť prevarená, aby došlo v dostatočnému zmiešaniu materiálu vo zvarovom kúpeli. Čím väčšia je však plocha zváraného materiálu, tým väčší odpor musí byť prekonaný, aby došlo k procesu natavovania styčných plôch. V predkladanom prípade štúdie muselo dôjsť k eliminácii, teda zmenšeniu zváranej plochy a to z dôvodu maximálneho využitia výkonu zváracieho transformátora.

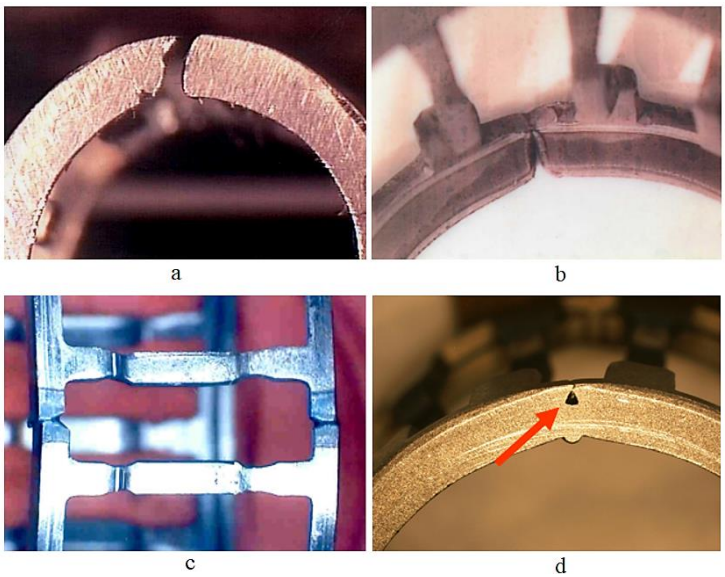
7.3 Kvalita zvaru

Kvalita vyrábaného dielu je to, čo ich predáva, a tým robí firmu konkurencie schopnou. Pri každej technológii existuje všeobecný návod s premenlivými veličinami, ktorý je nápomocný pri produkcii dielu v čo najlepšej kvalite. Pri zváraní dištančného krúžku sa vychádza z variácie niekoľkých parametrov, kde sa však môžu vyskytnúť aj rôzne chyby. Možné príčiny výskytu zvarových chýb sú uvedené v Tab. 7.1.

Tabuľka 7.1. Možné príčiny výskytu zvarových chýb (Interné dokumenty Schaeffler Skalica, 2020)

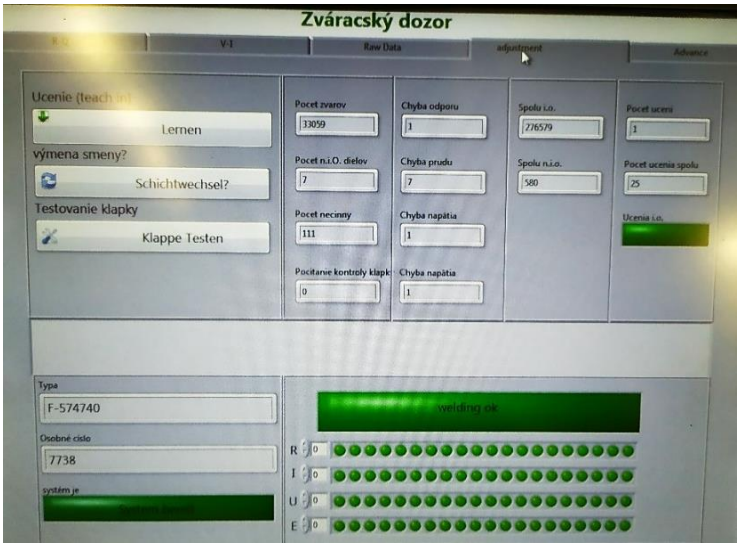
Zvarová chyba	***Parameter***			***Nástroj***				***Výrobok***	
	zvárací prúd	***čas zvárania***	***sila elektród***	***chladenie***	***vydutosť***	***ø***	***povrch***	***kontaktný odpor***	***povrch***
Opotrebenie nástroja	nízky	príliš dlhý	nízka	nevhodné	príliš malá	príliš malý	hrubý	-	pórovitý
Povrchová chyba	nízky	príliš dlhý	vysoká	nedostatočné	-	-	hrubý	-	pórovitý
Vtlačky v nástroji	nízky	-	vysoká	-	príliš malá	príliš malý	-	-	-
Trhliny	nízky	nesúmerný	vysoká	-	-	príliš malý	hrubý	nerovnomerný	pórovitý
Problémy s pevnosťou zvaru	-	nízky alebo vysoký	nízky alebo vysoký	-	malá	malý	nevhodná drsnosť	nerovnomerný (ohýbanie)	nevhodná drsnosť

Každý zo spomenutých faktorov má pomerne zásadný význam na kvalitu produkovaného dielu. Ide však o pomerne všeobecný návod, keď zásahom do jedného druhu nastavenia možno odstrániť konkrétnu príčinu vzniku chyby, čím ale sa môže narušiť relatívne citlivá rovnováha ostatných parametrov, čo v konečnom dôsledku má za následok vznik inej chyby. Z toho vyplýva, že sa môže zdať tento návod ako zbytočný, no správne vyškolenému pracovníkovi vie pomôcť odhaliť koreňovú príčinu vzniku chyby pri výrobe dielu zváraním. Na určenie nezhodného dielu slúži aj interný katalóg chybných dielov, ktorý uľahčuje a zjednodušuje zachytenie takéhoto dielu a odbúrava tak subjektívny pohľad pracovníka na danú problematiku. Príklad vybraných nezhodných dielov uvádza Obr. 7.18. Na Obr. 7.18a je prasknutý zvar, ktorý je spôsobený nevyhovujúcim pomerom zváracieho prúdu a času zvárania, Obr. 7.18b znázorňuje čiastočný zvar, ktorý vzniká pri nevhodnom nastavení zváracieho náradia, na Obr. 7.18c je presadený zvar, ktorý je pôsobený nevhodnou polohou zváracieho náradia a na Obr. 7.18d je vystreknutý zvar, ktorý vzniká pri zlom nastavení prítlaku zváracieho náradia.



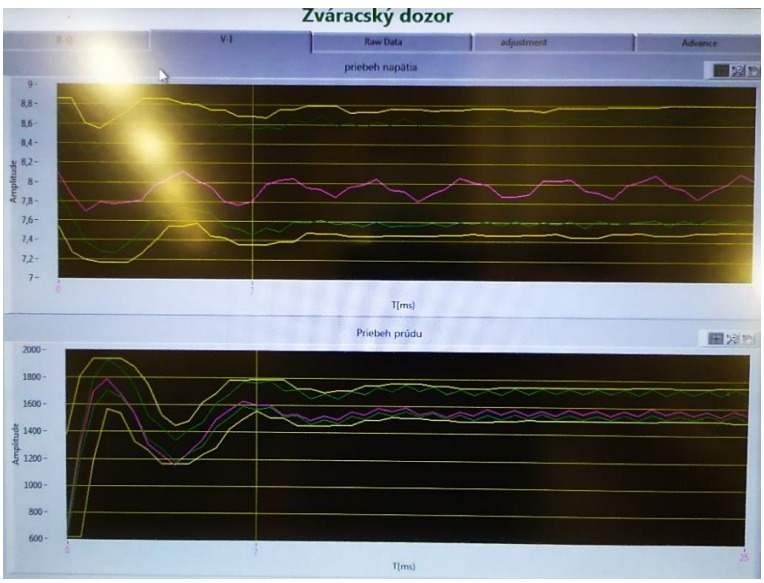
Obr. 7.18. Chyby pri zváraní (Interné dokumenty Schaeffler Skalica, 2020)
a – prasknutý zvar, b – čiastočný zvar, c – presadený zvar, d – vystreknutý zvar

Simultánna kontrola počas produkcie je potrebná, nakoľko reklamácia od zákazníka je nežiadúca, a tej sa snaží vyhnúť každý výrobca. Avšak reklamácia je konečný efekt istého typu nestability vo výrobnom procese, ktorý je z ekonomického hľadiska pre firmu nežiadúci. Aby nedochádzalo k takýmto situáciám, vo firme Schaeffler bolo pri výrobe dištančného krúžku vyvinuté zariadenie, ktoré umožňuje vytriediť už vyrobený diel, no v prípade nezhody s predpísanými parametrami ho neposúva do nasledujúcej operácie, čím sa znižuje zaťaženie výrobných strojov v prípade opracovávania nekvalitných dielov. Medzi takéto zariadenia vo firme patrí aj kontrola zváracích parametrov aplikáciou NOAXu (Obr. 7.19). Úlohou tohto zariadenia je detekovať anomálie a odchýlky samotného procesu zvárania porovnávaním niekoľkých premenných voči ideálnemu stavu. PC zbiera a vyhodnocuje všetky namerané hodnoty a potom posúva tieto informácie riadiacemu stroju, ktorý vzápätí vyhodnotí výsledok merania a diel posunie do ďalšej produkcie alebo vytriedi do nezhodných výrobkov.

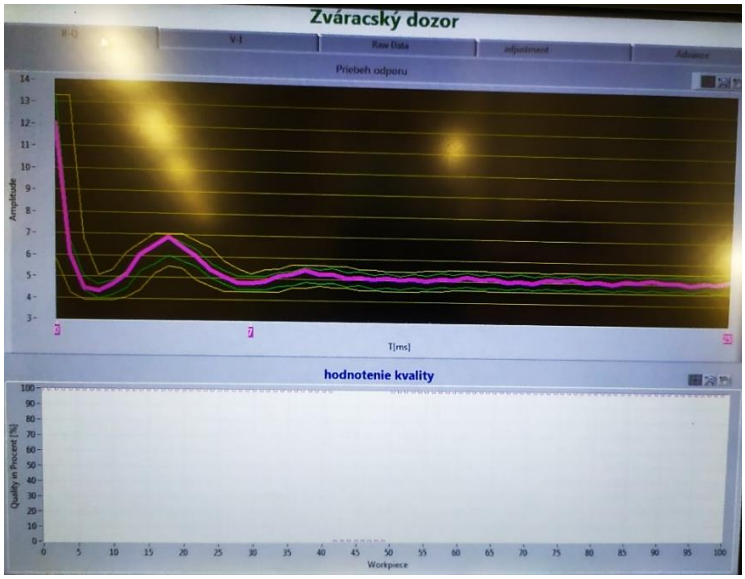


Obr. 7.19. Zváračský dozor (Interné dokumenty Schaeffler Skalica, 2020)

Na Obr. 7.20 sú zobrazené priebehy prúdu a napätia, ktoré boli namerané pri procese zvárania na jednom vyrábanom diele.

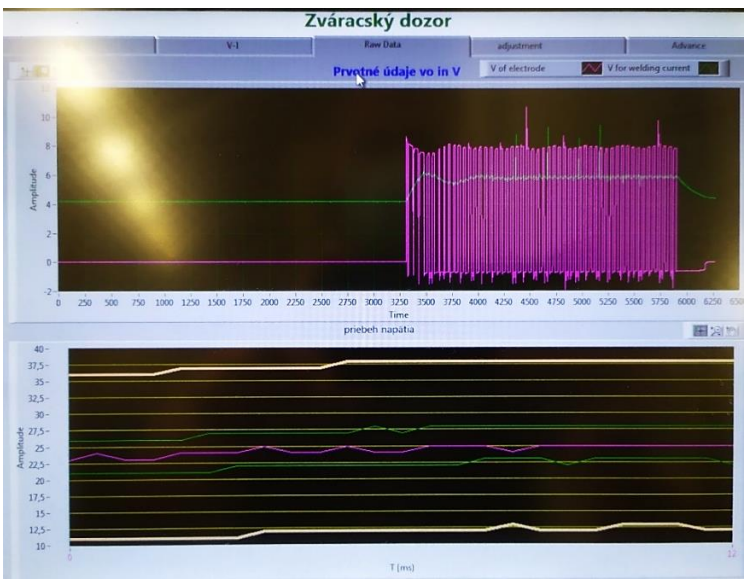


Obr. 7.20. Priebeh zvárania – napätie a prúd (Interné dokumenty Schaeffler Skalica, 2020)



Obr. 7.21. Priebeh zvárania – odpor (Interné dokumenty Schaeffler Skalica, 2020)

Na Obr. 7.21 a Obr. 7.22 sú uvedené priebehy odporu a regelhubu, ktoré boli namerané pri procese zvárania na jednej vyrábanej súčiastke. Pod pojmom regelhub sa rozumie hodnota, o ktorú musí zvarací invertor pridať alebo ubrať vstupný prúd aby bol dosiahnutý rovnaký zvárací prúd na výstupnom miete ako pri poslednom zváraní.



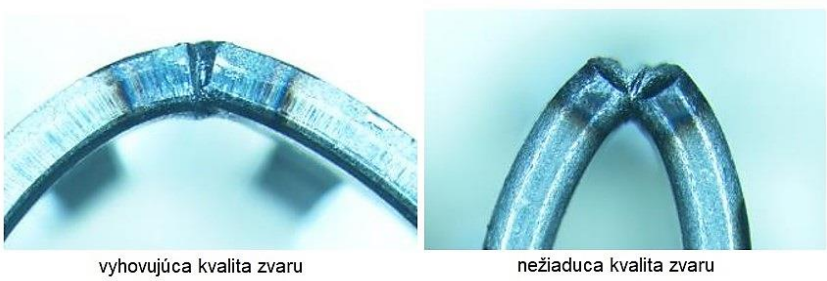
Obr. 7.22. Priebeh zvárania – regelhub (Interné dokumenty Schaeffler Skalica, 2020)

7.3.1 Skúška lomu

Kvalita finálneho dielu je hodnotená viacerými metódami. Prvou z vykonávaných skúšok je skúška lomu. Ide o jednoduchý, no najmä rýchly druh skúšania kvality dielu, keď je výsledok známy v priebehu pár sekúnd od vykonania skúšky. Na jej vykonanie nie sú potrebné žiadne technicky ani finančne náročné zariadenia a možno ju vykonávať priamo vo výrobných priestoroch bez prerušovania pracovného cyklus stroja. Ide o deformačný typ skúšania keď sa diel zaťažuje ako v radiálnom, tak axiálnom smere pomocou zariadenia, ktoré je uvedené na Obr. 7.23.

Obr. 7.23. Zariadenie používané na skúšku lomu (Interné dokumenty Schaeffler Skalica, 2020)

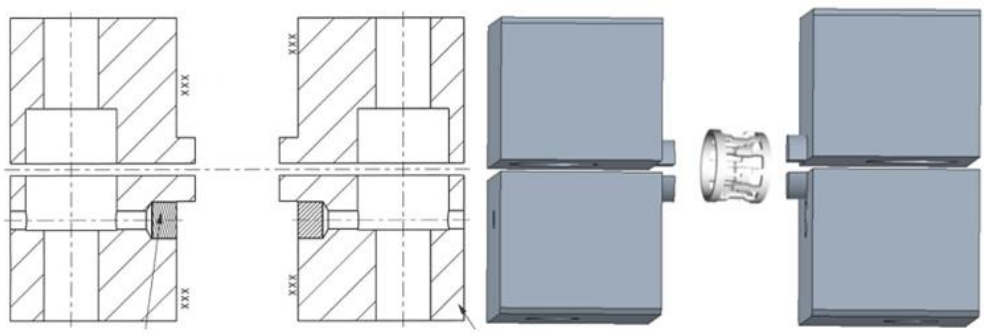
V obidvoch prípadoch teda aj radiálnom aj axiálnom smere musí zvar spĺňať všetky interné požiadavky podľa platných noriem pre danú technológiu. Výsledok pracovník posúdi okamžite a buď v produkcii pokračuje prípadne vykoná nevyhnutné úpravy. Výsledok vyhovujúceho a nežiaduceho zvaru je znázornený na Obr. 7.24.



Obr. 7.24. Výsledok skúšky lomu (Interné dokumenty Schaeffler Skalica, 2020)

7.3.2 Skúška pevnosti zvaru

Ďalšou a veľmi podstatnou skúškou používanou vo výrobnom procese, i keď nepriamo, je skúška ťahom na zistenie pevnosti zvaru. Na výrobnom výkrese býva vo väčšine prípadov definovaná minimálna sila, ktorú musí diel pri tejto skúške vydržať. Táto sila predstavuje zaťaženie, ktoré na diel bude vyvíjané počas plného zaťaženia. V niektorých prípadoch si zákazník nárokuje, aby v prípade deštrukcie materiálu prišlo k jeho porušeniu v mieste základného materiálu a nie v mieste zvaru. Na vykonávanie tejto skúšky sa používa prípravok zobrazený na Obr. 7.25.



Obr. 7.25. Schéma a 3D model prípravku na hodnotenie pevnosti zvaru (Interné dokumenty Schaeffler Skalica, 2020)

Skúška prebieha tak, že diel sa umiestni tak, aby sa miesto zvaru nachádzalo v medzere, ktorú vytvárajú dve samostatné polovice prípravku na každej strane. Styčná plocha, o ktorú sa opiera stena dielu musí priamo kopírovať jeho tvar, aby bol výsledok skúšky čo najpresnejší, a teda každý tvarový typ výrobku má vlastné nástroje na skúšanie jeho pevnosti. Výsledkom takejto skúšky je vždy protokol (Obr. 7.26), na ktorom je zobrazený aj celý priebeh daného skúšania (množstvo skúšaných dielov, sila zaťaženia, veľkosť predĺženia či charakter deformácie).

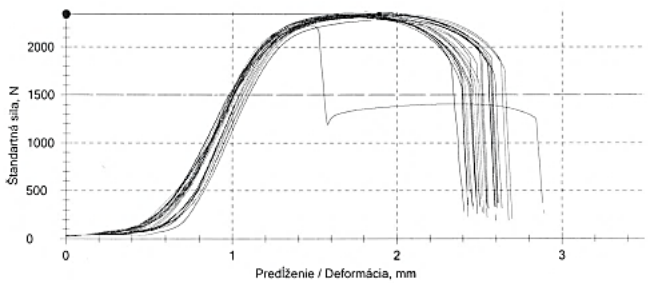
Typorozmer : F-559227 Tolerancia : F min 1500 N
Číslo zakázky : 0000000 Skúšal : MARUSKA P. 1197

Predzaťaženie : 20 N
Rýchlosť skúšky : 30 mm/min

Výsledky skúšok:

Č.	F_{max} N	dL při F_{max} mm	Č.	F_{max} N	dL při F_{max} mm	Č.	F_{max} N	dL při F_{max} mm
max	---		max	---		max	---	
min	1500		min	1500		min	1500	
1	2371	1,8	10	2309	1,8	19	2341	1,8
2	2323	1,7	11	2346	1,8	20	2356	1,9
3	2309	1,8	12	2338	1,8	21	2328	1,8
4	2321	1,8	N.G.13	2224	1,5	22	2351	1,8
5	2316	1,8	14	2344	1,9	23	2323	1,8
6	2324	1,8	15	2330	1,9	24	2291	1,9
7	2339	1,8	16	2347	1,8	25	2347	1,9
8	2332	1,7	17	2352	1,9			
9	2329	1,9	18	2341	1,8			

Grafické záznamy série:



Obr. 7.26. Protokol zo skúšky pevnosti zvaru (Interné dokumenty Schaeffler Skalica, 2020)

7.3.3 Skúška dynamického namáhania

Pri všetkých nových produktoch, alebo aj produktoch, kedy dochádza k zásadnej zmene technológie výroby ako je i v prípade predkladaného dielu, je nutné simulovať zaťaženie, ktoré bude na diel vyvíjané počas bežnej prevádzky. Na odsledovanie je vhodné použiť skúšku dynamického namáhania, keď sa na viacerých dieloch skúša dynamické cyklové zaťaženie a diel musí touto skúškou prejsť bez porušenia súdržnosti materiálu.

7.4 Ekonomické zhodnotenie výroby

Zmena technológie, pre ktorú by sa mala firma rozhodnúť je pomerne zdĺhavý proces technologických skúšok a ich odsúhlasovania. Keďže z každej strany sa kladie dôraz na ekonomickú stránku výroby firma je nútená, po tlaku zákazníka, realizovať nevyhnutné kroky na zníženie výrobnej ceny produktu. Ak po dôkladnej analýze použitej technológie nie je možné vykonať výraznú elimináciu nákladov, je nutné vybrať sa cestou zmeny technológie. V predloženej štúdii bola nutná táto zmena a výrobné náklady sa pri tomto návrhu sa upravili takto (Tab. 7.2).

Tabuľka 7.2. Porovnanie nákladov na výrobu dielu technológiami tvárnenie-zváranie a sústruženie (Interné dokumenty Schaeffler Skalica, 2020)

Tvárnenie – Zváranie		***Sústruženie***	
Ročné výrobné potreby (ks)	25 000	***Ročné výrobné potreby*** (ks)	25 000
Výrobná dávka (ks)	12 500	***Výrobná dávka*** (ks)	12 500
Materiál (€)	10,94	***Materiál*** (€)	21,13
Prípravná časť (€)	8,29	***Prípravná časť*** (€)	10,14
Tvárnenie (€)	27,29	***Obrábanie*** (€)	38,68
Cena v € pri 100 kusoch	**46,52**	***Cena v € pri 100 kusoch***	**69,95**

Na základe údajov, uvedených v Tab. 7.2 vyplýva, že sa podarilo znížiť výrobné náklady a to aj napriek tomu, že z pohľadu technológie bolo nutné pristúpiť k úprave samotného dielu a to pridaním strediaceho otvoru, či vytvorením odľahčenia, ktoré bolo nutné z hľadiska aplikácie zvárania komponentu.

Záver

Táto prípadová štúdia bola zameraná na zmenu technológie výroby dielu s ekonomickým aspektom. Okrem toho však demonštruje aj všetky kroky výrobných operácií na dostupných a používaných strojoch firmy Schaeffler, spol. s r. o., Skalica. Taktiež sú v predloženej štúdii opísané všetky možnosti technológie odporového zvárania, ale aj výrobné chyby, ktoré môžu vznikať na danom diele a možnosti jeho skúšania deformačnými metódami.

Zoznam bibliografických odkazov

ADAMKA, J., GRUTKA, E. a VESELKO, J. 1985. Teória zvárania. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1985, 218 s.

HLAVATÝ, I. 2009. Švové odporové svařování – 22 [online] [cit 2020-08-09] Dostupné na internete: http://fs1.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/11-22.pdf.

HOFERICA P. 2018. APLIKACE SYSTÉMU COROTURN PRIME [online]. [cit 2020-18-09]. Dostupné na internete:

https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=174079.

Interné dokumenty Schaeffler Skalica, 2020. Výkresová dokumentácia a grafické vyobrazenie. Skalica.

JANOTA, M. 2008. Odporové svařování. Základní technologické informace. In Svět svaru, roč. XII., č. 2, 2008, s. 12 – 13. ISSN 1214-4983.

KOUTNÝ, J. 2008. Bodovky a bodování. [online] [cit 2020-08-09] Dostupné na internete:http://svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008033102 .

KUBÍČEK, J. 2002 . Technologie svařování [online] [cit 2020-08-09]. Dostupné na internete: https://www.scribd.com/doc/39711167/Technologie-svarovani-Kubicek.

KUNCIPÁL, J. a kol., 1986. Teorie svařování. 1. vyd. Praha : SNTL, 1986, 272 s.

LEŽDÍK , J. a DEVEČKA, V. 2017. Kvalita zvarových spojov a spôsob overovania postupov zvárania v plynárenskej praxi [online]. [cit 2020-18-09]. Dostupné na internete: http://spnz.sk/stara_stranka/Casopis/04_01/04_01_02.htm.

LIPA, M. 2000. Odporové zváranie. In Zváracie metódy a zariadenia. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2000, 610 s. ISBN 80-85771-84-5.

MATNET. 2006. Odporové zváranie [online] [cit. 2020-07-21]. Dostupné na internete: http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=382.

SVARINFO. 2015. Výpočet uhlíkového ekvivalentu [online] [cit. 2020-07-21]. Dostupné na internete: https://www.svarbazar.cz/phprs/showpage.php?name=cekv.

TOLNAI, R. 2002. Strojárska technológia. I. časť. 3 vyd. Nitra : SPU, 2002. 319 s. ISBN 80-8069-035-9.

8 PREPOJENIE KONŠTRUKCIE A METROLÓGIE V PRAXI (MERANIE NA SÚRADNICOVÝCH MERACÍCH STROJOCH)

KRITIKOS, M.

Úvod

Významným prostriedkom komunikácie technických odborníkov na celom svete je technické kreslenie. Jeho znalosť je nevyhnutná na čítanie a tvorbu technickej dokumentácie. Technické kreslenie je nástrojom používaným pri vývoji výrobkov, pri ich výrobe, distribúcii, využívaní, údržbe, opravách i likvidácii. Využíva sa pri opise technických procesov a výrobných technológií, v návodoch na používanie a údržbu, v najrôznejších dokumentoch technického charakteru.

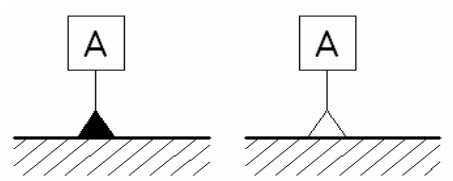
V posledných rokoch sa technické kreslenie stalo globálnym problémom, pretože výmena technických informácií na celom svete sa neustále zintenzívňuje. Pravidlá technického kreslenia definované v normách ISO vytvárajú na to univerzálny, na celom svete zrozumiteľný dorozumievací prostriedok (Čillík, 2012).

Súčasné požiadavky na kvalitu a presnosť vyrábaných súčiastok si preto vyžadujú významný dôraz na prepojenie konštrukcie a metrológie a zjednotenie vnímania výkresovej dokumentácie z pohľadu konštruktéra, ktorý ju navrhuje a z pohľadu metrológa, ktorý konkrétnu súčiastku meria a vyhodnocuje jej kvalitu na základe výkresovej dokumentácie. Častým problémom vyskytujúcim sa vo viacerých strojárskych firmách je, že dvaja metrológovia môžu zmerať tú istú súčiastku pomocou toho istého zariadenia s rôznym výsledkom jej presnosti. Tieto rozdiely môžu vzniknúť na základe nejednoznačného kótovania, a teda na základe rôznej interpretácie merania určitého prvku. Pokiaľ konštruktér nezakótuje súčiastku jednoznačne, vytvára sa priestor na chyby a variabilitu rôznych metód na meranie a vyhodnocovanie. Nie všetci metrológovia, operátori, programátori majú rovnakú vedomostnú základňu a praktickú skúsenosť a môže sa stať, že rovnaká súčiastka bude v jednom prípade vyhodnotená ako nezhodný výrobok a v inom prípade zhodný výrobok. Napríklad pri meraní kruhovitosti otvoru bez udania výšky rezu vzhľadom na plochu nastáva možnosť získania rôznych výsledkov. Ďalším problémom môže byť nezadefinovanie metódy vyhodnotenia, filtrácie alebo rozdielne vnímanie základní, kedy konštruktér ich vníma z hľadiska ich funkčnosti najčastejšie ako dosadacie plochy, pričom metrológ ich potrebuje mať voľné na nasnímanie ich čo najväčšej plochy.

Z týchto poznatkov z praxe sa vynárajú rôzne požiadavky na doplnenie obsahovej náplne odborných predmetov univerzitného vzdelávania v študijnom odbore Strojárstvo, ako aj rôznych doplnkových kurzov a školení odborníkov z praxe, so zameraním na problematiku konštrukcie z pohľadu metrológie (Design for Metrology).

8.1 Základne pre geometrické tolerancie

Základňa je teoreticky presný geometrický prvok (napr. os, rovina, priamka) a na ňu sa vzťahuje tolerovaný prvok. Základne môžu byť tvorené jedným alebo viacerými základnými prvkami na súčiastke. Základný prvok je skutočným prvkom na súčiastke (napr. hrana, plocha, diera), ktorý je použitý na určenie základne. Základný prvok nemá obvykle vyrobený presný geometrický tvar. Ak je to účelné, môžu sa mu predpísať tolerancie. Náhradný základný prvok je skutočný povrch zodpovedajúceho správneho tvaru (napr. doska, ložisko, hriadeľ), ktorý sa dotýka základného prvku a je použitý na definovanie základne.

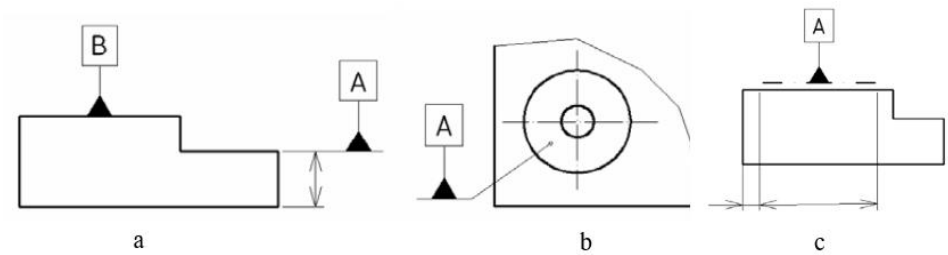


Obr. 8.1. Označenie základného prvku základne (Lacko et al., 2010)

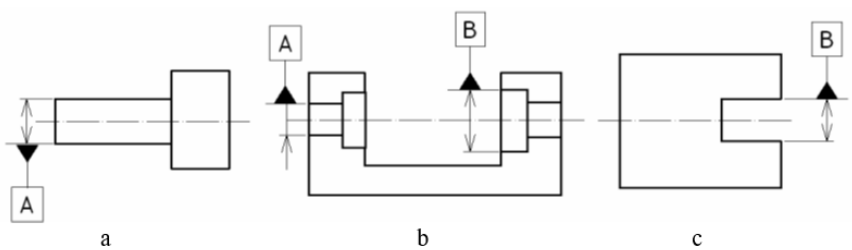
Prvky označené ako základne majú zákonite určité výrobné nepresnosti. Môžu byť vyrobené vypuklé, vyduté alebo kužeľovité. Základňa sa na výkrese označuje veľkým písmenom abecedy v rámčeku, spojenom odkazovou čiarou ukončenou trojuholníkom na príslušnom prvku súčiastky (Obr. 8.1). ***Základňou môže byť priamka, os alebo rovina.***

Trojuholník s písmenovým označením základne sa musí umiestniť:

- na obrysovú čiaru prvku alebo na jej predĺžení (Obr. 8.2a),
- na odkazovú čiaru, ktorá označuje plochu základného prvku (Obr. 8.2b),
- na hrubú bodkočiarkovanú čiaru, ak sa základňa vzťahuje iba na obmedzenú časť prvku (Obr. 8.2c),
- na predĺženú kótovaciu čiaru (Obr. 8.3a), ak základňou je os (Obr. 8.3b) alebo stredná rovina (Obr. 8.3c), alebo bod (Lacko et al., 2010).

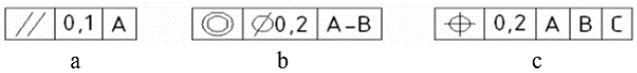


Obr. 8.2. Umiestnenie základní (Lacko et al., 2010)



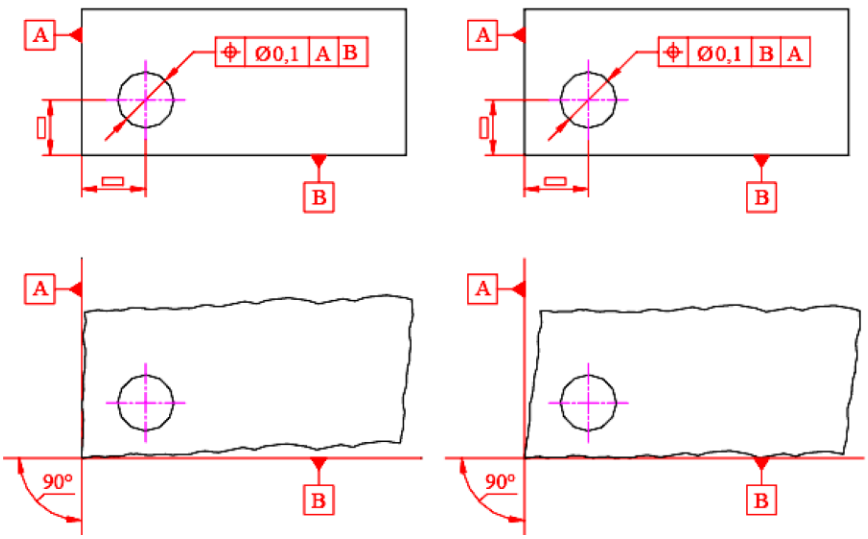
Obr. 8.3. Umiestnenie základní na predĺženú kótovaciu čiaru (Lacko et al., 2010)

Ak sústavu základní tvoria dva alebo tri prvky, uvádzajú sa v poradí podľa dôležitosti zľava doprava v oddelených poliach tolerančného rámčeka podľa Obr. 8.4c.



Obr. 8.4. Možnosti umiestnenie základní v tolerančnom rámčeku (Lacko et al., 2010)

Správny zápis poradia základní je veľmi dôležitý, pretože určuje poradie odoberania stupňov voľnosti súčiastke pri jej upínaní a meraní. Niekedy sa namiesto základne používa aj základný systém. Je to skupina dvoch alebo viacerých oddelených základní, ktoré sa používajú ako združené vzťažné základne tolerovaných útvarov. Základne môžu byť založené na jednom alebo viacerých základných útvaroch súčiastky (Görög a Samardžiová, 2016). Pri použití základného systému – sústavy základní je dôležité poradie, v ktorom sú základne uvedené (Obr. 8.5).



Obr. 8.5. Sústava základní – porovnanie poradia základní (Görög a Samardžiová, 2016)

8.2 Geometrické tolerovanie

Geometrické tolerovanie definuje norma STN EN ISO 1101. Geometrické tolerancie sa musia určiť podľa funkčných požiadaviek. Požiadavky výroby a kontroly môžu tiež ovplyvňovať geometrické tolerovanie. Údaje o geometrických toleranciách na výkrese však nemusia ešte nevyhnutne znamenať používanie určitej metódy výroby, merania alebo kontroly. Geometrická tolerancia aplikovaná na prvok definuje tolerančnú zónu, v ktorej sa musí tento prvok nachádzať (Görög a Samardžiová, 2016).

Rozdelenie geometrických tolerancií je uvedené v Tab. 8.1. Rozoznávame geometrické tolerancie tvaru, profilu, orientácie, polohy a hádzania.

Tabuľka 8.1. Rozdelenie geometrického tolerovania (Čillík, 2012)

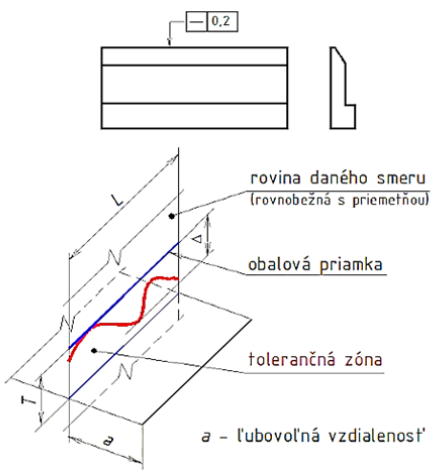
Tolerancie	***Tolerované charakteristiky***	***Značka***	***Je potrebná základňa***
Tvaru	Priamosť	—	nie
	Rovinnosť	⏥	nie
	Kruhovitosť	○	nie
	Valcovitosť	⌭	nie
Profilu	Profil ľubovoľného profilu	⌒	nie/áno
	Profil ľubovoľného povrchu	⌓	nie/áno
Orientácie	Rovnobežnosť	//	áno
	Kolmosť	⊥	áno
	Sklon	∠	áno
Polohy	Umiestnenie	⌖	nie/áno
	Sústrednosť a súosovosť	◎	áno
	Súmernosť	⌯	áno
Hádzania	Kruhové hádzanie	↗	áno
	Celkové hádzanie	⌰	áno

8.2.1 Tolerancie tvaru

Ide o najväčšie odchýlky tvaru. Sú to odchýlky skutočných (nameraných) priamok, plôch, profilov a iných prvkov od ich ideálnych geometrických tvarov.

- **Tolerancia priamosti**

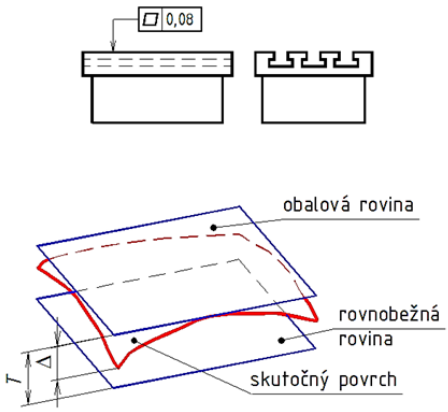
Tolerancia je vyhovujúca, ak skutočná (nameraná) priamka leží medzi dvoma rovnobežnými priamkami vzdialenými od seba o hodnotu tolerancie (Obr. 8.6).



Obr. 8.6. Priamosť (Čillík, 2012)

- **Tolerancia rovinnosti**

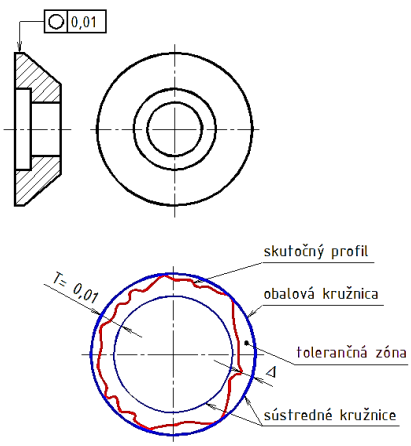
Tolerancia je vyhovujúca, ak skutočná (nameraná) rovina leží medzi dvoma rovnobežnými rovinami vzdialenými od seba o hodnotu tolerancie (Obr. 8.7).



Obr. 8.7. Rovinnosť (Čillík, 2012)

- **Tolerancia kruhovitosti**

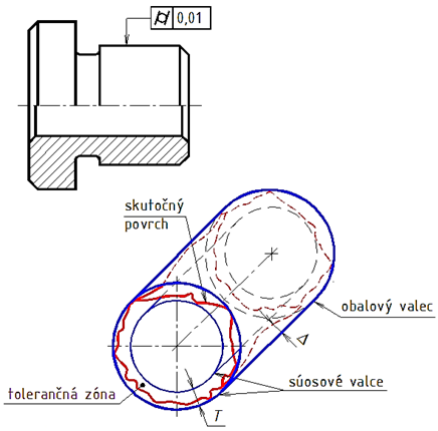
Tolerancia je vyhovujúca, ak skutočný kruhový profil leží medzi dvoma sústrednými kružnicami, keď rozdiel priemeru sústredných kružníc (šírka medzikružia) je hodnota tolerancie (Obr. 8.8).



Obr. 8.8. Kruhovitosť (Čillík, 2012)

- **Tolerancia valcovitosti**

Tolerancia je vyhovujúca, ak skutočná valcová plocha leží medzi dvoma sústrednými valcami, keď rozdiel priemeru sústredných valcov (šírka steny dutého valca) je hodnota tolerancie (Obr. 8.9).

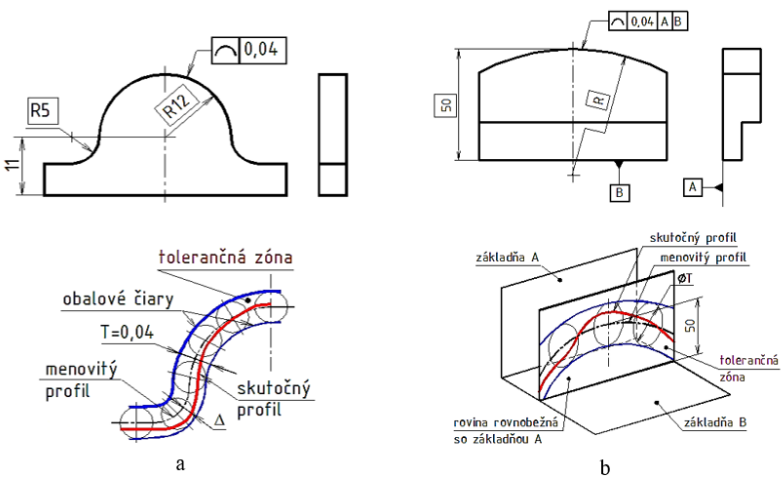


Obr. 8.9. Valcovitosť (Čillík, 2012)

8.2.2 Tolerancie profilu

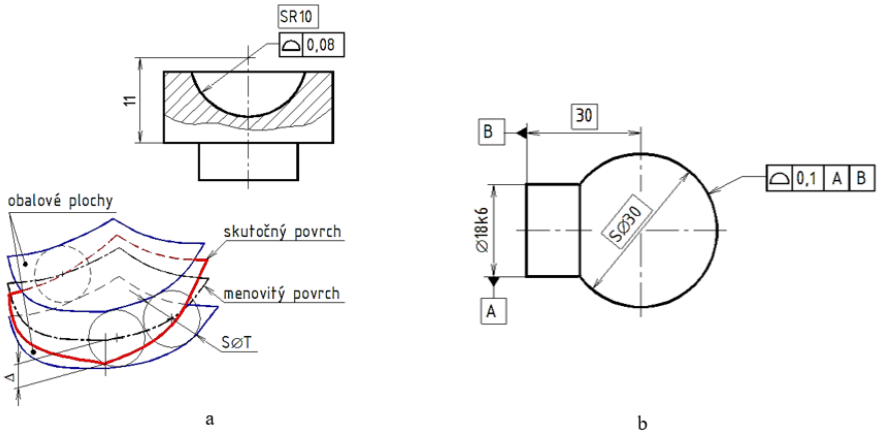
Tieto niektorí autori priraďujú ku toleranciám tvaru, orientácie aj polohy. Tolerancie profilu ľubovoľného obrysu (Obr. 8.10) alebo povrchu (Obr. 8.11) možno rozdeliť na tolerancie s tolerovaním tolerančnej zóny alebo bez tolerovania tolerančnej zóny ku základni alebo ku niekoľkým základniam.

- **Tolerancia profilu ľubovoľného obrysu**



Obr. 8.10. Tolerancia profilu ľubovoľného obrysu (Čillík, 2012)
a – bez tolerovania tolerančnej zóny ku základni,
b – s tolerovaním tolerančnej zóny ku niekoľkým základniam

- **Tolerancia profilu ľubovoľného povrchu**



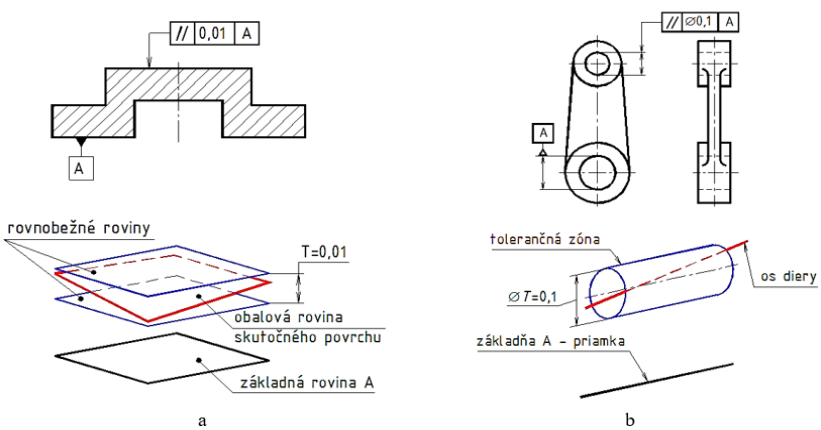
Obr. 8.11. Tolerancia profilu ľubovoľného povrchu (Čillík, 2012)
a – bez tolerovania tolerančnej zóny ku základni,
b – s tolerovaním tolerančnej zóny ku niekoľkým základniam

8.2.3 Tolerancie orientácie

V prípade tolerancií orientácie hovoríme o tzv. združených geometrických toleranciách, posudzujúcich okrem orientácie skutočného prvku aj jeho tvar ako odchýlku od menovitého prvku. Orientácia je vzťahovaná ku jednej alebo niekoľkým základniam.

- **Tolerancia rovnobežnosti**

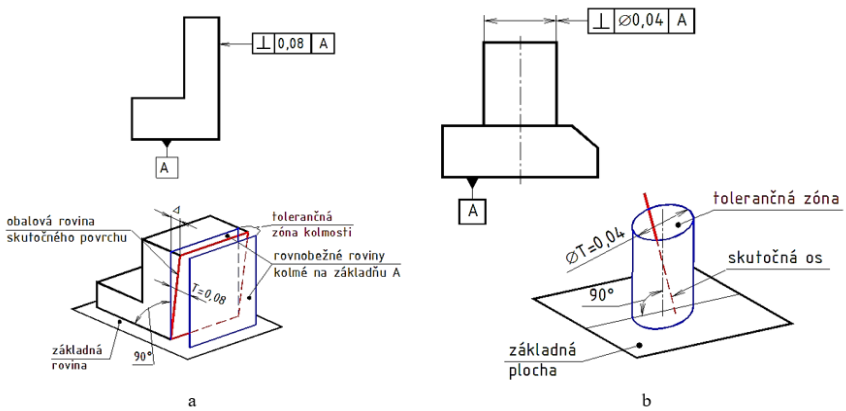
Môže sa týkať viacerých geometrických prvkov, napr. rovnobežnosť rovín, priamok, valcov a atď. Tolerancia je vyhovujúca, ak meraný element leží medzi dvoma rovnobežnými prvkami toho istého typu vzdialenými od seba o hodnotu tolerancie a orientovanými vzhľadom na definovanú základňu (Obr. 8.12).



Obr. 8.12. Tolerancia rovnobežnosti (Čillík, 2012)
a – dvoch rovín, b – dvoch priamok – osi valca

- **Tolerancia kolmosti**

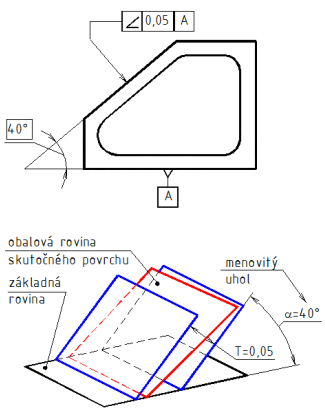
Táto tolerancia sa aplikuje na roviny (Obr. 8.13a) a valcové plochy. Tolerancia je vyhovujúca v prípade, že vyhodnocovaná rovina leží celá medzi dvoma ideálnymi rovnobežnými rovinami vzdialenými od seba o hodnotu tolerancie kolmosti a súčasne kolmými na definovanú základňu. Tolerančná zóna je valcová, ak pred hodnotou tolerancie je značka priemeru ø (Obr. 8.13b).



Obr. 8.13. Tolerancia kolmosti (Čillík, 2012)
a – pre rovinu, b – valec

- **Tolerancia sklonu**

Tolerancia sklonu (Obr. 8.14) býva často zamieňaná s hodnotením hodnoty uhla. V prípade hodnotenia sklonu je potrebné, aby bola nominálna hodnota uhla zadaná vo výkresovej dokumentácii v stupňoch, avšak výsledná hodnota tolerancie bude odchýlka v milimetroch. Vyhovujúca je vtedy, keď skutočná plocha leží celá medzi dvoma rovnobežnými rovinami, vzdialenými o hodnotu tolerancie, ktoré sú súčasne naklonené pod zadaným uhlom voči označenej základni.



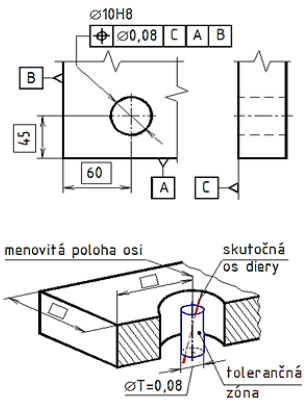
Obr. 8.14. Tolerancia sklonu (Čillík, 2012)

8.2.4 Tolerancie polohy

Tolerancie polohy tiež patria do skupiny združených geometrických tolerancií, pretože okrem polohy skutočného prvku sa posudzuje aj jeho tvar a orientácia ako odchýlka od menovitého prvku. Poloha je vzťahovaná ku jednej alebo niekoľkým základniam.

- **Tolerancia umiestnenia – polohy**

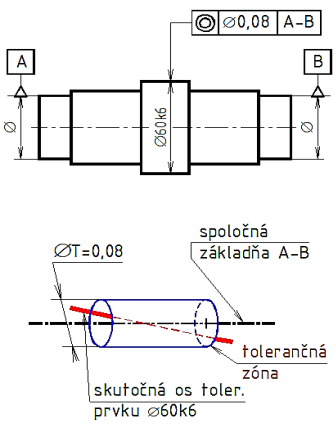
Tolerancia je vyhovujúca, ak celá os prvku leží vo vnútri valca, ktorý má priemer v hodnote zadanej tolerancie (Obr. 8.15).



Obr. 8.15. Tolerancia umiestnenia (polohy) (Čillík, 2012)

- **Tolerancia sústrednosti a súosovosti**

Tolerancia je vyhovujúca v prípade, že skutočná os tolerovaného prvku leží celá vo valci priemeru hodnoty tolerancie vytvoreného okolo základne alebo spoločnej osi vytvorenej z viacerých základní (Obr. 8.16).

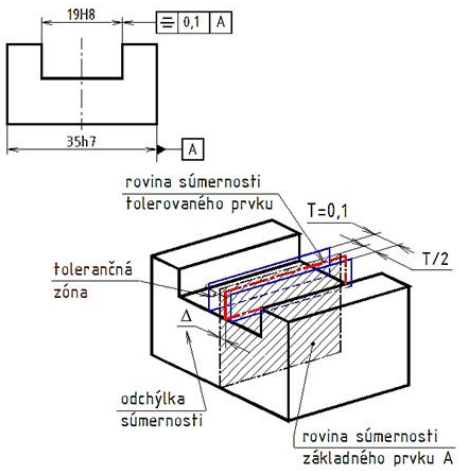


Obr. 8.16. Tolerancia súosovosti (Čillík, 2012)

Tolerancie sústrednosti a súosovosti majú rovnakú značku, avšak v prípade dvoch stredov kružníc hovoríme o sústrednosti a v prípade 3D elementov (valcov) hovoríme o súosovosti osí (priamok).

- **Tolerancia súmernosti**

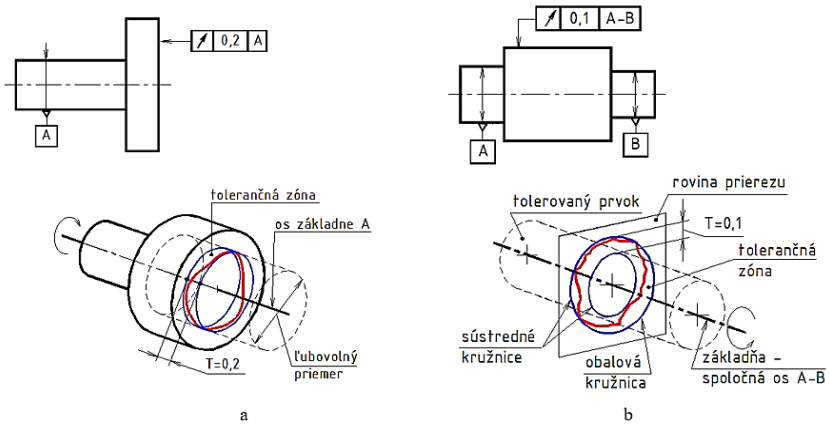
Skutočná tolerovaná rovina musí ležať medzi dvoma rovnobežnými rovinami vzdialenými od seba o hodnotu tolerancie a umiestnenými súmerne ku rovine základne. Vtedy môžeme toleranciu považovať za vyhovujúcu (Obr. 8.17).



Obr. 8.17. Tolerancia súmernosti (Čillík, 2012)

8.2.5 Tolerancie hádzania

V zásade ide o tolerancie polohy, avšak pri ich výpočte sa nevylučujú odchýlky tvaru, a teda ich môžeme začleniť medzi združené tolerancie. Odlišuje sa obvodové a čelné hádzanie v závislosti od posudzovaného – tolerovaného prvku, či ide o hádzanie vzhľadom ku rovine alebo k rotačnému prvku. Každá z týchto tolerancií je posudzovaná v ľubovoľných rezoch ako je možno vidieť na Obr. 8.18.



Obr. 8.18. Tolerancie hádzania (Čillík, 2012)
a – čelného, b – obvodového

Vyššie uvedené geometrické tolerancie sú jasne definované normou, a teda ich vyhodnotenie pri následnej kontrole súčiastok nie je zameniteľné. Avšak aj napriek jasnosti definícií je často stávajúcim sa javom rozdielnosť vo výsledkoch pri meraní toho istého dielu tým istým meracím zariadením rôznymi operátormi. Táto rozdielnosť môže byť daná variáciou možností nastavenia spôsobov vyhodnotenia jednotlivých geometrických prvkov. Pokiaľ nebude jednoznačne zadefinovaná napríklad metóda vyhodnotenia jednoduchého geometrického prvku, budú výsledky ovplyvnené voľbou metrológa.

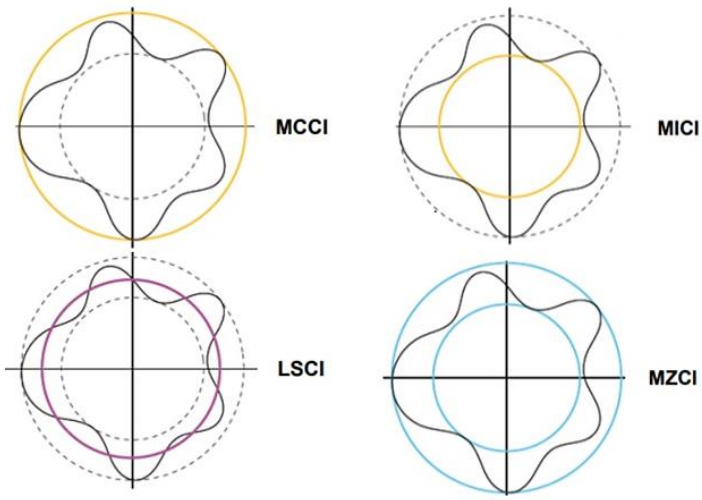
8.3 Metódy vyhodnotenia geometrických prvkov

Na vyhodnotenie každého jedného nasnímaného skutočného geometrického prvku možno použiť viacero možností vyhodnotenia, pričom väčšinou každá z nich vedie k rozličnému výsledku (v závislosti od vyhodnocovanej geometrickej tolerancie).

8.3.1 Metódy vyhodnotenia kružnice (valca)

Na vyhodnotenie nameranej kružnice je možné aplikovať rôzne metódy (Obr. 8.19):

- *minimálna opísaná kružnica (MCCI)* – referenčná kružnica je najmenšia možná kružnica opísaná okolo zosnímaného profilu, ktorá sa používa na hodnotenie vonkajších povrchov,
- *maximálna vpísaná kružnica (MICI)* – referenčná kružnica je najväčšia možná kružnica vpísaná do zosnímaného profilu, ktorá sa používa na hodnotenie vnútorných povrchov.
- *Gaussova kompenzačná kružnica (stredná kružnica, LSCI)* – referenčná kružnica je preložená cez zosnímaný profil metódou najmenších štvorcov. Táto metóda je nepatrne ovplyvnená vybočením profilu.
- *referenčné kružnice minimálnej zóny (MZCI)* – referenčná zóna je tvorená dvoma sústrednými kružnicami, ktoré zachytávajú zosnímaný profil v čo najmenšom rozdiele svojich polomerov.



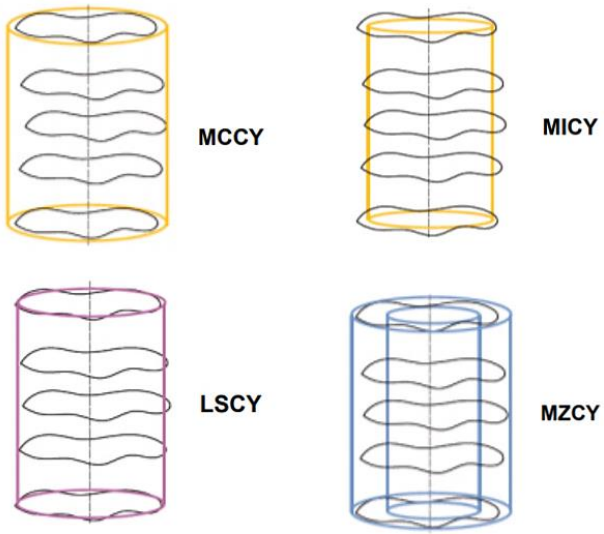
Obr. 8.19. Metódy vyhodnotenia kružnice (Drbúl et al., 2014)

Platí pravidlo, že ak je dĺžka diery alebo hriadeľa menšia ako ich priemer, ide o meranie kružnice a nie valca. V prípade, že je dĺžka väčšia ako priemer, je nutné prispôsobiť počet rezov na konkrétnu dĺžku.

Veľký vplyv na výslednú presnosť merania rotačných prvkov má aj uhlový segment, ktorý je dostupný na vyhodnotenie. To znamená, že ideálny prípad je meranie diery alebo valca na 360°. Ak však takéto meranie nie je možné uskutočniť, je potrebné si uvedomiť, koľkonásobné chyby sú vnášané do výsledku. Preto je nutné vždy voliť najväčší možný uhlový segment, ktorý bude vyhodnocovaný.

Napríklad bolo experimentálne dokázané, že algoritmus na výpočet priemeru kružnice meranej na uhlovom výseku 20° môže vniesť do výsledku až 25 násobnú chybu. Pri 180° to môže byť 1,3 násobok a pri 90° až 2,8-násobok odchýlky (Roithmeier, 2007).

Metódy vyhodnotenia valcov sú obdobné ako metódy vyhodnotenia kružníc s rozdielom, že sa označujú MCCY, MICY, LSCY, MZCY a sú implementované na 3D element (Obr. 8.20).



Obr. 8.20. Metódy vyhodnotenia valca (Drbúl et al., 2014)

Na základe Obr. 8.19 a 8.20 možno dedukovať, že každá z týchto metód bude výrazným spôsobom ovplyvňovať algoritmus výpočtu výslednej geometrickej tolerancie, a teda nie sú voľne zameniteľné. Pri aplikácii rôznych metód rôznymi operátormi pri meraní tej istej súčiastky často dochádza k záveru, že jeden operátor vyhodnotí súčiastku ako OK a druhý ako NOK. Preto je nutné, aby už konštruktéri mali túto vedomosť a vedeli potom ovplyvniť aplikovanú metódu vyhodnotenia operátorom.

8.3.2 Metódy vyhodnotenia priamky

Element priamky sa najčastejšie využíva na vyhodnotenie tolerancie priamosti. Dá sa tak isto ako ostatné geometrické elementy vyhodnotiť viacerými metódami:

- *LSS* – metóda vyhodnocovania nazývaná tiež Gaussova metóda alebo metóda strednej čiary. Prvok ideálneho tvaru, v tomto prípade priamka, sa preloží snímanými bodmi profilu tak, aby súčet kvadrátov vzdialeností bodov od strednej priamky bol minimálny.
- *MZS* – nazýva sa tiež Čebyševova metóda alebo metóda obalová. Podstatou je vytvorenie dvoch rovnobežných priamok, ktoré budú tvoriť obálku profilu. Podmienkou vyhodnotenia odchýlky priamosti je vytvorenie minimálnej možnej zóny z dvoch rovnobežiek, ktorá bude obsahovať všetky body profilu .

8.3.3 Metódy vyhodnotenia roviny

Rovina sa dá podobne ako priamky vyhodnotiť rôznymi metódami na tom istom princípe. Najčastejšie sa používajú metódy:

- *LSS (Gaussova metóda)* – na základe skúseností a experimentov bolo určené, že je vhodná na vyhodnocovanie rozmerov,

- *MZS (Čebyševova metóda alebo metóda minimálnej zóny)* – jej uplatnenie je najmä pri vyhodnocovaní tolerancií tvaru.

Tieto možností nastavenia sú však len jedna z príčin vzniku nezrovnalostí medzi výsledkami merania rôznymi operátormi. Ďalšou dôležitou príčinou je nastavenie filtrácie a eliminácie odľahlých hodnôt v softvéri.

8.4 Filtrácia a eliminácia odľahlých hodnôt

Súčasťou možností na programovanie plánu merania v softvéri je aj eliminácia odľahlých hodnôt a viacero možností filtrácie nameraných hodnôt. Veľmi dôležité je pochopenie procesu filtrácie, aby nedochádzalo k významnému ovplyvneniu výsledkov tým, že budú odfiltrované hodnoty, ktoré majú byť súčasťou výslednej hodnoty geometrickej tolerancie alebo rozmeru. Vtedy by sa ľahko mohlo stať, že napr. plocha, ktorej odchýlka tvaru je mimo toleranciu, bude po odfiltrovaní dôležitých hodnôt uznaná ako vyhovujúca a opačne.

8.4.1 Filtrácia

Filtrovanie nameraných hodnôt umožňuje získať a oddeliť tvar profilu tak, že správnym nastavením filtrov sa z neho odfiltrujú vlny s krátkou vlnovou dĺžkou a teda drsnosť, prípadne vlnitosť.

Samotný snímač, ktorým sa meranie vykonáva, možno považovať za tzv. mechanický filter, pretože vhodnou voľbou priemeru snímača je možné odfiltrovať drsnosť povrchu tým, že snímač bude dostatočne veľký na to, aby nezachádzal do priehlbín povrchu a teda drsnosť povrchu neovplyvní výsledok tolerancie tvaru. Vtedy bude výsledok jasnou reprezentáciou tvaru daného geometrického prvku.

Ďalej v softvéri na programovanie a meranie geometrických tolerancií rozoznávame tzv. elektrické filtre a to:

- *Gaussov filter* – definuje ho norma STN EN ISO 16610. Je to najčastejšie používaný filter a bol komisiou na schvaľovanie ISO noriem zavedený ako štandard na filtrovanie 2D profilov. Patrí medzi vyhladzovacie lineárne filtre.
- *Spline filter* – tak isto je zadefinovaný normou STN EN ISO 16610. Ide o najnovšiu metódu filtrovania nameraných dát a nachádza uplatnenie najmä pri meraní väčších dielov.
  - spline filter, na rozdiel od Gaussovho filtra, nie je ovplyvnený odľahlými hodnotami a jeho kalkulácia je rýchlejšia.
- *2RC filter* – filter, ktorý nie je definovaný normou, no je možné ho zvoliť pri filtrovaní dát v softvéri. Je to najstaršia metóda filtrovania dát a bol prebraný z filtrovania zvukových vĺn. Jeho aplikácia sa však v súčasnosti pri meraní na súradnicových meracích strojoch neodporúča.

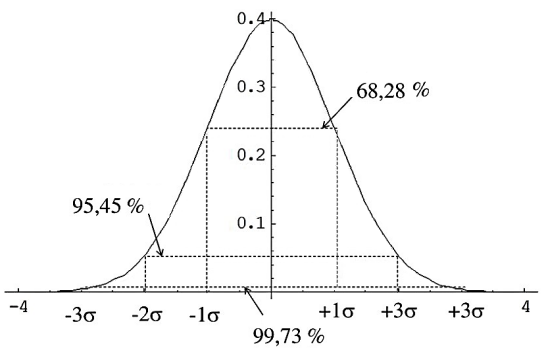
Ďalšie možnosti filtrácie v softvéroch sú 3 typy filtrov podľa toho, ktoré harmonické zložky sa majú odfiltrovať:

- *Low-pass filter* – pri tomto type filtrovania sa odfiltrujú harmonické zložky s vysokými frekvenciami. Preto možno povedať, že tento typ zväčša filtruje z nameraných dát drsnosť a zachováva vlnitosť povrchu.
- *High-pass filter* – je opozitom predchádzajúceho typu filtrovania, dlhé vlny, predstavujúce vlnitosť povrchu sú odfiltrované a krátke vlny, ktoré reprezentujú drsnosť povrchu meranej súčiastky, zostávajú bez zmeny.
- *Band-pass filter* – je kombináciou predchádzajúcich dvoch filtrov – filtruje harmonické zložky v určitom rozsahu – filtruje aj vlnitosť aj drsnosť povrchu (Nenáhlo, 2005).

S nastavením všetkých filtrov treba narábať maximálne opatrne, čo sa preukázalo aj pri experimentálnych úlohách na súradnicovom meracom stroji.

8.4.2 Eliminácia odľahlých hodnôt

Pri eliminácii odľahlých hodnôt sa vychádza zo štandardizovaného normálneho rozdelenia (Obr. 8.21). Umožňuje to odstránenie dát, ktoré sa nachádzajú mimo štatistické limity pre konkrétny vyhodnocovaný súbor dát. Všeobecne pri správnom nastavení eliminácie odľahlých hodnôt by malo dôjsť k odstráneniu tých hodnôt, ktoré môžu byť ovplyvnené napr. nečistotami alebo malými povrchovými chybami, ktoré výrazným spôsobom neovplyvňujú funkčnosť súčiastky.



Obr. 8.21. Štandardizované normálne rozdelenie

Pri použití eliminácie odľahlých hodnôt v rozsahu ± 3σ budú vo vyhodnotení merania použité tie hodnoty, ktoré spadajú do 99,73 % rozsahu nameranej hodnoty. Takáto eliminácia odľahlých hodnôt nemá zásadný vplyv na výsledok vyhodnotenia meranej odchýlky. Avšak pri nevedomosti správnej aplikácie odľahlých hodnôt môže dôjsť k odstráneniu až 31,72 % hodnôt, čo už je zaručene vylúčenie nameraných hodnôt, ktoré sú dôležité z pohľadu správneho definovania geometrického prvku.

Vplyv filtrácie a eliminácie nameraných hodnôt na výslednú hodnotu kruhovitosti meranej na súradnicovom meracom stroji, použitím rôznych kombinácií filtrov a eliminácií je uvedený v Tab. 8.2. Na meranie bola použitá metóda MZCI (referenčné kružnice minimálnej zóny).

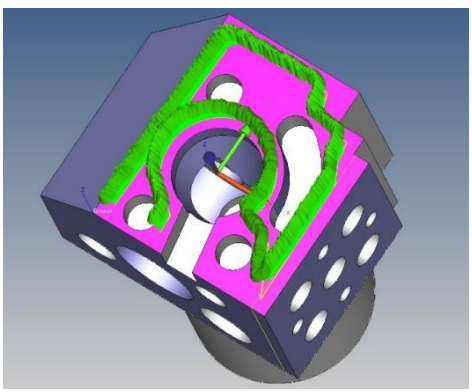
Tabuľka 8.2. Vplyv kombinácie filtrácie a eliminácie odľahlých hodnôt na hodnotu kruhovitosti

Filtrácia	-	✓	-	✓
Eliminácia odľahlých hodnôt	-	-	✓	✓
Kruhovitosť	0,060	0,034	0,056	0,028

Na základe tohto príkladu bolo názorne vysvetlené a preukázané, že pri zachovaní všetkých podmienok konštantných a nezmenených (rýchlosť skenovania, dĺžka kroku, priemer snímača, metóda vyhodnotenia, rez) len pri zmene nastavenia filtrácie a odľahlých hodnôt vie metrológ (programátor) výrazným spôsobom ovplyvniť výsledok merania na úrovni stotín milimetra. Medzi nefiltrovaným výsledkom a výsledkom, na ktorý sa použil filter a eliminácia odľahlých hodnôt na úrovni ± 3σ je rozdiel viac ako 0,03 mm.

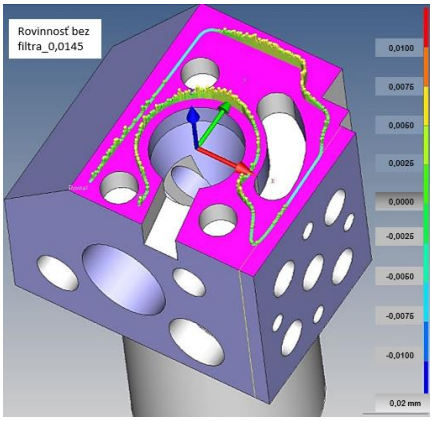
8.4.3 Vplyv filtrácie a eliminácie odľahlých hodnôt na výsledok

V prípade merania a vyhodnocovania rôznych elementov na súčasti môže dôjsť k výraznému ovplyvneniu výsledku nastavením spomínaných parametrov. Na aplikáciu filtrov a elimináciu odľahlých bodov je potrebný dostatočný počet bodov. Preto je nutné, aby meraný element bol snímaný kontinuálne po zvolenej stratégii (Obr. 8.22).

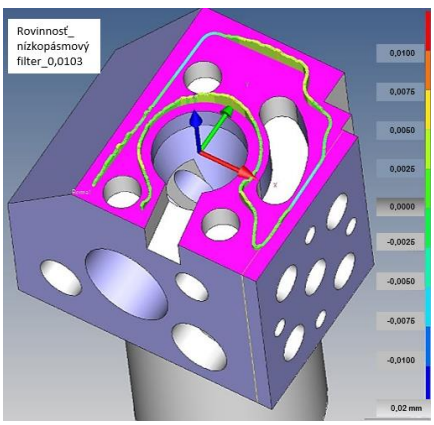


Obr. 8.22. Vektory snímaných bodov tvoriacich stratégiu merania roviny

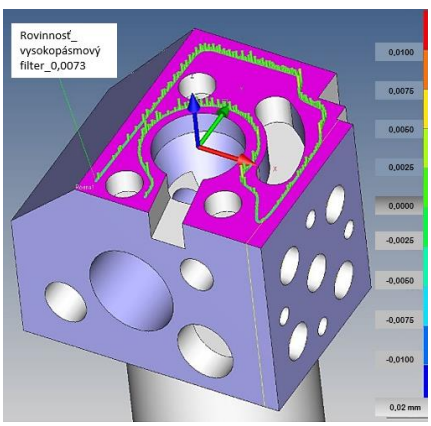
Potom daný element možno použiť na vyhodnotenie napr. geometrickej tolerancie rovinnosti. V prípade ak nie je aplikovaná filtrácia je hodnota rovinnosti 0,014 5 mm (Obr. 8.23). Po aplikácii nízkopásmového filtra (Low – pass filter) je hodnota prepočítaná na 0,010 3 mm (Obr. 8.24) a po použití vysokopásmového filtra (High – pass filter) je rovinnosť 0,007 3 mm (Obr. 8.25).



Obr. 8.23. Hodnotenie rovinnosti bez použitia filtrácie



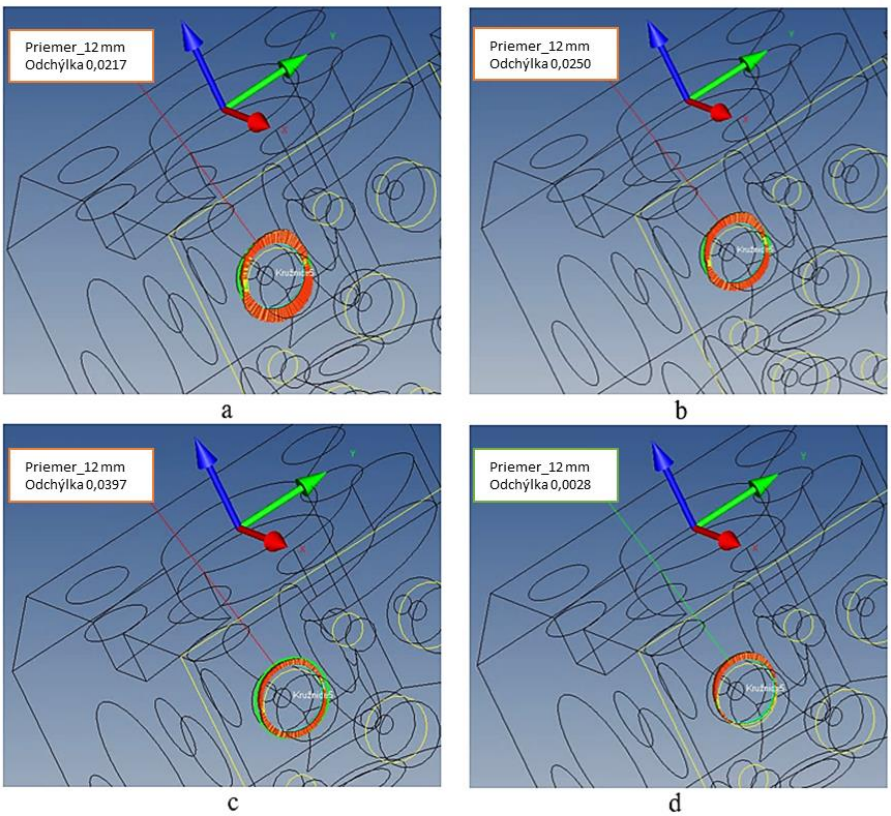
Obr. 8.24. Hodnotenie rovinnosti s použitím nízkopásmového filtra



Obr. 8.25. Hodnotenie rovinnosti s použitím vysokopásmového filtra

Vo všetkých troch prípadoch bola uvedená rovnaká metóda merania a všetky podmienky merania boli nezmenené. Rozdiel vo vyhodnotených hodnotách rovinnosti môže viesť ku zámene nezhodného produktu so zhodným dielom a opačne.

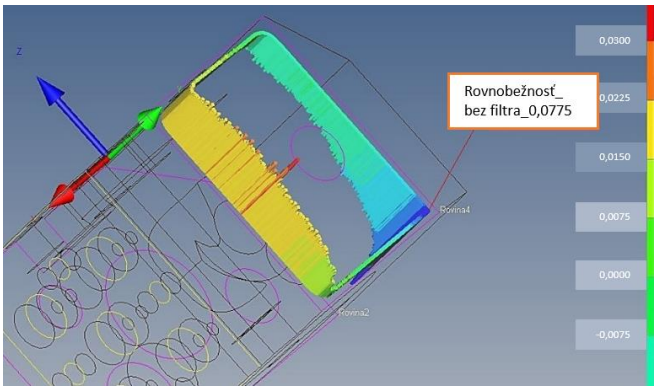
Ďalším príkladom vplyvu nastavovania parametrov v softvéri na výsledky merania je hodnotenie priemeru diery rôznymi metódami. V experimente boli použité 4 metódy hodnotenia, a to: referenčné kružnice minimálnej zóny, Gaussova metóda, maximálna vpísaná kružnica a minimálna opísaná kružnica. Výsledky merania priemeru diery sa v závislosti od zvoleného filtra menili na úrovni stotín milimetra. Pri zvolení referenčných kružníc minimálnej zóny bola hodnota priemeru diery 12,021 7 mm (Obr. 8.26a), pri Gaussovej metóde bola hodnota priemeru 12,025 0 mm (Obr. 8.26b), pri maximálnej vpísanej kružnici bola hodnota priemeru 12,039 7 mm (Obr. 8.26c) a pri minimálnej opísanej kružnici bola hodnota priemeru diery 12,002 8 mm (Obr. 8.26d).



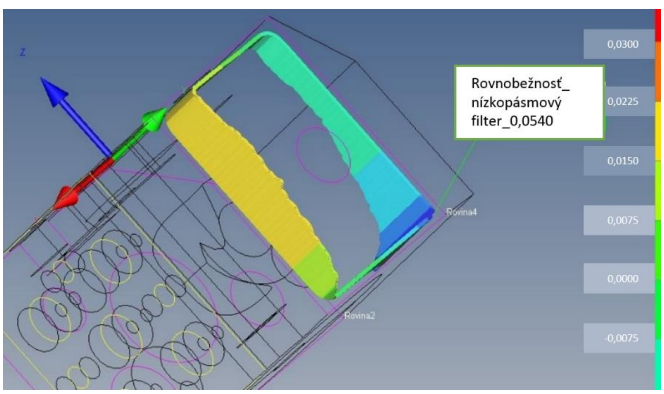
Obr. 8.26. Metódy hodnotenia priemeru diery (kružnice)
a – referenčné kružnice minimálnej zóny, b – Gaussova metóda, c – maximálna vpísaná kružnica, d – minimálna opísaná kružnica

Rovnako možno pozorovať význam vplyvu filtrácie na elimináciu odľahlých hodnôt pri hodnotení geometrických tolerancií polohy a orientácie, ako je to napr. v prípade hodnotenia rovnobežnosti. Pri zmene filtrov dochádza k dosiahnutiu rôznych výsledkov tolerancie. Pri hodnotení rovnobežnosti dvoch rovín bez použitia filtrov (Obr. 8.27) je hodnota

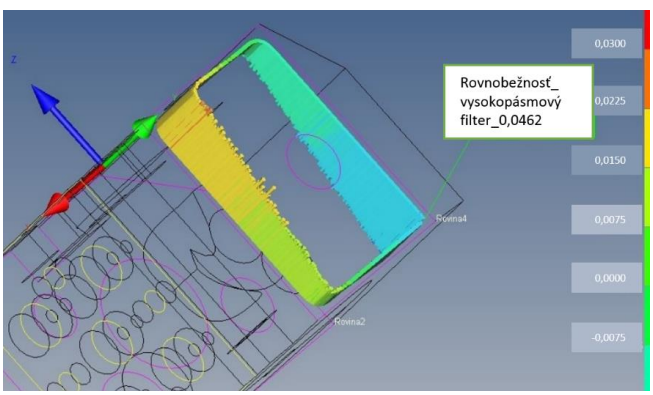
rovnobežnosti 0,077 5 mm, pri aplikácii nízkopásmového filtra (Obr. 8.28) je hodnota rovnobežnosti prepočítaná na 0,054 0 mm a pri použití vysokopásmového filtra (Obr. 8.29) je hodnota rovnobežnosti 0,046 2 mm.



Obr. 8.27. Hodnotenie rovnobežnosti bez použitia filtrácie



Obr. 8.28. Hodnotenie rovnobežnosti s použitím nízkopásmového filtra



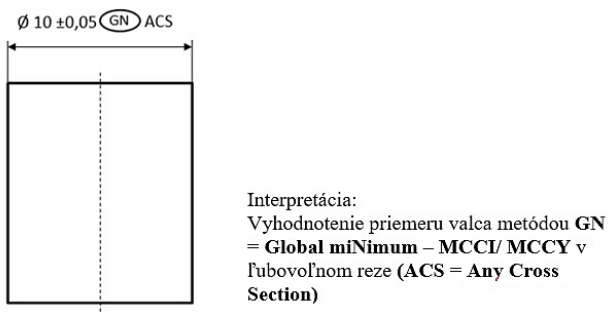
Obr. 8.29. Hodnotenie rovnobežnosti s použitím vysokopásmového filtra

Všetky uvedené hodnotenia rovnobežnosti boli realizované bez zmeny ostatných podmienok hodnotenia. Rovnako nebolo menené hodnotenie referenčného elementu. Vo všetkých prípadoch bol aplikovaný filter Spline. Rozdiely možno pozorovať nielen na číselných výsledkoch, ale aj na grafických priebehoch rovnobežnosti.

8.5 Odporúčania

V súčasnosti viaceré firmy začínajú aplikovať do výkresovej dokumentácie značky, skratky, označenia, ktoré bližšie špecifikujú spôsob merania, vyhodnotenia, určujú konkrétne miesto rezu, čo by mohlo viesť ku predídeniu problémov s rozličnými výsledkami získanými dvoma operátormi – metrológmi.

Typickým príkladom je problém merania a vyhodnotenia priemeru valca, ktorý môže byť meraný a vyhodnocovaný v rôznych rezoch a rôznou metódou vyhodnotenia, čo môže spôsobiť rozdielne výsledky. Preto možno použiť značky, ktoré určia konkrétne rezy a špecifikujú presnú metódu vyhodnotenia (Obr. 8.30).



Obr. 8.30. Kótovanie pomocou prídavných značiek na vyhodnotenie priemeru – ACS

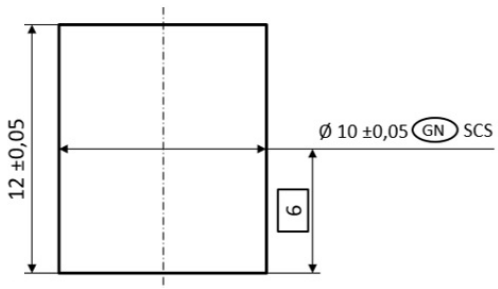
Na definovanie metódy vyhodnotenia môžu byť použité označenia:

- *GX (Global maXimum)* – vyhodnotenie metódou MICI/MICY maximálnej vpísanej kružnice,
- *GN (Global miNimum)* – vyhodnotenie metódou MCCI/MCCY minimálnej opísanej kružnice,
- *GC (Global Chebyshev)* – vyhodnotenie metódou MZCI/MZCY minimálnej zóny,
- *GG (Global Gauss)* – vyhodnotenie metódou LSCI/LSCY najmenších štvorcov.

Špecifikácia miesta merania – rezu sa tiež môže upresniť značkami:

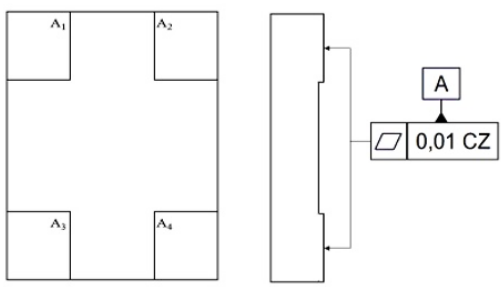
- *ACS (Any Cross Section)* – meranie v hociktorom možnom reze,
- *SCS (Specific Cross Section)* – meranie v špecifickom reze, ktoré musí byť bližšie zadefinované, napr. prídavnou teoretickou kótou (Obr. 8.31),
- *ALS (Any Longitudinal Section)* – meranie v hociktorom možnom pozdĺžnom reze,

- *CZ (Common Zone)* – meranie týkajúce sa spoločnej tolerančnej zóny – základne (Obr. 8.32),
- *TED (Theoretically Exact Dimension)* – teoreticky presný rozmer – udáva sa bez tolerancie a označuje ideálny rozmer. Býva prídavnou kótou ku ďalších vyhodnoteniam.



Interpretácia:
Vyhodnotenie priemeru valca metódou **GN = Global miNimum – MCCI/ MCCY** v konkrétnom reze **(SCS = Specific Cross Section)** vo vzdialenosti od čela o teoreticky presný rozmer.

Obr. 8.31. Kótovanie pomocou prídavných značiek na vyhodnotenie priemeru – SCS



Interpretácia:
Základňa A je zložená zo štyroch čiastkových základní.
Tolerancia rovinnosti je aplikovaná s označením **CZ (Common Zone)** a teda má byť z čiastkových základní A_1 – A_4 vytvorená 1 spoločná základňa a jej rovinnosť má byť potom vyhodnotená.

Obr. 8.32. Označenie na výkrese CZ

Tieto a rôzne ďalšie označenia nachádzajú uplatnenie v zjednotení výkresovej dokumentácie medzi konštruktérom a metrológom.

Záver

Meranie strojárskych súčiastok je neoddeliteľnou súčasťou výrobného procesu. Aby bola zabezpečená presnosť merania a aby nedochádzalo k nezrovnalostiam vo vyhodnotení a kontrole súčiastok je nutné, aby bola výkresová dokumentácia vytváraná konštruktérmi jednoznačná a rôznymi metrológmi chápaná rovnako. To možno dosiahnuť:

- intenzívnou komunikáciou medzi konštruktérom a metrológom – programátorom plánu merania súčiastky,
- správnym označením základní z hľadiska ich funkčnosti, čo vedie k eliminácii možných problémov pri vytváraní plánu merania – z hľadiska metrologického sú základne považované za prvky, ktoré tvoria základný súradnicový systém a teda v procese kontaktného merania musia byť voľne prístupné z čo najväčšej časti (pokiaľ nie je so zákazníkom – objednávateľom merania dohodnuté inak),

- voľbou vhodnej metódy vyhodnotenia vzhľadom na funkčnosť meraných plôch, napr. vzhľadom na to, či ide o uloženie jednotnej diery alebo jednotného hriadeľa, či ide o rozmerové charakteristiky alebo tolerancie tvaru, polohy, orientácie alebo hádzania. Nie v každom prípade sa dá použiť každá metóda, inak môže dôjsť ku nesprávnemu vyhodnoteniu tolerancie.
- použitím rôznych filtrácií a eliminácií odľahlých hodnôt, s ktorými je však potrebné pracovať nanajvýš opatrne.

Zoznam bibliografických odkazov

ČILLÍK, L. et al., 2012. *Konštruovanie I* [online]. [cit. 2020-07-23]. Dostupné na internete: < http://www.konstruovanie1.uniza.sk/>

LACKO, F., ORAVCOVÁ, J., RIEČIČIAROVÁ, E. 2010. *Základy konštruovania a technická dokumentácia*. Trnava, AlumniPress. p. 84 - 86. ISBN 978-80-8096-134-3.

GÖRÖG, A., SAMARDŽIOVÁ, M.. 2016. *Metrológia a kvalita technologických procesov.* Trnava, AlumniPress. p. 45 - 86. ISBN 978-80-8096-225-8.

DRBÚL, M. et al., 2014. *Strojárska metrológia a kvalita povrchov vytvorených technológiami obrábania.* Žilina, ŽU v Žiline. p. 34 - 37. [cit. 2020-09-09]. Dostupné na internete: <http://projekty.fs.vsb.cz/064/docs/metrologie.pdf>

WACZULÍKOVÁ, I., SLEZÁK, P. 2011. *Štatistické testovanie hypotéz. Porovnanie dvoch výberov.* Univerzita Komenského. [cit. 2020-09-11]. Dostupné na internete: <https://slideplayer.com/slide/14454585/>

NENÁHLO, Č., 2005. *Měření vybraných geometrických veličin.* Praha, Česká metrologická

spoločnosť, 207 s.

STN EN ISO 1101 (01 4401): 2006, Geometrické špecifikácie výrobkov (GPS). Geometrické tolerovanie. Tolerancie tvaru, orientácie, polohy a hádzania.

ROITHMEIER, R. 2007. *Measurement strategies in Contact Coordinate Metrology.* Ellwangen, Opferkuch GmbH. ISBN 978-3-9811422-2-8.

STN EN ISO 16610: 2011, Geometrické špecifikácie výrobkov (GPS). Filtrácia. Časť 21: Lineárne profilové filtre: Gaussove filtre.

9 NÁVRH MTM OPTIMALIZÁCIE MONTÁŽNEJ LINKY

ŽILÍNEK, P.

Úvod

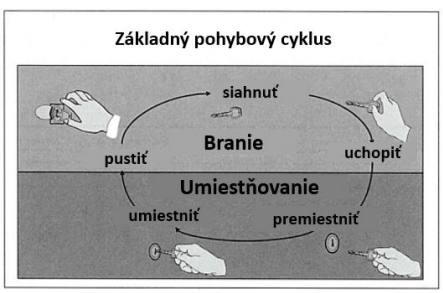
Podnik Schaeffler Skalica ako súčasť celosvetového koncernu Shäffler dodávajúci produkty v oblasti Automotiv Industry pociťuje každodenný tlak na potrebu zvyšovania produkcie, znižovania cien produktov pri zvyšovaní kvality produktov. Preto pri rastúcich cenách surovín a energií je potrebné udržať si konkurencieschopnosť a jednou z ciest ako to dosiahnuť je napríklad neustále zlepšovanie v oblastiach odstraňovanie plytvania a zvyšovania produktivity. Aby si podnik udržal tento rastúci trend, siahol po nástrojoch a metódach, pomocou ktorých dokáže výrobu optimalizovať a tzv. „zoštíhľovať" – odstraňovať plytvania.

Jednou z niekoľkých metód optimalizácie produktivity a pracovných podmienok je aj metóda MTM, ktorá je v úzkej spolupráci s ergonómiou v Schaeffler Skalica úspešne implementovaná už 7 rokov.

9.1 Základy metodiky MTM

MTM je metóda merania a analýzy práce, ktorej základné procesy boli vyvinuté v 40. rokoch 20. storočia v USA ako systém vopred stanovených časov. V roku 1948 boli zverejnené v knihe „Methods-Time Measurement" (MTM). MTM je postup, ktorý analyzuje manuálne činnosti alebo metódy na základné pohyby a priraďuje každému pohybu preddefinovanú časovú normu (hodnotu), ktorá je závislá od druhu pohybu a podmienok, v ktorých je pohyb vykonávaný. Patrí medzi metódy merania práce prostredníctvom vopred určených časov. (Maynard a kol., 1948)

Pri podrobnej analýze ľudskej práce sa ukázalo, že sa skladá zo súboru úkonov a pohybov, ktoré sa pravidelne opakujú (Obr. 9.1). Takéto základné prvky práce sú nazývané základné pohyby (napr. siahnuť, uchopiť, premiestniť, umiestniť a pustiť).



Obr. 9.1. Schéma základného pohybového cyklu

Metóda je založená na princípe, že každú manuálnu prácu možno rozdeliť na základné pohyby, z ktorých možno spätne vytvoriť akýkoľvek pracovný postup. Pre tieto základné pohyby sú určené časové hodnoty pre ich dĺžku trvania. Týmto spôsobom metóda MTM v sebe spája faktory pohybu i času vo vzájomnej väzbe. To umožňuje pomocou tejto metódy nielen presne opísať vymedzený pracovný postup a jeho podmienky, ale zároveň určiť i jeho časové trvanie. Pri tomto postupe možno takmer vylúčiť používanie stopiek na normovanie práce.

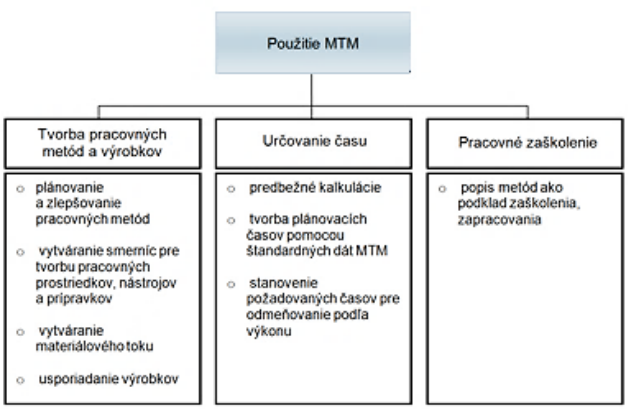
Vo svete sú používané rôzne nástroje a metódy na princípe vopred určených časov. Základný princíp MTM bol stanovený na základe obsiahleho snímania ľudského pohybu a to z viacerých priemyselných odvetví. Vopred stanovené časy definované v MTM metodike boli nasnímané kamerou, upravené pomocou štatistických metód a zhrnuté do *MTM karty normovaných časov*. Preto je MTM jednou z najprepracovanejších a medzinárodne platných metód na analýzu práce. Základom použitia MTM v súlade s ergonomickými zásadami je tzv. „Normovaný výkon“ opísaný ako výkon stredne zručného, zaučeného pracovníka, ktorý môže tento výkon vykonávať dlhodobo bez nadmernej únavy.

V súčasnosti existuje niekoľko metód MTM vyvinutých z pôvodnej metodiky, ktorých použitie je závislé od typu procesu, opakovateľnosti a jeho zložitosti. V princípe, čím je výrobný cyklový čas kratší, tým podrobnejšia a aj prácnejšia MTM metóda musí byť použitá. Najpoužívanejšie metódy aplikované v podnikoch sú (Sdružení MTM pro Českou republiku a Slovenskou republiku, 2009):

- MTM-1 veľkosériová výroba, cyklový čas do 1 minúty.
- MTM-UAS sériová výroba, cyklový čas 1 *až* 5 minút.
- MTM-MEK kusová výroba, cyklový čas 5 *až* 30 minút.
- MTM-Logistic pre logistické činnosti.

„Od začiatku správne!“ zdôrazňuje nutnosť minimalizovať náklady a dosiahnuť čo najlepšiu produktivitu už pri vzniku výrobku. MTM možno použiť v celom toku tvorby hodnôt v podniku (Obr. 9.2). V rámci riadenia pracovného systému sa používa v dvoch fázach, a to:

- ***v prvej fáze (koncept plánovania MTM)*** – najvyššou prioritou je plánovanie systému práce a pracovného prostredia s ohľadom na hospodárnosť a človeka (ergonómia),
- ***v druhej fáze (koncept optimalizácie MTM)*** **–** zastupuje prevádzkovú fázu optimalizácie pracovného procesu, nasledujúcom po zahájení výroby. Pozornosť je sústredená na neustále zlepšovanie vzhľadom na meniace sa potreby výroby.



Obr. 9.2. Použitie metódy MTM

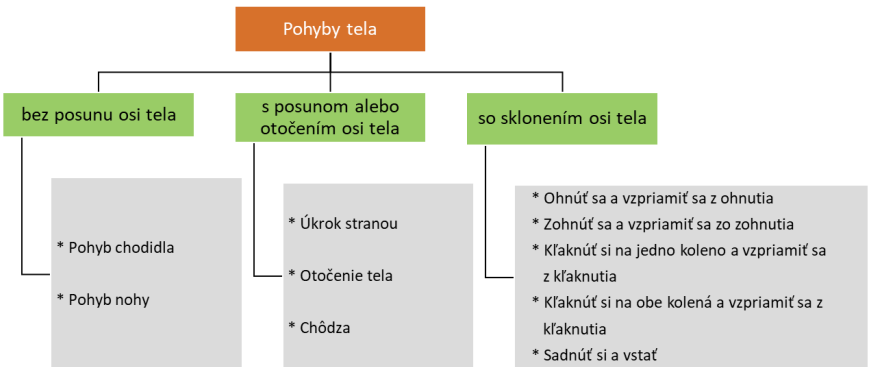
9.1.1 Základný pohybový cyklus

Pri analýzach bolo zistené, že ovplyvniteľné postupy sa skladajú z 80 *až* 85 % z piatich základných pohybov rúk, uvedených v Tab. 9.1.

Tabuľka 9.1. Základné pohyby rúk

Stiahnuť	***Uchopiť***	***Premiestniť***	***Umiestniť***	***Pustiť***
pohyb ruky k predmetu	získanie kontroly nad predmetom	pohyb ruky s predmetom	zloženie alebo priloženie predmetu	zrušenie kontroly nad predmetom

Pre súhrnnú pohybovú štúdiu je však potrebné uvažovať aj so základnými pohybmi tela (Obr. 9.3) a pohybmi očí (zrakové funkcie).



Obr. 9.3. Základné pohyby tela

Pri pohybových cykloch v rámci MTM metodiky je uvažované s ***ovplyvňujúcimi veličinami***, ktoré presnejšie špecifikujú podmienky za akých sú pohyby vykonávané, sú to:

- potreba kontroly – *nízka, stredná, vysoká* (svalová, zraková, myšlienková),
- dĺžka pohybu,
- typ priebehu pohybu,
- vynaloženie sily / hmotnosť predmetu.

9.1.2 Dátová karta

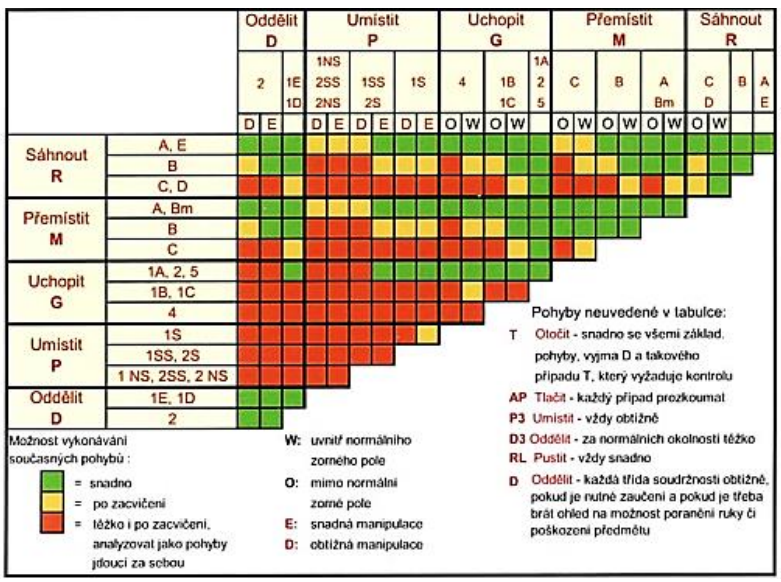
Časové hodnoty pri podrobných analýzach MTM-1 sú malé, preto je zavedená kratšia časová jednotka (TMU – Time Measurement Unit) čo je definované ako 1/100 000 hodiny. Prepočet vzhľadom na sekundy, minúty a hodiny je uvedený v Tab. 9.2

Tabuľka 9.2. Prepočet časových jednotiek (TMU)

Časové jednotky			
TMU	***sekundy***	***minúty***	***hodiny***
1	0,036	0,0006	0,00001
27,8	1	-	-
1 666,7	-	1	-
100 000	-	-	1

Vnímanie a senzomotorika ľudského organizmu ako aj ergonómia je definovaná v Tab. 9.3. Farebne je tu znázornené, ktoré pohyby, analyzované v MTM, je možné vykonávať ľavou a pravou rukou súčasne, a ktoré nie je možné vykonávať ani po zaučení.

Tabuľka 9.3. Tabuľka súčasných pohybov



Príklad dátových kariet s uvedenými pohybmi pracovníka a ich časová kapacita sú uvedené na Obr. 9.4 a Obr. 9.5.

Otočit - T (Turn)

Kód	Síla / váha (daN / kg)		Čas TMU pro úhly otáčení										
			30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
T-S	Malá	≤ 1	2,8	3,5	4,1	4,8	5,4	6,1	6,8	7,4	8,1	8,7	9,4
T-M	Střední	> 1 do ≤ 5	4,4	5,5	6,5	7,5	8,5	9,6	10,6	11,6	12,7	13,7	14,8
T-L	Velká	> 5 do ≤ 16	8,4	10,5	12,3	14,4	16,2	18,3	20,4	22,2	24,3	26,1	28,2

Pohyby chodidel, nohou a trupu

Kód	TMU	Délka pohybu	Popis pohybu
FM FMP	8,5 19,1	do 10 cm	**Pohyb chodidla** Pohyb chodidla s vynaložením značné síly
LM-	7,1 0,5	do 15 cm každý další cm	**Pohyb nohy**
			Úkrok stranou s posunem osy těla do strany
		do 30 cm	analyzovat pohyb **Sáhnout** nebo **Přemístit**
SS-C1	17,0 0,2	30 cm každý další cm	Případ I : Úkrok stranou je ukončen, jestliže pohybující se noha opět stojí na podlaze
SS-C2	34,1 0,4	30 cm každý další cm	Případ II : Přitažená noha musí stát opět na podlaze, aby bylo možné provést další pohyb
			Otočení těla o 45° - 90°
TBC1	18,6		Případ I : Otočení těla je ukončeno, jestliže noha, kterou bylo hýbáno, stojí opět na podlaze
TBC2	37,2		Případ II : Přitažená noha se musí opět dotknout podlahy předtím, než je možno vykonat další pohyb
B, S, KOK AB, AS, AKOK	29,0 31,9		**Ohnout, Shýbnout** nebo **Kleknout na jedno koleno** **Vzpřímit se** z **Ohnutí, Shýbnutí** nebo **Kleknutí na jedno koleno**
KBK AKBK	69,4 76,7		**Kleknout na obě kolena** **Vzpřímit se z Kleknutí na obě kolena**
SIT STD	34,7 43,4		**Sednout** **Vstát ze sedu**
W - P W - PO	15,0 17,0	za 1 krok za 1 krok	**Chůze** **Chůze omezená a / nebo se zátěží > 23 kg**

Copyrighted! - Reprint not permitted! – © Copyright 1955 ... © 2008
MTM Association for Standards and Research

Mezinárodní ředitelství MTM
info@mtm-international.org

MTM-1
Datová karta
(SI - metrický systém)

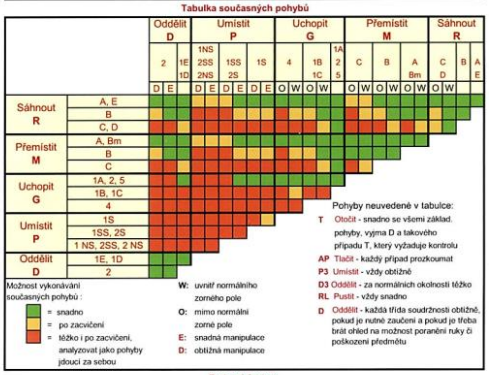
IMD

Bez předchozího odborného školení může vést používání této karty normovaných časových hodnot MTM k nesprávným výsledkům.

Časové hodnoty na této kartě odpovídají výkonu 100% dle LMS

Přepočet časových hodnot			
TMU	Sek.	Min.	Hod.
1	0,036	0,0006	0,00001
27,8	1	-	-
1666,7	-	1	-
100 000	-	-	1

Tabulka současných pohybů



Zrakové funkce

Kód	TMU	Popis
ET	15,2 x T / D max 20,0 TMU	**Přesunutí pohledu (Eye Travel)** T: Vzdálenost mezi zornými body D: Vzdálenost očí od spojnice zorných bodů
EF	7,3	**Kontrola (Eye Focus)**

Obr. 9.4. Dátová karta 1. strana

Sáhnout - R - (Reach)

Délka pohybu v cm	TMU							Případ pohybu - popis
	R-A	R-B	R-C R-D	R-E	mR-A R-Am	mR-B R-Bm	m(B)	
≤ 2	2,0	2,0	2,0	2,0	1,6	1,6	0,4	A Sáhnout k jednotlivému předmětu nacházejícímu se stále na stejném místě, nebo který je držen ve druhé ruce nebo na něm druhá ruka spočívá
4	3,4	3,4	5,1	3,2	3,0	2,4	1,1	
6	4,5	4,5	6,5	4,4	3,9	3,1	1,4	
8	5,5	5,5	7,5	5,5	4,6	3,7	1,8	
10	6,1	6,3	8,4	6,8	4,9	4,3	2,0	
12	6,4	7,4	9,1	7,3	5,2	4,8	2,6	
14	6,8	8,2	9,7	7,8	5,5	5,4	2,8	B Sáhnout k jednotlivému předmětu v místě, které se případ od případu mění
16	7,1	8,8	10,3	8,2	5,8	5,9	2,9	
18	7,5	9,4	10,8	8,7	6,1	6,5	2,9	
20	7,8	10,0	11,4	9,2	6,5	7,1	2,9	
22	8,1	10,5	11,9	9,7	6,8	7,7	2,8	
24	8,5	11,1	12,5	10,2	7,1	8,2	2,9	C Sáhnout k předmětu ve skupině jiných předmětů a musí být vybrán
26	8,8	11,7	13,0	10,7	7,4	8,8	2,9	
28	9,2	12,2	13,6	11,2	7,7	9,4	2,8	
30	9,5	12,8	14,1	11,7	8,0	9,9	2,9	
35	10,4	14,2	15,5	12,9	8,8	11,4	2,8	D Sáhnout k předmětu, který je velmi malý nebo těžce uchopitelný (poranění, poškození)
40	11,3	15,6	16,8	14,1	9,6	12,8	2,8	
45	12,1	17,0	18,2	15,3	10,4	14,2	2,8	
50	13,0	18,4	19,6	16,5	11,2	15,7	2,7	
55	13,9	19,8	20,9	17,8	12,0	17,1	2,7	E Sáhnout do neurčitého místa nebo přitáhnout ruku/ruce k tělu nebo vytáhnout ruku/ruce z pracovní oblasti nebo příprava před dalším pohybem
60	14,7	21,2	22,3	19,0	12,8	18,5	2,7	
65	15,6	22,6	23,6	20,2	13,5	19,9	2,7	
70	16,5	24,1	25,0	21,4	14,3	21,4	2,7	
75	17,3	25,5	26,4	22,6	15,1	22,8	2,7	
80	18,2	26,9	27,7	23,9	15,9	24,2	2,7	

Uchopit - G - (Grasp)

Kód	TMU	Případ pohybu - popis
G1A	2,0	**Uchopit sevřením prstů** jednotlivý, snadno uchopitelný předmět
G1B	3,5	**Uchopit** jednotlivý velmi malý nebo plochý předmět ležící na ploše
G1C1	7,3	∅ > 12 ≤ 25 mm — Přibližně válcovitý předmět, jehož uchopení je ze zdola a ze strany ztíženo
G1C2	8,7	∅ ≥ 6 do ≤ 12 mm
G1C3	10,8	∅ < 6 mm
G2	5,6	**Přehmátnout** prsty na předmětu
G3	5,6	**Předat** do druhé ruky
G4A	7,3	> 25 x 25 x 25 mm — Předmět je zamíchán mezi jinými (nutno vyhledat a vybrat)
G4B	9,1	≥ 6 x 6 x 3 do ≤ 25 x 25 x 25 mm
G4C	12,9	< 6 x 6 x 3 mm
G5	0,0	**Uchopit dotykem**

Pustit - RL - (Release)

Kód	TMU	Popis činnosti	Kód	TMU	Popis činnosti
RL1	2,0	Pustit rozevřením prstů	RL2	0,0	Pustit přerušením dotyku

8 / 2010 JH

Přemístit - M - (Move)

Délka pohybu v cm	TMU					Síla / hmotnost			Případ pohybu - popis
	M-A	M-B	M-C	mM-B M-Bm	m(B)	daN / kg	Stat.konst. SC v TMU	Dynamický faktor W	
≤ 2	2,0	2,0	2,0	1,7	0,3	1	0,0	1,00	A Přemístit předmět do druhé ruky nebo proti zarážce
4	3,1	4,0	4,5	2,8	1,2				
6	4,1	5,0	5,8	3,1	1,9	2	1,6	1,04	
8	5,1	5,9	6,9	3,7	2,2				
10	6,0	6,8	7,9	4,3	2,5	4	2,8	1,07	
12	6,9	7,7	8,8	4,9	2,8				
14	7,7	8,5	9,8	5,4	3,1	6	4,3	1,12	
16	8,3	9,2	10,5	6,0	3,2				
18	9,0	9,8	11,1	6,5	3,3	8	5,8	1,17	B Přemístit předmět do přibližného nebo neurčitého místa Vůle > 25 mm
20	9,6	10,5	11,7	7,1	3,4				
22	10,2	11,2	12,4	7,6	3,6	10	7,3	1,22	
24	10,8	11,8	13,0	8,2	3,6				
26	11,5	12,3	13,7	8,7	3,6	12	8,8	1,27	
28	12,1	12,8	14,4	9,3	3,5				
30	12,7	13,3	15,1	9,8	3,5	14	10,4	1,32	
35	14,3	14,5	16,8	11,2	3,3				
40	15,8	15,6	18,5	12,6	3,0	16	11,9	1,36	C Přemístit předmět do přesného místa Vůle > 12 ≤ 25 mm
45	17,4	16,8	20,1	14,0	2,8				
50	19,0	18,0	21,8	15,4	2,6	18	13,4	1,41	
55	20,5	19,2	23,5	16,8	2,4				
60	22,1	20,4	25,2	18,2	2,2	20	14,9	1,46	
65	23,6	21,6	26,9	19,5	2,1				
70	25,2	22,8	28,6	20,9	1,9	22	16,4	1,51	
75	26,7	24,0	30,3	22,3	1,7				
80	28,3	25,2	32,0	23,7	1,5				

Umístit - P - (Position)

Kód	Třída lícování			Symetrie	Manipulace	
	Lícování	Vložení	Přiložení		E	D
P 1	Volné	Bez tlaku	> ± 1,5 do ≤ ± 6,0 mm	S	5,6	11,2
				SS	9,1	14,7
				NS	10,4	16,0
P 2	Těsné	Lehký tlak	*> ± 0,4 do ≤ ± 1,5 mm*	S	16,2	21,8
				SS	19,7	25,3
				NS	21,0	26,6
P 3	Pevné	Silný tlak	*> 0 do ≤ ± 0,4 mm*	S	43,0	48,6
				SS	46,5	52,1
				NS	47,8	53,4

Tlačit - AP - (Apply-Pressure)

Kód	TMU	Popis	Komponenty	Kód	TMU	Popis
				AF	3,4	Vyvíjení síly
APA	10,6	Bez přehmátnutí	AF + DM + RLF	DM	4,2	Minimální doba setrvání
APB	16,2	S přehmátnutím	G2 + APA	RLF	3,0	Povolování síly

Oddělit - D - (Disengage)

Kód	Soudržnost	Popis	E	D
D 1	Volná	Velmi malá síla - nepatrný zpětný ráz cca do 2,5 cm	4,0	5,7
D 2	Těsná	Střední síla - lehký zpětný ráz do cca 12 cm	7,5	11,8
D 3	Pevná	Velká síla - velký zpětný ráz do cca 30 cm	22,9	34,7

Obr. 9.5. Dátová karta 2. strana

9.1.3 MTM analýza, workbook

Na tvorbu MTM-1 analýz je vytvorený list analýzy (Obr. 9.6) s klasifikáciou činností pre ľavú a pravú ruku (možnosti vykonávania súčasných pohybov podľa Tab. 9.3). Na presné určenie činností je nutné mať určený aj „počet“ – koľkokrát sa daná operácia opakuje v rámci jedného cyklu a „frekvenciu“ alebo „početnosť“ – na koľko vyrobených kusov sa daná operácia rozdelí (napr. výmena debničky raz za 100 ks).

Jednotlivé listy analýz pracovísk sú ako súčasť “Workbooku”, v ktorom sú sumarizované všetky dáta na realizáciu MTM workshopu.

MTM - ANALÝZA SCHAEFFLER GRUPE

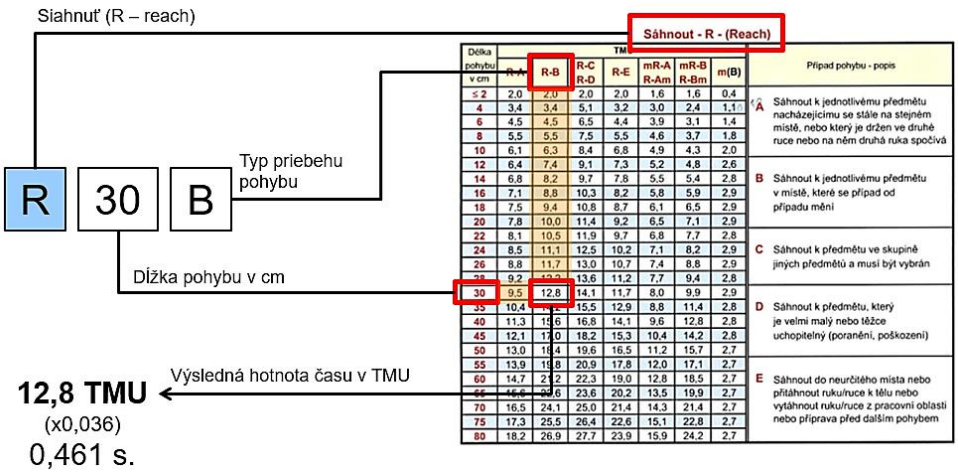
Analyse Status:	Súčasný stav
Názov operácie:	Montáž ARRE na lise GECHTER. Diely : Púzdro + ARRE + Pružina + Matica
Číslo stanice:	1,0
Číslo pracovníka:	1,0 Sume: 138,75 TMU / 4,995 s / 0,08325 min
Začiatok:	siahnutie k púzdru
Koniec:	pustenie spímačov na lise

St Nr	Ľavá ruka	Frekvencia	Počet	Symbol	TMU	Symbol	Počet	Frekvencia	Pravá ruka
01	k puzdru do zasobniku	1,0	1,0	R50C	19,60	[R-C			k puzdru do zasobniku
		1,0	1,0	G4B	9,10		1,0	1,00	
					9,10	G4B	1,0	1,00	
	puzdro do zorneho pola			M-B]	11,80	M24B	1,0	1,00	puzdro do zorneho pola
	zrakova kontrola				7,30	EF	1,0	1,00	zrakova kontrola
				M-C]	7,90	M10C	1,0	1,00	do naradia
				G2]		[G2			
	umiestnit do naradia			P1SE	5,60	P1SE	1,0	1,00	umiestnit do naradia
				RL1	2,00	RL1	1,0	1,00	
	pre ARRE do zasobniku	1,0	1,0	R26C	13,00	R-C			pre ARRE do zasobniku
		1,0	1,0	G4B	9,10				
					9,10	G4B	1,0	1,00	
	do naradia			M30C	14,10	M-C	1,0	1,00	do naradia
				G2]		[G2	1,0	1,00	
	umiestnit do naradia			P1SE	5,60	P1SE	1,0	1,00	umiestnit do naradia
				RL1	2,00	RL1	1,0	1,00	
	pre pruzinku do zasob.			R-C	13,00	R26C	1,0	1,00	pre pruzinku do zasobniku
		1,0	1,0	G4B	9,10				
					9,10	G4B	1,0	1,00	
	do naradia			M-C]	13,70	M26C	1,0	1,00	do naradia
				G2]		[G2	1,0	1,00	
				RL1	2,00	RL1	1,0	1,00	
	pre maticu do zasobniku	1,0	1,0	R35C	15,50	[R-C	1,0	1,00	pre maticu do zasobniku
	na spinac			R30A	9,50	R30A	1,0	1,00	na spinac
				G5	0,00	G5	1,0	1,00	
	stlacit snimac			M2A	2,00	M2A	1,0	1,00	stlacit snimac
				-	55,60	PT			PT otočného stola = 2s = 55,6TMU
				RL2	0,00	RL2	1,0	1,00	
				Summe:	138,8	TMU			
					4,995	s			
					0,0833	min			

Obr. 9.6. MTM analýza (Schaeffler Skalica)

9.1.4 Princíp MTM kódovania

Na to, aby bolo možné pochopiť prácu s dátovou kartou a potom s MTM analýzami, v nasledujúcej časti štúdie bude uvedený príklad ako vplývajú jednotlivé ovplyvňujúce veličiny pohybov na tvorbu skladby kódu. Výstupom kódu (Obr. 9.7) bude časová hodnota pohybu v TMU jednotkách s prepočtom na sekundy podľa Tab. 9.2.



Délka pohybu v cm	R-A	R-B	R-C R-D	R-E	mR-A R-Am	mR-B R-Bm	m(B)
≤ 2	2,0	2,0	2,0	2,0	1,6	1,6	0,4
4	3,4	3,4	5,1	3,2	3,0	2,4	1,1
6	4,5	4,5	6,5	4,4	3,9	3,1	1,4
8	5,5	5,5	7,5	5,5	4,6	3,7	1,8
10	6,1	6,3	8,4	6,8	4,9	4,3	2,0
12	6,4	7,4	9,1	7,3	5,2	4,8	2,6
14	6,8	8,2	9,7	7,8	5,5	5,4	2,8
16	7,1	8,8	10,3	8,2	5,8	5,9	2,9
18	7,5	9,4	10,8	8,7	6,1	6,5	2,9
20	7,8	10,0	11,4	9,2	6,5	7,1	2,9
22	8,1	10,5	11,9	9,7	6,8	7,7	2,8
24	8,5	11,1	12,5	10,2	7,1	8,2	2,9
26	8,8	11,7	13,0	10,7	7,4	8,8	2,9
[illegible]	9,2	[illegible]	13,6	11,2	7,7	9,4	2,8
30	9,5	12,8	14,1	11,7	8,0	9,9	2,9
35	10,4	[illegible]	15,5	12,9	8,8	11,4	2,8
40	11,3	15,6	16,8	14,1	9,6	12,8	2,8
45	12,1	17,0	18,2	15,3	10,4	14,2	2,8
50	13,0	18,4	19,6	16,5	11,2	15,7	2,7
55	13,9	19,8	20,9	17,8	12,0	17,1	2,7
60	14,7	21,2	22,3	19,0	12,8	18,5	2,7
65	15,6	22,6	23,6	20,2	13,5	19,9	2,7
70	16,5	24,1	25,0	21,4	14,3	21,4	2,7
75	17,3	25,5	26,4	22,6	15,1	22,8	2,7
80	18,2	26,9	27,7	23,9	15,9	24,2	2,7

	Případ pohybu - popis
A	Sáhnout k jednotlivému předmětu nacházejícímu se stále na stejném místě, nebo který je držen ve druhé ruce nebo na něm druhá ruka spočívá
B	Sáhnout k jednotlivému předmětu v místě, které se případ od případu mění
C	Sáhnout k předmětu ve skupině jiných předmětů a musí být vybrán
D	Sáhnout k předmětu, který je velmi malý nebo těžce uchopitelný (poranění, poškození)
E	Sáhnout do neurčitého místa nebo přitáhnout ruku/ruce k tělu nebo vytáhnout ruku/ruce z pracovní oblasti nebo příprava před dalším pohybem

Obr. 9.7. Kódovanie MTM

9.1.5 Princípy optimalizácie

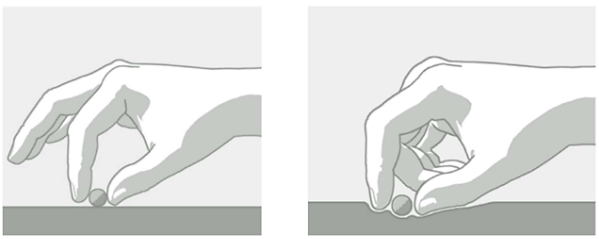
Základom samotnej MTM optimalizácie sú napr.:

1. Zníženie „*potreby kontroly*“ jednotlivých pohybov:
   - Siahnuť na stále miesto – zmena z R-B na R-A (predmetom určiť presné miesto).
   - Brať komponenty nie zo zamiešaných, ale z jednotlivých (triedených) – zmena z R-C na R-A (namiesto z násypníkov privádzať diely z vibračných zásobníkov polohované a na presné miesto).
   - Premiestňovať na dorazy namiesto na približné miesto – zmena z M-B na M-A, z M-C + P1SE na M-A.
   - Umiestňovať diely do náradia s väčšou vôľou – zmena z M-C + P1SE na M-C (doplniť prípadne zväčšiť nábehové hrany a zrazenia).
2. Skrátenie pohybov:
   - Priblížiť prívod komponentov čo najbližšie k procesu – princíp „Proces + 100“.
   - Zmeniť náradie na skrátenie pohybov.
   - Zúžiť zorné pole – zníženie ET.
   - Priblížiť obsluhované stroje (layout) – skrátenie chôdze W-P, úkrokov SS-C.

3. Ergonomická úprava pracoviska:
   - Eliminovať zbytočné zmeny polohy tela – sadanie si SIT a STD, zohýbanie sa B a S, kľakanie si KOK a KBK, …
   - Znížiť počet zbytočných pohybov – napr. prehmaty do pracovnej pozície G2, prehmaty medzi rukami G3 a pod. na elimináciu možnosti vzniku karpálnych tunelov.
4. Zmena procesu výroby:
   - Eliminovať neproduktívne vzhľadové kontroly pri zachovaní kvality – ET, EF.
   - Zmeniť typ balenia produkcie.
5. Prerozdelenie prac. činností (vyváženie zaťaženia) medzi pracovníkmi:
   - Zmeniť rozhranie v linke s viacerými strojmi, pracoviskami.

Príklady optimalizácie sú uvedené na Obr. 9.8 až Obr. 9.13 a príklady optimalizácie z praxe sú uvedené na Obr. 9.14 až Obr. 9.16.

Uchopenie malých dielov (Obr. 9.8) (penová podložka).



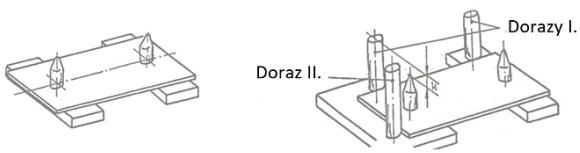
TMU	kód
3,5	G1B
3,5	

TMU	kód
2,0	G1A
2,0	

Úspora času: 1,5 TMU = 43%

Obr. 9.8. Optimalizácia – uchopovanie

Umiestnenie dielu na presné kolíky (Obr. 9.9) (použitie dorazov).



kód	TMU	kód	Popis
M30C	15,1	[M-B	Presun dielu na pin 1
P1SD	11,2		
	7,6	ET20/40	Presun pohľadu
	2,0	M2C	Presun dielu na pin 2
	11,2	P1SD	Nevidí na pin
	47,1		

kód	TMU	kód	Popis
	12,7	M30A	Presun dielu na dorazy 1
	3,1	M4A	Presun dielu na doraz 2
	3,1	M4A	Presun dielu dole
	18,9		

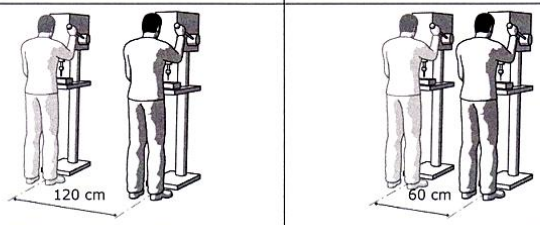
Úspora času: 28,2 TMU = 60%

Obr. 9.9. Optimalizácia – umiestňovanie

Optimalizácia vzdialenosti medzi pracoviskami (Obr. 9.10).

Pre **úkrok stranou** platia rovnaké pokyny ako pri **chôdzi** a **otočení tela**. Vzdialenosť medzi strojmi je väčšia.

Vzdialenosť medzi strojmi je redukovaná.



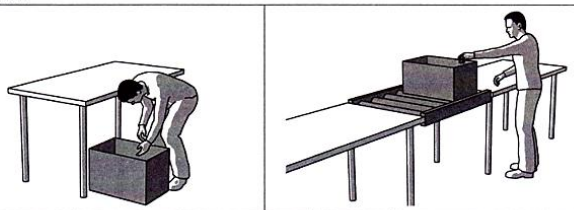
TMU	Kód	PxČ	Popis	TMU	Kód	PxČ	Popis
136,4	**SS 30 C2**	4	k inému stroju	68,2	**SS 30 C2**	2	k inému stroju
136,4				68,2			

Úspora času: 68,2 TMU = 50%

Obr. 9.10. Optimalizácia – vzdialenosť medzi pracoviskami

Optimalizácia pozície dielov aplikáciou ergonómie (Obr. 9.11).

Pre zabránenie **zohnutia** sa používa valčekový dopravník (výška 80cm) pre dopravenie dielov na ďalšie pracovisko.



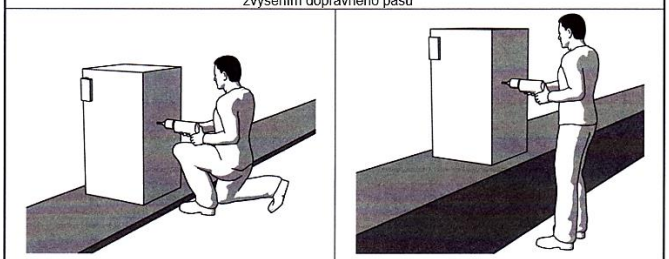
TMU	Kód	Popis	TMU	Kód	Popis
29,0	**S**		12,8	**R 30 B**	
4,3	**mR 10 B**	zvyšná dráha	0,0	**G 5**	
2,0	**G 1 A**		13,3	**M 30 B**	posunúť nádobu na dopravník
4,3	**M 10 Bm**	vybrať	0,0	**RL 2**	
31,9	**AS**				
75,0	**W 5 P**				
29,0	**S**				
4,3	**mM 10 B**	odložiť			
2,0	**RL 1**				
31,9	**AS**				
231,7			26,1		

Úspora času: 205,6 TMU = 89%

Obr. 9.11. Optimalizácia – pozícia dielov (ergonómia)

Optimalizácia pozície pracovného miesta aplikáciou ergonómie (Obr. 9.12).

Pri montáži domáceho spotrebiča sa dosiahne pracovná pozícia tela vo vzpriamenom postoji zvýšením dopravného pásu



TMU	Kód	Popis	TMU	Kód	Popis
29,0	**KOK**		15,1	**M 30 C**	nasadiť skrutkovač
5,4	**mM 10 C**	nasadiť skrutkovač		.	
	.			.	
	.			.	
4,3	**M 10 Bm**			.	
31,9	**AKOK**				
4,3	**mM 10 B**	vytiahnuť skrutkovač	13,3	**M 30 B**	vytiahnuť skrutkovač
74,9			28,4		

Úspora času: 46,5 TMU = 62%

Obr. 9.12. Optimalizácia – pozícia pracovného miesta (ergonómia)

Optimalizácia pozície dielov aplikáciou ergonómie (Obr. 9.13).

Pre zavesenie montovaných dielov na dopravný vozík musí pracovník pri každom dieli vstať

Pomocou konštrukčnej zmeny na dopravnom vozíku je možné diely zavesiť bez vstávania

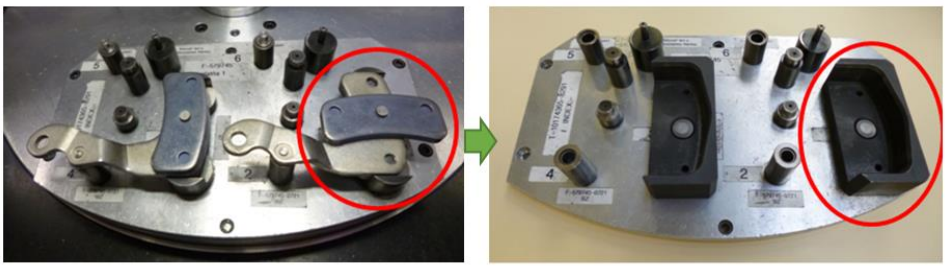
TMU	Kód	Popis	TMU	Kód	Popis
43,4	**STD**		21,8	**M 50 C**	k háku
18,6	**TBC 1**			.	
5,4	**mM 10 C**	k háku		.	
	.			.	
	.			.	
18,6	**TBC 1**			.	
34,7	**SIT**			.	
6,4	**mR 10 C**	k dielu	19,6	**R 50 C**	k dielu
127,1			41,4		

Úspora času: 85,7 TMU = 67%

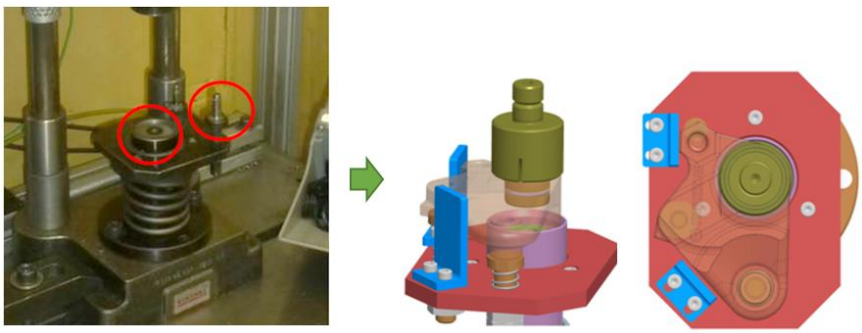
Obr. 9.13. Optimalizácia – pozícia dielov (ergonómia)

Príklady optimalizácie z konkrétnej praxe, firmy Schaeffler, spol. s r. o., Skalica, sú napr.:

1. Použitie dorazov znižuje potrebu kontroly zrakom pri polohovaní dielu do náradia/nástroja (Obr. 9.14 a Obr. 9.15). Diel je možné polohovať na jednoduché alebo tvarované dorazy s nábehom (zrazená hrana), ktoré diel nasmerujú do presnej polohy.



Obr. 9.14. Optimalizácia – zmena umiestnenia dielu v náradí nitovačky na dorazy (Schaeffler Skalica)



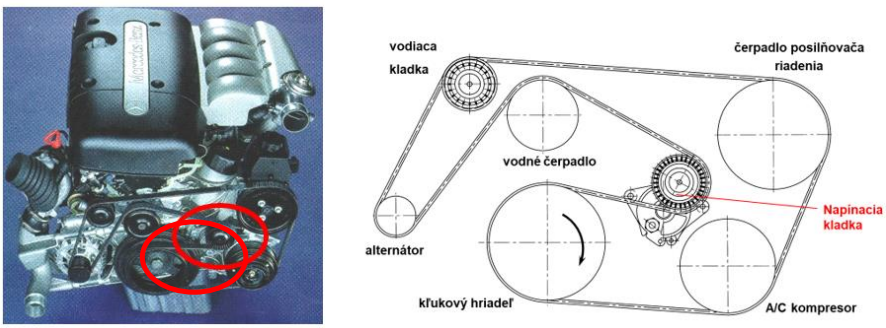
Obr. 9.15. Optimalizácia – zmena umiestnenia dielu v náradí lisu na dorazy (Schaeffler Skalica)

2. Dorazy (Obr. 9.16) znižujú/skracujú čas potrebný na presné „doumiestnenie“ predmetu do pracovnej pozície až o 60 %.

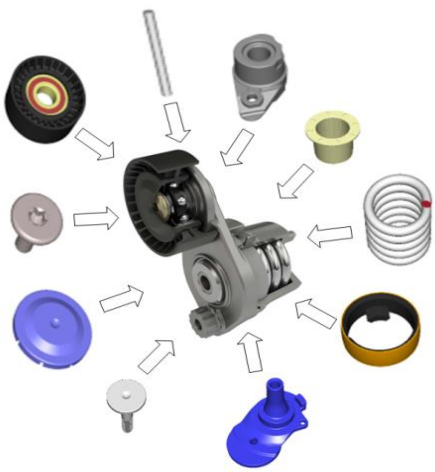
Obr. 9.16. Optimalizácia – páskovanie krabice, presná pozícia na dorazy (Schaeffler Skalica)

9.2 Opis produktu

Ako príklad praktického nasadenia MTM optimalizácie vo výrobe bude uvedená analýza montáže napínacej kladky rozvodového remeňa, používanej v spaľovacích motoroch (Obr. 9.17). Napínacia kladka rozvodového remeňa (Obr. 9.18) slúži na napnutie a vedenie remeňa, tlmenie vibrácií a zníženie dynamických nárazových síl.



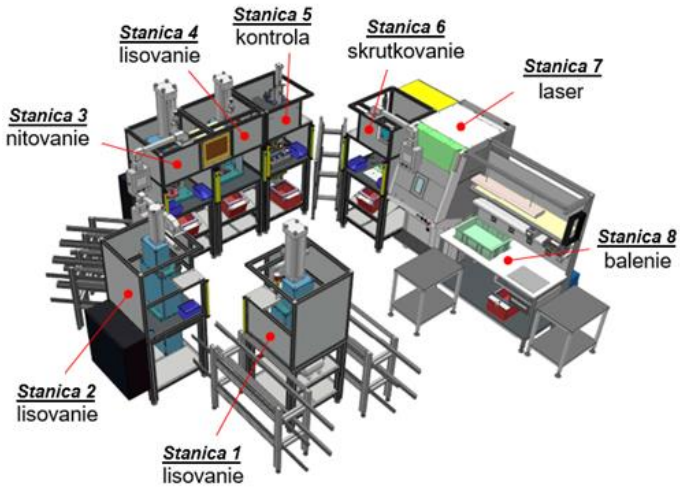
Obr. 9.17. Spaľovací motor – napínacia kladka rozvodového remeňa



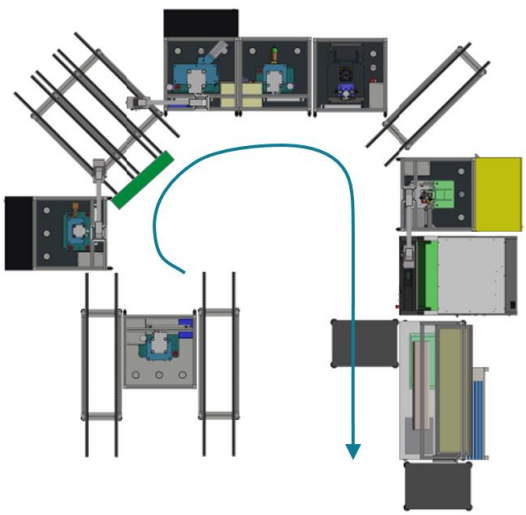
Obr. 9.18. Napínacia kladka rozvodového remeňa

9.3 Opis pracoviska

Montážne pracovisko (Obr. 9.19 a Obr. 9.20) napínacej kladky sa skladá z jednotlivých strojov (staníc) – lisy, nitovačka, kontrolná stanica, skrutkovačka, zariadenie na značenie laserom a stôl balenia. Na prísun dielov k jednotlivým strojom sú medzi stanicami nainštalované valčekové dopravníky na plastové prípadne kartónové debničky.



Obr. 9.19. Dispozičný plán (layout) pracoviska 3D (Schaeffler Skalica)



Obr. 9.20. Dispozičný plán (layout) pracoviska 2D (Schaeffler Skalica)

9.4 Optimalizácia práce podľa MTM

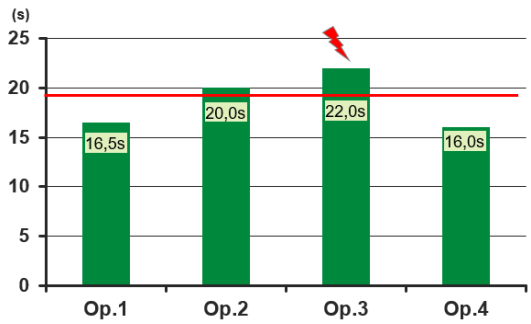
Pre každú pracovnú stanicu ako aj celú linku je potrebné zobrať do úvahy faktory, ktoré možno v rámci MTM optimalizácie zmeniť a zlepšiť podľa bodov, uvedených v kap. 9.5:

- Prívod vstupného materiálu – debničky, násypníky, vibračné zásobníky a pod.
- Spôsob zásobovania materiálom – pracovník v linke, mikrologista mimo linky.
- Spôsob odvozu hotovej produkcie.
- Procesné časy strojov a zariadení – možnosť využitia práce v prekrytom čase.

- Dispozičný plán (layout) pracoviska – skrátenie presunov pracovníkov (chodenie, úkroky, pozícia linky voči zásobovacím cestám a pod.).
- Pracovné (ergonomické) podmienky – výška pracoviska a vstupného materiálu, osvetlenie, hluk, vetranie, rotácia (výmena) pracovníkov na pozíciách počas pracovnej zmeny.
- Automatizácia a robotizácia činností.
- Bezpečnosť práce – svetelné závory, krytovanie strojov.

9.4.1 Optimalizácia montážnej linky

Pre názornosť sa nasledujúca časť štúdie bude venovať pracovnému rozhraniu montážnej linky medzi stanicou 2 a stanicou 3 (Obr. 9.23 a Obr. 9.24). Bude sa vychádzať z AWD diagramu vyťaženia pôvodného stavu Obr. 9.21, kde možno vidieť nevyváženosť práce jednotlivých operátorov Op.1 až Op.4.



Obr. 9.21. AWD diagram montážnej linky

Požadovaný cyklový čas *Ct* pre montáž napínacej kladky a dodanie zákazníkovi je *Ct* = 0,316 min. = 19 sek. Takt linky určuje operátor s najdlhším časom, t. j. operátor č. 3 (Op.3), ktorý má vyťaženie až 22 sekúnd a tvorí tzv. „Úzke miesto“ (angl. Bottleneck, nem. Engpass). Existujú dve možnosti ako požadovaný *Ct* dosiahnuť, a to:

1. Optimalizovať prácu operátorov s vyšším ako požadovaným taktom – napr. zmenou dosahov, zmenou procesných časov strojov, prácou v prekrytom čase stroja a pod.
2. Prerozdeliť činnosti rovnomerne medzi všetkých operátorov – napr. posunutím pracovného rozhrania, tzv. „Nivelizácia“.

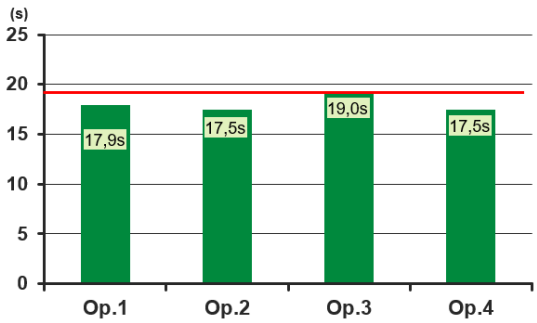
Pre predložený príklad sa aplikuje 2. možnosť, t. j. prerozdelenie pracovných činností a čiastočne prebehne optimalizácia samotného „handling“ (manuálna činnosť) priblížením vstupných komponentov k procesom.

To znamená, že operátor č.1 neskončí operáciou 1.5, ale bude vykonávať aj operácie 2.1 až 2.4 od operátora č. 2., t. j. nevyloží medziprodukt zo Stanice 2 na valčekovú dráhu, ale na tento medziprodukt pridá ďalší plastový diel (operácia 1.6) a až potom diel odloží na plochu pred pneumatický lis. Potom ešte naloží diely (operácia 1.7 + 1.8) do pneumatického lisu, tento lis „len“ spustí a vracia sa na začiatok svojho cyklu k Stanici 1. (Obr. 9.25 a Obr. 9.26). Operátor č. 2 zoberie diel z plochy a naloží do Stanice 3 (operácia 2.1), naloží pružinu (operácia 2.2) a zlisovaný diel z pneumatického lisu (operácia 2.3). Tým sa časť

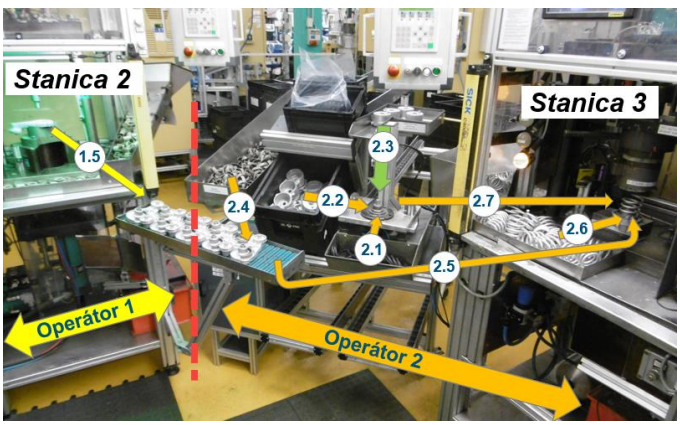
činností presunie z Operátora č. 2 na Operátora č.1 a vyrovná sa ich zaťaženie zo 16,5 sekúnd (20 sekúnd) na 17,9 sekundy (17,5 sekundy).

Podobným spôsobom možno presunúť činnosti z Operátora č. 3 na Operátora č. 4, konkrétne vybratie produktu zo Stanice 6 (skrutkovanie), ďalej obsluhu Stanice 7 (laserové značenie) a nakoniec činnosti balenia, ktoré vykonával pôvodne.

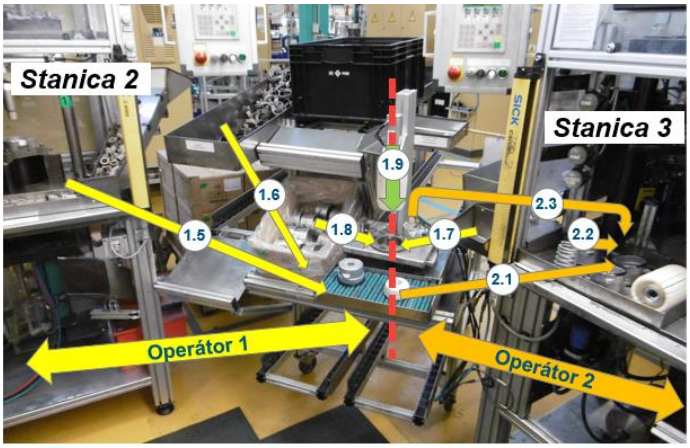
Týmto sa vyrovnali cyklové časy všetkých operátorov v linke podľa Obr. 9.22, čím sa upravil požadovaný cyklový čas na 19 sekúnd.



Obr. 9.22. AWD diagram montážnej linky po optimalizácii



Obr. 9.23. Postup montáže pred optimalizáciou (Schaeffler Skalica)



Obr. 9.24. Postup montáže po optimalizácii (Schaeffler Skalica)

ist analýza

MTM - ANALYSE SCHAEFFLER

Analyse Status: IST - St.1+St.2 worker: 1

Begin: siahni na zalisovaný diel v St.1 OEE: 100%

Ende: odlož diel zo St.2

Message: Parts Amount : 1

Sume Tz **457,77 TMU / 16,48 s / 0,5928 min.**

Operácie

Pohyby

Výpočty

St Nr	Linke Hand	Häufigkeit	Anzahl	Symbol	TMU	Symbol	Anzahl	Häufigkeit	Rechte Hand
1.5					68,2	SS-C2	2,0	1,0	presun k St.2
						IR-B			na diel v náradí St.2
					10,0	R20B	1,0	1,0	
					2,0	G1A	1,0	1,0	na diel v náradí St.2
					19,2	M55B	1,0	1,0	diel na valček. dopravník k lisu
					2,0	RL1	1,0	1,0	
1.6					18,6	TBC1	1,0	1,0	
					30,0	W-P	2,0	1,0	chôdza k St.1

Operator1 | Operator2 | Operator3 | Operator4 | Operator5 | Operator6 | Operator7 | O

Obr. 9.25. MTM analýza Operátor č.1 – pred optimalizáciou (Schaeffler Skalica)

soll analýza

MTM - ANALYSE SCHAEFFLER

Analyse Status: SOLL - St.1 + St.2 + lis worker: 1

Begin: siahni na zalisovaný diel v St.1 OEE: 100%

Ende: spusti lis

Message: Parts Amount : 1

Sume Tz 496,94 TMU / 17,89 s / 0,2982 min.

Diferent Tz 39,17 TMU / 1,41 s / 0,0235 min.

Operácie

Pohyby

Výpočty

St Nr	Linke Hand	Häufigkeit	Anzahl	Symbol	TMU	Symbol	Anzahl	Häufigkeit	Rechte Hand
1.6					18,6	TBC1	1,0	1,0	
	pre plast. REIB			R-C]	15,0	W-P	1,0	1,0	chôdza k lisu
				G1A]					
	REIB na diel v PR	1,0	1,0	M25C	13,7				
		1,0	1,0	P1NSE	10,4				
	prehmat			G2]					
		1,0	1,0	RL1	2,0				
					13,3	M30B	1,0	1,0	diel na plochu lisu
					2,0	RL1	1,0	1,0	
1.7					15,5	R35C	1,0	1,0	pre tesnenie
					12,9	G4C	1,0	1,0	
					15,1	M30C	1,0	1,0	tesnenie do lisu
						[G2			
					11,2	P1SD	1,0	1,0	ohybký diel
1.8	pre hliníkový GEH			R-B]	2,0	RL1	1,0	1,0	
		1,0	1,0	R24B	11,1				
		1,0	1,0	G1A	2,0				
	GEH na tesnenie v lise	1,0	1,0	M35C	16,8				
		1,0	1,0	P1SSE	9,1				
1.9		1,0	1,0	RL1	2,0	[R-A			na spínač lisu
					6,8	R14A	1,0	1,0	
					0,0	G5	1,0	1,0	
					2,0	M2A	1,0	1,0	spustenie lisu
					2,0	M2B	1,0	1,0	
					0,0	RL2	1,0	1,0	
1.10					18,6	TBC1	1,0	1,0	
					30,0	W-P	2,0	1,0	chôdza k St.1

Operator9 | Operator10 | MM-analýza | 3.1.List_opatreni | 3.2.List činností | 3.3.Analý

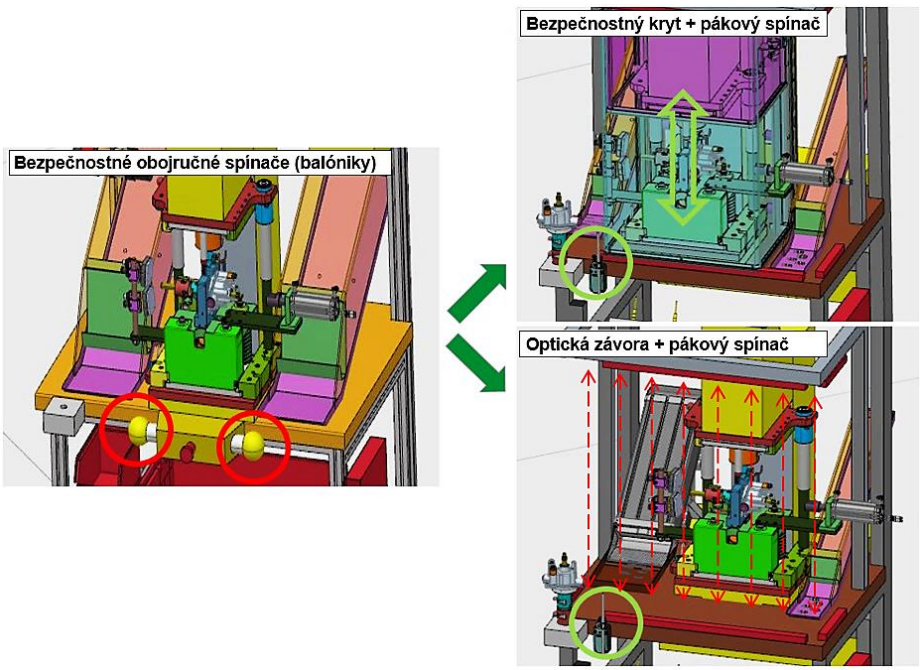
Obr. 9.26. MTM analýza Operátor č.1 – po optimalizácii (Schaeffler Skalica)

9.5 Optimalizácia obslužnosti

Ďalšou z možností využitia MTM metodiky je znižovanie „obslužnosti“ t. j. počtu pracovníkov v procese výroby. Tento postup je ale priamo závislý od ekonomiky procesu a jednotkových nákladoch – stroj verzus človek. Preto musia byť náklady prepočítané v pomere cyklového času a počtu operátorov vo výrobe. Ak sú náklady na operátora vyššie

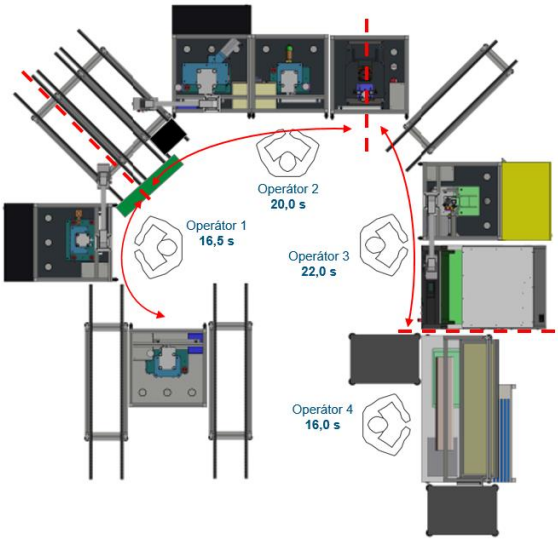
ako náklady na prevádzku strojov, vtedy je pre majiteľa procesu ekonomicky výhodnejšia redukcia operátorov pri nevyhnutnom navýšení cyklového času výroby.

Ak pôjde o zníženie obslužnosti linky na montáž napínacej kladky, je nutné sa viac zamerať na priamu optimalizáciu pracovísk na zníženie počtu pohybov a ich zjednodušenie. Je to preto, že ten istý objem práce je potrebné rozdeliť na menej operátorov, čo spôsobí zvýšenie cyklového času. Primárne sa využije práca v prekrytom čase strojov *Pt* (Process Time). V tomto prípade je potrebná úprava strojov na samočinnú prevádzku, keď operátor nemusí čakať na stroj počas *Pt*. Príklad použitia zmeny spúšťania stroja je uvedený na Obr. 9.27. Tu je možná úprava spúšťania stroja z obojručného držania spínačov na použitie jedného spínača spolu s bezpečnostným prvkom. Ako bezpečnostný prvok možno použiť napr. krytovanie pracovného priestoru pohyblivým krytom alebo zabezpečenie optickými závorami. Je to podmienka BOZP, aby operátor nedal ruky do nebezpečného priestoru počas procesu.

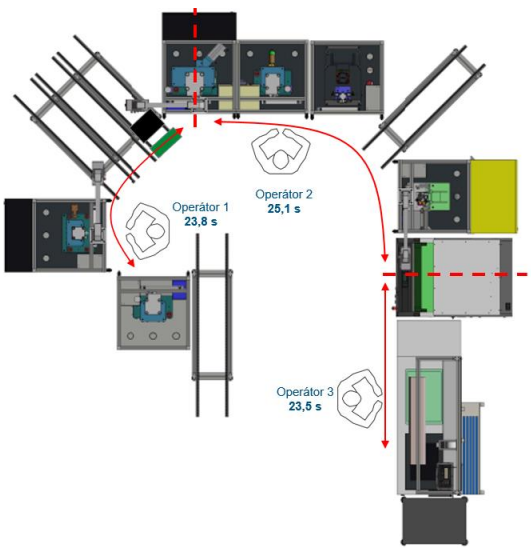


Obr. 9.27. Zmena typu spúšťania zabezpečenia strojov

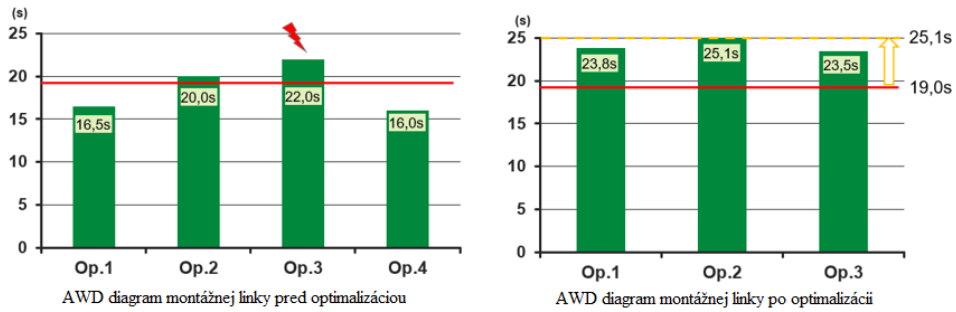
Ostatný postup prerozdelenia činností je obdobný ako je uvedené v kap. 9.4, s tým rozdielom, že činnosti budú rozdelené už len na 3 operátorov (Obr. 9.28 a Obr. 9.29).



Obr. 9.28. Postup montáže pred optimalizáciou (Schaeffler Skalica)



Obr. 9.29. Postup montáže po optimalizácii (Schaeffler Skalica)



Obr. 9.30. AWD diagram – zmena obslužnosti

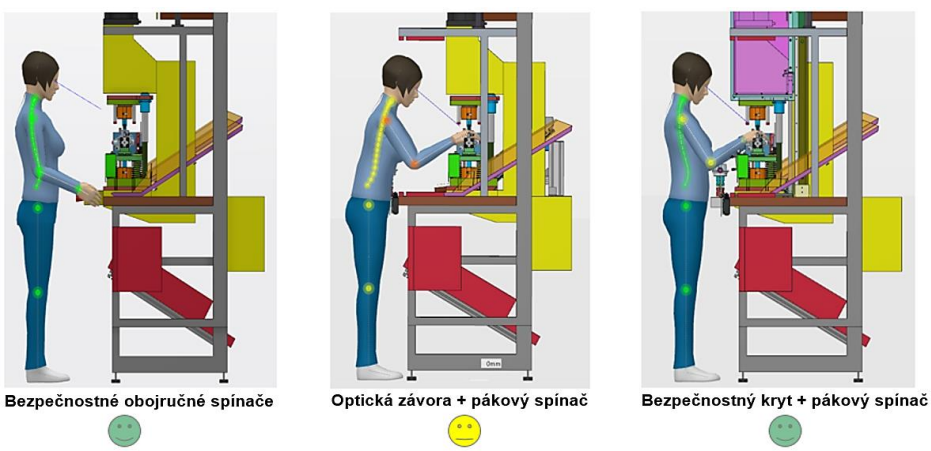
Výsledkom je zmenené pracovné rozhranie operátorov a k tomu optimalizovaný výsledný cyklový čas 25,1 sekundy (Obr. 9.30)

9.6 Optimalizácia a ergonómia

Pri každej MTM optimalizácii je nevyhnutné zabezpečiť minimálne dodržanie alebo zlepšenie ergonomických podmienok na pracovisku. Preto je vhodné pri optimalizáciách mať základné znalosti ergonómie prípadne pri návrhoch spolupracovať s ergonómom (Obr. 9.31).

Pri jednotlivých variantoch návrhu je potrebné analyzovať, aký má konkrétna zmena pracovných činností vplyv na:

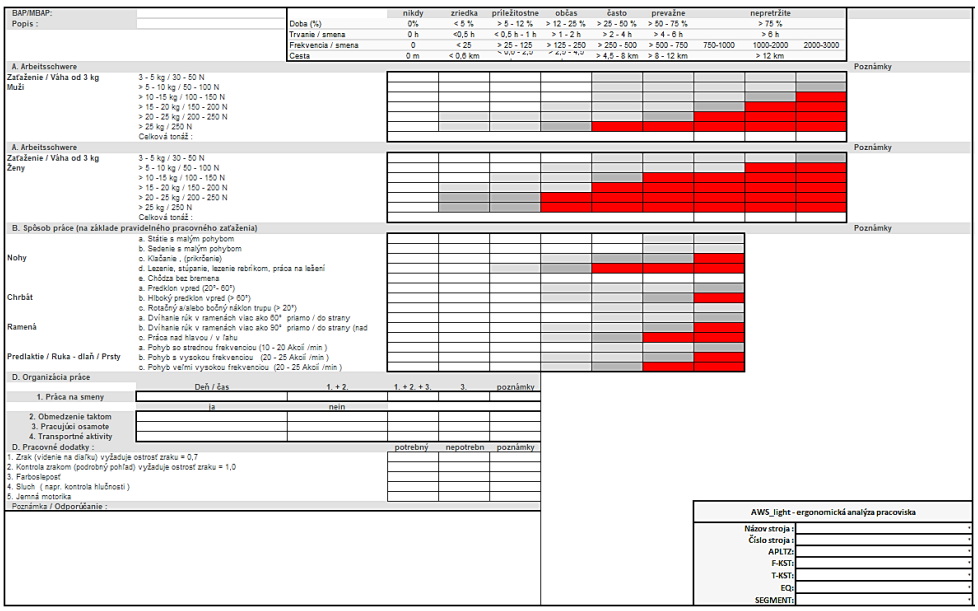
- držanie tela – predklon, bočný úklon, záklon hlavy a pod.,
- prácu s bremenom – predklon s ťažkým bremenom,
- dosahové zóny,
- možnosť vzniku karpálnych tunelov – zníženie zaťaženia určitých svalov.



Obr. 9.31. Ergonómia – príklad zmeny typu spúšťania stroja

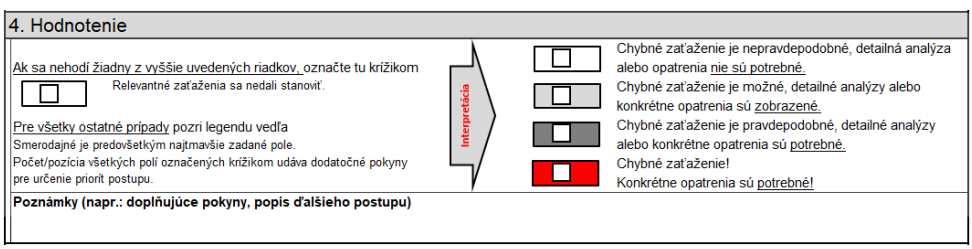
9.6.1 Ergonomické hodnotenie pracoviska

Jedným zo spôsobov ako určiť ergonomické zaťaženie na pracovisku je vypracovanie AWS (Assembly Worksheet) light analýzy na Obr. 9.32, kde sa hodnotí pracovná záťaž v súvislosti s frekvenciou pohybov.



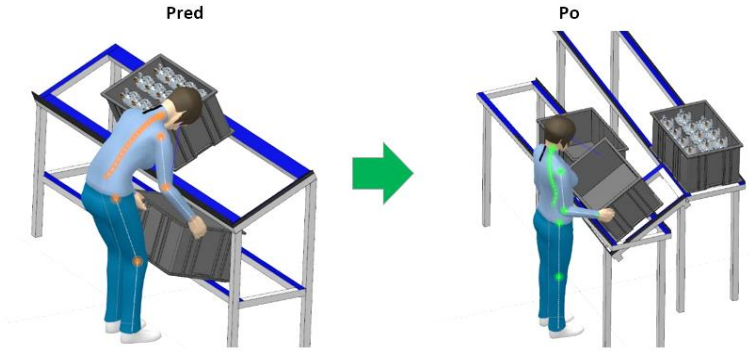
Obr. 9.32. AWS light analýza

Vyhodnotenie ergonomickej analýzy s potrebou realizácie opatrení je uvedené na Obr. 9.33.



Obr. 9.33. Vyhodnotenie AWS light analýzy

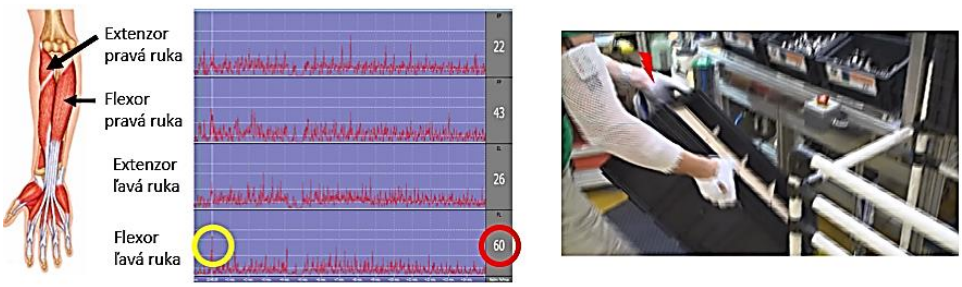
Činnosti z AWS analýzy zaradené v „tmavo-sivom“ a „červenom“ type záťaže je potrebné technickými alebo organizačnými opatreniami aj v rámci MTM zlepšovať. Príklad technického opatrenia je na Obr. 9.34. Medzi organizačné opatrenia patrí napr. tzv. „rotácia“ operátorov v linke, keď operátori po 1 až 2 hodinových cykloch menia jednotlivé pozície v linke. Týmto sa zabezpečí striedanie typov pracovného zaťaženia a dokonca aj psychicky „nie-monotónnu“ prácu počas celej pracovnej smeny.



Obr. 9.34. Príklad ergonomického opatrenia

9.6.2 Karpálne tunely

Hlavne pri montážnych prácach a v procesoch, kde sa vyskytuje enormná práca s rukami je nutné pri analýzach a MTM optimalizácii uvažovať aj s problémom vzniku „karpálnych tunelov“. Tento jav vzniká pri nadmernej záťaži určitých svalov rúk (Obr. 9.35), následkom čoho vznikajú v oblasti zápästia bolestivé zdravotné problémy, vedúce k práceneschopnosti pracovníkov a v horšom prípade k chorobe z povolania. Predísť týmto problémom možno znížením typu a počtu pohybov rukami a hlavne zápästím.



Obr. 9.35. Identifikácia pohybov – eliminácia vzniku karpálnych tunelov

Záver

V prípadovej štúdii bola uvedená optimalizácia montážnej linky, kde došlo aplikáciou najrozšírenejšej metodiky MTM, založenej na systéme vopred stanovených časov, k analýze a optimalizácii či už výrobného cyklového času, alebo počtu operátorov v linke.

Nutné je ale popri tomto nezabúdať na dodržiavanie a hlavne zlepšovanie pracovných podmienok pracovníkov v rámci ergonómie, pretože ide o ľudskú pracovnú silu, ktorá je v súčasnosti v mnohých prípadoch nenahraditeľná. Aby boli splnené podmienky 100 % normovaného výkonu MTM, je nutné pri optimalizácii zabezpečiť dostatočné zaškolenie a pravidelné preškolenie pracovníkov na nový pracovný postup, ktorý by mal byť neoddeliteľnou súčasťou a výstupom optimalizácie.

Zoznam bibliografických odkazov

MAYNARD, H. B., STEGEMERTEN, G., J. a SCHWAB, J. L. 1948. *Methods Time Measurement*, McGraw-Hill Book Company.

Sdružení MTM pro Českou republiku a Slovenskou republiku. 2009. *MTM-1 Učební podklady*. [online] [cit 2020-08-09] Dostupné na internete: https://www.czechmtm.cz/sluzby.php.

Schaeffler Skalica, spol. s r. o . *Schaeffler MTM Workbook.*

10 APLIKÁCIA METÓDY SMED PRI PRETYPOVANÍ STROJNÉHO ZARIADENIA

JURÍK, L. – RAŠKOVÁ, S. – BABČANOVÁ, D. – HRABLIK CHOVANOVÁ, H.

Úvod

Súčasné podnikateľské prostredie sa vyznačuje turbulentnými zmenami a konkurenčným tlakom. V každom odvetví priemyselnej výroby sa nachádza niekoľko konkurenčných podnikov a potenciálni zákazníci majú možnosť výberu z viacerých dodávateľov, ktorí sú schopní splniť ich individuálne požiadavky (cena, kvalita, množstvo, termín, atď.). Individualizácia výrobkov je charakteristickým znakom výrobných podnikov 21. storočia. Individualizácia výrobkov viedla ku komplexnému plánovaniu a kontrolným systémom, ktoré sťažujú hromadnú výrobu produktov (Bhamu a Singh Sangwan, 2014). Keďže primárnym cieľom každého podniku je dosahovanie zisku a konkurenčné tlaky a individuálne požiadavky zákazníkov nútia podniky znižovať náklady, jedinou možnosťou podnikov je venovať pozornosť tým aktivitám a procesom, ktoré sa dajú zefektívniť odstránením plytvania.

Uvedené fakty podnietili vznik a využívanie konceptu štíhla výroba, ktorého prepracované nástroje napomáhajú znížiť plytvanie a pri čo najmenších nákladoch uspokojiť potreby zákazníka.

Podmienkou úspešnosti priemyselných podnikov je orientácia na zákazníka, na jeho individuálne požiadavky. Pre podniky to znamená vyrábať stále viac a viac odlišných výrobkov, čo znamená mimoriadny nárast variability výroby pri dosahovaní vysokej kvality, spoľahlivosti, rýchlosti dodávok, a to pri nízkych nákladoch, ktoré sú dosahované pri klasickej hromadnej výrobe. Variabilita výroby si vyžaduje zvýšený počet pretypovaní, čo predstavuje plytvanie a zvyšuje priebežný čas výroby. Pretypovanie sa vo výraznej miere podieľa na prestojoch. Trendy ako individualizácia požiadaviek, a neustála snaha o včasné plnenie požiadaviek a zachovanie plynulosti výrobného procesu pri nízkych nákladoch smeruje k eliminácii prestojov. Problém súvisiaci s procesom pretypovania možno riešiť dvoma spôsobmi. Znížením počtu pretypovaní (čím znížime variabilitu výroby a dosiahneme neuspokojenie individuálnych požiadaviek zákazníka) alebo skrátením času na pretypovanie (so zachovaním variability výroby a schopnosťou uspokojovať širokú škálu individuálnych požiadaviek zákazníkov). Na skrátenie časového trvania procesu pretypovania a odstránenia plytvania v danom procese je využívaná metóda SMED. Názov metódy SMED je skratkou začiatočných písmen slov v anglickom jazyku „Single Minute Exchange of Dies“, čo v preklade znamená „výmena nástrojov do 1 min.

Cieľom štúdie je aplikovať metódu SMED pri pretypovaní vstrekovacieho lisu vo vybranom priemyselnom podniku, čím sa dosiahne skrátenie procesu pretypovania. V prvej časti bude stručne charakterizovaná problematika štíhlej výroby, základné druhy plytvania vo výrobe a proces pretypovania z teoretického hľadiska. V druhej časti bude vysvetlená metóda SMED a kroky potrebné k jej realizácii. Tretia časť demonštruje praktickú aplikáciu v procese pretypovania vstrekovacieho lisu v priemyselnom podniku.

10.1 Pretypovanie strojného zariadenia

Pre súčasný trh je nevyhnutné uspokojovať meniace sa požiadavky zákazníkov. Aby bolo zabezpečené uspokojenie požiadaviek zákazníkov je nevyhnutná flexibilita podnikových procesov, ktorá spočíva vo výrobe malých výrobných dávok. Nastavený systém si vyžaduje

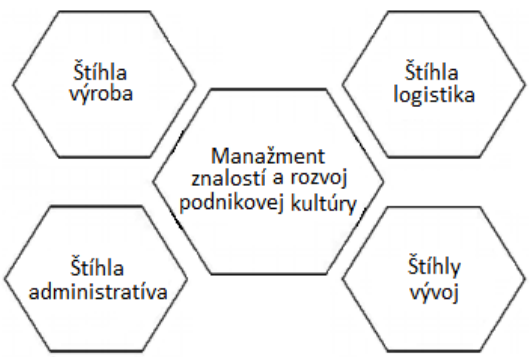
časté zmeny výrobných dávok, preto sú potrebné krátke časy pretypovania strojov, výrobných liniek (Kormanec a kol., 2008).

10.1.1 Štíhla výroba

Pojem „štíhla výroba“ (z angl. Lean production) prvýkrát uviedol Womack v roku 1990 v knihe The Machine that Changed the World (Sayer a Williams, 2011). Avšak pôvod štíhleho riadenia ako ucelenej koncepcie siaha do 50. rokov 20. storočia v Japonsku a je všeobecne pripisovaný podniku Toyota, ktorého výrobný systém je označovaný ako Toyota Production System (TPS). Štíhle riadenie predstavuje v manažérskom vývojovom trende posledný stupeň.

Stručne možno tento manažérsky systém opísať ako výrobu bez všetkého nepotrebného, teda razantné zníženie priestoru, času, chýb i nákladov vo výrobe, pričom ide o zoštíhľovanie riadenia výroby a tým aj o značnú decentralizáciu na nižšie stupne riadenia výroby. Ide o špecifikáciu toho čo vytvára a čo nevytvára hodnotu pre zákazníkov (Košturiak, 2006).

Pri štúdiu štíhleho riadenia sa často uvádzajú dva pojmy, ktorými sú „štíhla výroba“ a „štíhly podnik“. Košturiak a kol. (2006) vysvetľujú, že pokiaľ chcú organizácie zarábať peniaze rýchlejšie a efektívnejšie než ich konkurenti, nemali by pojem štíhlosť obmedziť len na procesy výroby. Skúsenosti z praxe však dokazujú, že väčšina podnikov sa v rámci štíhleho riadenia sústredí najmä na zavádzanie prvkov spomínanej štíhlej výroby. Obr. 10.1 zobrazuje, ako Košturiak a kol. (2006) vizuálne znázorňujú koncepciu štíhleho podniku.



Obr. 10.1. Štíhly podnik (Košturiak, 2006)

Košturiak a kol. (2006) tvrdia, že štíhlosť je dynamický proces zmeny, ktorý je riadený systematickým súborom zásad a osvedčených postupov zameraných na kontinuálne zlepšovanie. Liker (2008) uvádza, že štíhla výroba je filozofia, ktorá pri implementácií skracuje čas od zákazníckej objednávky po dodávku tým, že odstraňuje zdroje plytvania vo výrobnom toku. S týmto názorom sa stotožňuje aj Alukal (2003), ktorý ešte dopĺňa, že štíhlosť pomáha podnikom redukovať náklady, časy cyklov a zbytočné, hodnotu nepridávajúce aktivity, čo vedie ku konkurencieschopnejšiemu a agilnejšiemu podniku.

Jirásek (1998) uvádza: „Lean manufacturing je paradigma resp. spôsob myslenia o výrobe. Je to filozofia, ktorá skracuje priebežný čas eliminácíou plytvania, aby sa dodávali na čas výrobky vysokej kvality pri nízkych nákladoch.“

Štíhle riadenie možno opísať ako manažérsky systém výroby bez všetkého nepotrebného, teda razantné zníženie priestoru, času, chýb i nákladov vo výrobe, pričom ide o zoštíhľovanie riadenia výroby, a tým aj o značnú decentralizáciu na nižšie stupne riadenia výroby. Ide o špecifikáciu toho čo vytvára a čo nevytvára hodnotu pre zákazníkov (Košturiak, 2006).

Kritickým bodom, na ktorý sa štíhla výroba, alebo štíhly podnik zameriava je hodnota. Hodnota môže byť tvorená dvoma spôsobmi, a to:

1. Minimalizáciou alebo eliminácíou plytvania môže podnik znížiť náklady na výrobu.
2. Zavedením ďalších služieb, ktoré pridávajú hodnotu k produktu a ktoré ocení samotný zákazník.

10.1.2 Plytvanie vo výrobe

V súčasnej dobe exponenciálne rastúcej konkurencie, či tlaku na zvyšovanie produktivity a znižovanie nákladov zo strany zákazníkov je dôležité, aby podniky venovali svoju pozornosť akýmkoľvek príležitostiam na identifikáciu a implementáciu zlepšení. Väčšina operátorov, ako aj nižších riadiacich pracovníkov si mnohokrát neuvedomuje ako často, kedy a kde dochádza k plytvaniu pri vykonávaní ich bežných pracovných činností. V podniku prebieha mnoho procesov, ktoré vo všeobecnosti môžeme rozdeliť na pridávajúce alebo nepridávajúce hodnotu produktu. Plytvanie podľa nášho názoru predstavuje všetko, čo spôsobuje zvýšenie finančných nákladov výrobku bez zvýšenia hodnoty pre zákazníka. Zákazník má právo rozhodnúť, čo pre neho je alebo nie je plytvanie, či je ochotný za daný proces zaplatiť, či kúpa daného produktu alebo služby uspokojuje jeho požiadavky (Stevenson, 2008).

V predikovaní a odstraňovaní akéhokoľvek plytvania by mali podniky začať už v prvotných fázach vývoja produktu. Cieľom štíhlych podnikov je plytvanie čo najviac eliminovať už v konečných fázach vývoja produktu. Včasné odhalenie jednotlivých druhov plytvania je časovo aj finančne menej náročné. (Nenadál, 2008).

Plytvaním sa označujú všetky činnosti, všetok materiál alebo prvky, ktoré nepridávajú hodnotu finálnemu výrobku alebo službe (Boledovič, 2017). Zároveň tieto činnosti, alebo prvky môžu cenu produktu alebo služby aj zvyšovať, čo zákazník nie je ochotný akceptovať (Čerkala a Potoczky, 2012). V Japonsku je slovom muda označené plytvanie, teda všetko to, čo využíva zdroje podniku, no nevytvára hodnotu. Taiichi Ohno kategorizoval sedem druhov plytvania, ktoré sú uvedené v Tab. 10.1 (Sutherland a Bennett, 2007; McGee-Abe, 2015).

Tabuľka 10.1. Sedem základných druhov plytvania (Sutherland a Bennett, 2007; McGee-Abe, 2015)

Druhy strát vo výrobe		***Opis***
1.	***Nadprodukcia***	Výroba viac výrobkov, ako je potrebné na okamžité použitie.
2.	***Oneskorenie/čakanie***	Prestoje, čakanie na materiál, stroj, informácie a zdĺhavé rozhodovanie.
3.	***Preprava***	Nadbytočná preprava a manipulácia výrobkov, polovýrobkov a materiálu.
4.	***Pohyb***	Zbytočný pohyb ľudí (chôdza, dosah) nadmerné fyzické zaťaženie.
5.	***Zásoby***	Nadbytočné zásoby materiálu, hotových výrobkov a rozpracovanej výroby.
6.	***Nadmerné spracovanie***	Nadbytočná práca, spotreba materiálu a výrobných prostriedkov
7.	***Chyby***	Akákoľvek výroba, ktorá má za následok prepracovanie alebo tvorbu šrotu.

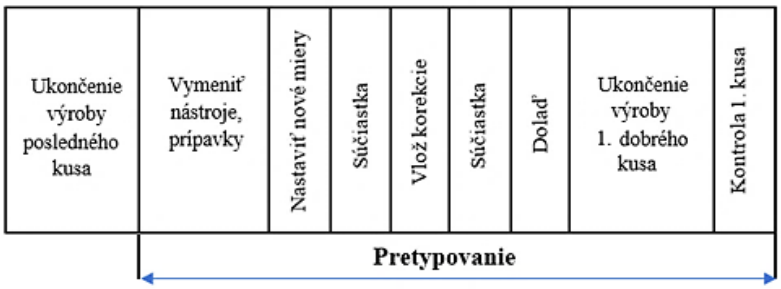
K siedmym základným druhom plytvania je doplnené 8. plytvanie, a to ľudia – nevyužitý potenciál pracovníkov a ich tvorivosti (Červinka, 2013).

10.1.3 Pretypovanie strojného zariadenia

Pri rozbore jednotlivých druhov prestojov stroja, ktoré majú vysoký dopad na jeho dostupnosť/výrobyschopnosť, je čas potrebný na prestavenie jedným z najviac kritických časov. Čas týkajúci sa prestavenia stroja na inú zákazku je čas, keď stroj alebo linka nevyrába. Taktiež môže byť zdrojom problémov pri riadení výroby po malých dávkach. Keď proces prestavenia stroja, čiže pretypovanie, trvá dlhý čas, manažment riadenia výroby môže využiť dva spôsoby, ako s danou problematikou pracovať. Prvým je spájanie príbuzných výrobných dávok do veľkých množstiev tak, aby sa minimalizoval počet pretypovaní strojov. Druhý spôsob, ktorý je vo všeobecnosti lepší ako spájanie dávok, je hľadanie príčin, prečo pretypovanie stroja (linky) trvá tak dlho (Bauer a kol., 2012).

Pojem pretypovania je objasňovaný z troch pohľadov. Prvý, užší pohľad na pretypovanie hovorí o čase, keď sa nachádza stroj medzi dvoma výrobnými dávkami. Druhý, širšie chápaný pohľad je vysvetlený ako čas od posledného kusu prvej výrobnej dávky až po výrobu prvého dobrého kusu ďalšej výrobnej dávky. Tretie vysvetlenie pojmu sa zameriava na rýchlosť a vysvetľuje pretypovanie ako čas od štandardnej rýchlosti prvej výrobnej dávky až po dosiahnutie štandardnej rýchlosti nasledujúcej výrobnej dávky (Bicheno a Holweg, 2016).

Proces pretypovania je vyjadrený časom, ktorý je po dokončení výroby posledného kusa potrebný na demontáž starého náradia/nástrojov, montáž nového náradia/nástrojov, jeho nastavenie a taktiež nastavenie staníc podľa požiadaviek novej zákazky. Čas pretypovania sa počíta do okamihu vyrobenia prvého dobrého kusa novej zákazky (IPA Slovakia, 2017). Grafické znázornenie procesu pretypovania je na Obr. 10.2.



Obr. 10.2. Proces pretypovania (Kormanec a kol., 2008)

Na skracovanie časov pretypovania je nutné identifikovať a analyzovať plytvanie, ktoré predlžuje zmenu výrobných dávok. Medzi základné druhy plytvania v procese pretypovania patrí (APOS, 2015):

- hľadanie,
- chôdza,
- čakanie,
- chýbajúce štandardy,
- nedostatočné plánovanie,
- ciachovanie,
- chýbajúce nástroje.

Proces pretypovania predstavuje prekážku/bariéru plynulého výrobného procesu a spôsobuje plytvanie, na ktorého odstránenie sa používa metóda SMED (Joshi a Naik, 2012).

10.2 Charakteristika metódy SMED

Názov metódy SMED je skratkou slov „Single Minute Exchange of Dies“. Doslovný preklad znamená „výmena nástrojov do 1 min“, resp. „výmena nástrojov do 10 min“. Metóda SMED je metóda skracovania časov pretypovania výrobných zariadení.

Slúži na skrátenie času pretypovania výrobných liniek a strojov, minimalizáciu prestojov, či štandardizáciu a zjednodušenie výmenných operácii pri zmene sortimentu výrobku (Sousa a kol., 2018). Cieľom je zmena z jedného produktu na druhý, v čo najkratšom čase a najefektívnejším spôsobom. Mnoho podnikov si myslí, že metódy na skrátenie času pretypovania vyžadujú investície. V skutočnosti práve nezavedenie systému rýchleho pretypovania spôsobuje podniku zvýšené náklady tvorené prestojmi medzi výrobnými dávkami. Dosiahnutá úspora času umožní podniku vyrobiť produkty rýchlejšie, čím sa zníži aj dodací čas (Birmingham a Jelinek, 2007). Aplikovaním spomínanej metódy SMED sa zlepšuje aj úroveň bezpečnosti a ergonómie v podniku (APOS, 2015).

Metóda SMED pomáha skrátiť čas potrebný od ukončenia výroby posledného kusa predchádzajúceho výrobku, odstránenia náradia a prípravkov, nastavenie nových a skúšobné behy po výrobu prvého dobrého kusu nasledujúceho typu výrobku. Metóda SMED sa používa na tých pracoviskách, ktoré sú pre podnik z hľadiska zachovania plynulosti výroby

úzkymi miestami, pri ktorých prestavenie strojov sa realizuje často a časy na prestavenie predstavujú významné straty pre celý výrobný proces. Celý postup metódy vychádza z dôkladnej analýzy procesu pretypovania, ktorá sa realizuje zvyčajne pozorovaním priamo na pracovisku.

Metóda je založená na 4 základných krokoch (IPA Slovakia, 2017; Boledovič, 2018), a to:

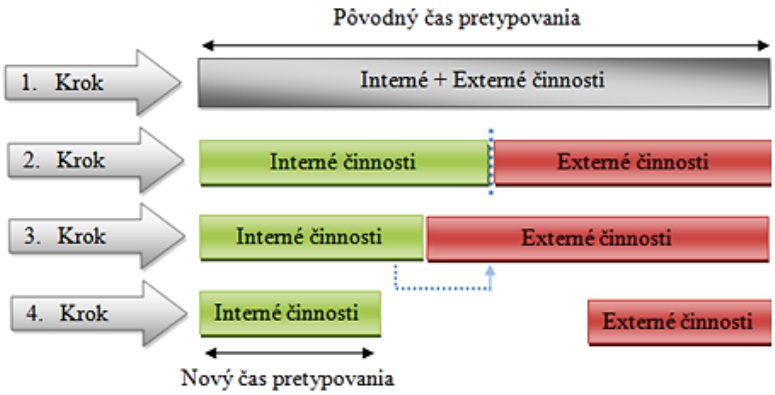
1. Oddeliť interné a externé činností pretypovania.
2. Redukcia interného času pretypovania.
3. Redukcia externého času pretypovania.
4. Redukcia celkového času pretypovania.

Na diferencovanie interných a externých činností sa vychádza z analýzy súčasného stavu, ktorá sa zvyčajne realizuje videoanalýzou (APOS, 2015). V prvom kroku odpovedáme na otázku, či je daná činnosť vykonávaná interne alebo externe (Kormanec a kol., 2008). Interné činnosti možno realizovať až po zastavení chodu zariadenia (APOS, 2015). Čas interných činností je považovaný za prestoj. K interným činnostiam zaraďujeme činnosti ako výmena skľučovadla či demontáž prípravku z obrábacieho stroja (Kormanec a kol., 2008). Naopak externé činnosti možno realizovať aj počas produkcie výrobného zariadenia, pred aj po samotnom pretypovaní výrobného zariadenia (APOS, 2015). Činnosti sú vykonávané mimo stroja a patria sem operácie ako príprava náradia alebo prinesenie formy zo skladu.

Ak je činnosť interná, musíme si zodpovedať na otázku, aké opatrenia sú potrebné na transformáciu medzi externé činnosti. Pokiaľ nie je možný presun činnosti, je potrebné hľadať opatrenia, ktorými docielime skrátenie doby trvania (Kormanec a kol., 2008). Zlepšením organizácie práce dokážu podniky skrátiť čas pretypovania. Medzi typické chyby nesprávnej organizácie práce zaraďujeme prípravu náradia, pracovných pomôcok, údržbu nástrojov, ale aj transportné operácie realizované až po zastavení chodu stroja (APOS, 2015).

Tretí krok sa zameriava na opatrenia, ktoré dokážu znížiť čas externých činností (Kormanec a kol., 2008). Redukcia externého času pretypovania spočíva zväčša v zlepšení organizácie pracoviska (IPA Slovakia. 2017). Zlepšenie skladovania či transport náradia, foriem prispieva k zefektívneniu celého procesu pretypovania a dokáže zminimalizovať hľadanie alebo zbytočný pohyb zamestnancov.

Posledný krok metódy zahŕňa neustále znižovanie interného aj externého času pretypovania. V poslednom kroku sa snažia podniky eliminovať proces pretypovania zariadení najmä štandardizáciou dielov. Obr. 10.3 znázorňuje graficky postup aplikácie metódy SMED.



Obr. 10.3. Postup krokov vykonávaných počas SMED analýzy (Rašková, 2020)

Prostriedkov na dosiahnutie lepšieho stavu je mnoho, vo všeobecnosti ich môžeme klasifikovať do dvoch základných skupín (Burieta, 2013):

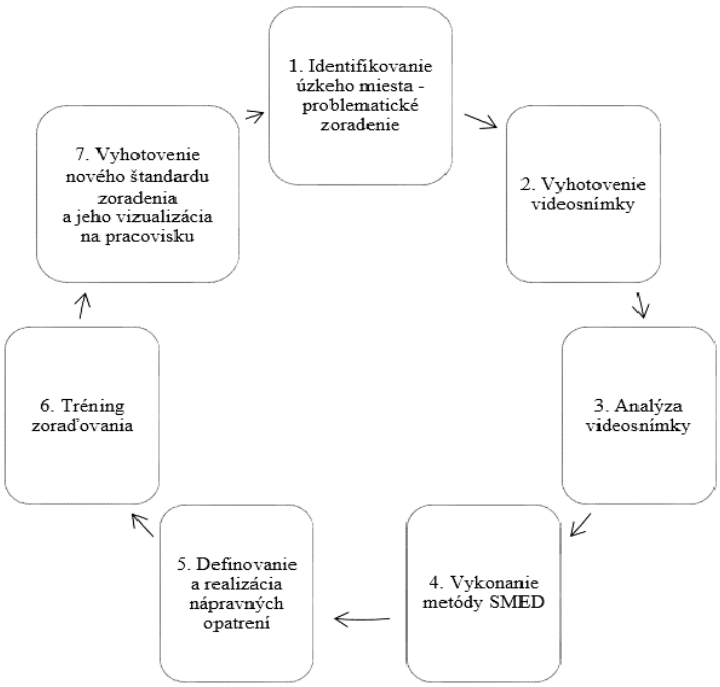
1. ***Organizačné zmeny***, ktoré bez vysokých nákladov dokážu znížiť celkový čas pretypovania o 20 *až* 30 %. Ide predovšetkým o zmeny v organizácii pretypovania (napr. príprava náradia, prípravkov, údržba strojov v externom čase, vizualizácia procesu pretypovania).
2. ***Technologické zmeny***, zasahujúce do konštrukcie strojov, ktoré si častokrát vyžadujú vstupné investície (napr. princíp najmenšieho spoločného násobku, vykonávanie paralelných operácii súčasne, magnetické upínanie foriem, či upnutie jednou otáčkou).

Na elimináciu plytvania a dosiahnutie rýchleho pretypovania existujú všeobecné odporúčania, medzi ktoré patria (IPA Slovakia, 2017; APOS, 2015).

- štandardizácia činností pretypovania,
- štandardizácia strojov,
- vizualizácia procesu pretypovania,
- paralelné vykonávanie operácií,
- použitie rýchlo úpiniek,
- použitie automatických nástrojov,
- automatizovať proces pretypovania,
- vytvorenie pretypovacích tímov.

10.3 Aplikácia metódy SMED pri pretypovaní vstrekovacieho lisu

Realizáciu metódy SMED na redukciu času pretypovania možno vykonať podľa postupu uvedeného na Obr. 10.4.



Obr. 10.4. Postup realizácie metódy SMED

V ďalšej časti štúdie budú opísané kroky 1. *až* 5., pričom 5. krok prebiehal a bol realizovaný súčasne so 4. krokom a ich súčasťou bude aj vyhotovenie nového štandardu.

1. ***Identifikácia úzkeho miesta*** spočíva v určení výrobného zariadenia, na ktorom bude metóda SMED aplikovaná. Na určenie úzkeho miesta sa využíva mapovanie toku hodnôt alebo výpočet celkovej efektívnosti výrobného zariadenia. Najčastejšie sa vyberá pracovisko, ktoré predurčuje celkovú kapacitu systému výroby.

   Analýza procesu pretypovania bola vykonaná v podniku, ktorý vyrába plastové komponenty do automobilov. V tejto časti sa autori budú detailne venovať pretypovaniu na vstrekovacom lise, ktorý má komplikovanú výmenu formy. Z dôvodu komplikovanej výmeny formy musí byť proces pretypovania vykonávaný dvoma pracovníkmi/settermi. Na vybranom vstrekovacom lise sa vyrábajú tri druhy plastových dielov. Každý typ sa vyrába na základe týždennej potreby, definovanej vo výrobnom pláne podniku. Proces pretypovania je pri súčasných výrobných množstvách realizovaný v každom týždni trikrát.

   Pretypovanie vstrekovacieho lisu sa vykonáva z dôvodu zmeny výrobných dávok z jedného výrobku na druhý, pričom časové ohraničenie tohto procesu je vymedzené od

ukončenia výroby posledného dobrého kusu predchádzajúceho výrobku spĺňajúceho všetky požiadavky kvality zákazníka, až po nábehové cykly výroby prvých troch dobrých kusov nasledujúceho výrobku.

Setteri síce prešli tréningovým programom na zabezpečenie procesu, no chýba im presné definovanie postupnosti krokov vykonania všetkých nevyhnutných operácii. Kvôli chýbajúcemu štandardu vykonávajú jednotlivé kroky výmeny formy podľa vlastného uváženia, teda dochádza ku skrytému plytvaniu, ktoré si mnohokrát ani sami neuvedomujú.

2. ***Realizácia videosnímky*** je nutná na zozbieranie informácií potrebných na vykonanie analýzy súčasného stavu procesu pretypovania výrobného zariadenia (Ondra, 2017).

   Súčasťou analýzy súčasného stavu bolo vyhotovenie videozáznamu pomocou jednej stacionárnej kamery zachytávajúcu celý proces zhora a dve pohyblivé kamery, ktoré sledovali postupnosť práce setterov jednotlivo.

   Na základe opakovaného pozorovania bolo zistené, že v procese výmeny foriem dochádza k viacerým plytvaniam.

3. ***Analýza videosnímky.*** Po skončení zaznamenávania boli spracované získané údaje s využitím softvéru Avix SMED, ktorý umožňuje efektívne optimalizovať procesy, zabezpečiť vybalansovanie práce setterov a zvýšiť tak produktivitu ich práce. V ďalšom kroku bol vložený videozáznam zachytávajúci prácu prvého settera do softvéru. Video bolo zostrihané tak, aby každá činnosť bola zaznamenaná samostatne.

   Činnosti, ktoré vykonávajú jednotliví setteri sú znázornené v Tab. 10.2, a Tab. 10.3. Jednotlivé činnosti sú kategorizované do 4 skupín (Rašková, 2020):

   A – Činnosti bezpodmienečne nutné na začatie výroby (označené zelenou farbou).

   B – Pomocné činnosti, ktoré vhodnými opatreniami možno zefektívniť (nevyhnutné činnosti, ale nepridávajúce hodnotu) (označené žltou farbou).

   C – Čakanie vo výmennom procese (čakanie v dôsledku nesprávneho vybalansovania pracovníkov, zbytočné pohyby, manipulácia) (označené oranžovou farbou).

   D – Plytvanie (predovšetkým chyby) (označené červenou farbou).

Kategória A predstavuje činnosti pridávajúce hodnotu. Kategórie B, C, D predstavujú činnosti nepridávajúce hodnotu.

Tabuľka 10.2. Klasifikácia činností settera č. 1 pri pretypovaní lisu (Rašková, 2020)

Č. o.	***Opis pracovnej operácie***	***Trvanie*** (s)	***Začiatočný čas*** (s)	***Koncový čas*** (s)	***Kategória***
1.	Odstavenie výroby	5,00	0	5	A
2.	Umiestnenie robota do polohy výmeny nástroja	71,76	5	76,76	A
3.	Čistenie a konzervácia formy č.1	237,40	76,76	314,16	A
4.	Uzatvorenie formy + inštalácia bezpečnostných Zámkov	63,52	314,16	377,68	A
5.	Odpájanie káblov na ohrevy	38,96	377,68	416,64	A
6.	Odpájanie hadíc na vodu	21,68	416,64	438,32	A
7.	Zavesenie formy	98,76	438,32	537,08	B
8.	Čakanie na settera č.2	139,52	537,08	676,6	C
9.	Odistenie formy – demagnetizácia	72,68	676,6	749,28	A
10.	Čakanie na settera č.2	199,76	749,28	949,04	C
11.	Odvesenie formy č. 1	14,08	949,04	963,12	B
12.	Odvesenie reťazí pre formu č. 1	76,92	963,12	1 040,04	B
13.	Zavesenie formy č.2	140,44	1 040,04	1 180,48	B
14.	Čakanie na settera č.2	364,48	1 180,48	1 544,96	C
15.	Nastavenie výšky formy	121,72	1 544,96	1 666,68	A
16.	Upnutie formy č. 2	7,04	1 666,68	1 673,72	B
17.	Odvesenie formy č.2	65,37	1 673,72	1 739,09	B
18.	Zapájanie káblov na ohrevy	590,63	1 739,09	2 329,72	A
19.	Zapájanie káblov pre bezpečnosť formy	133,84	2 329,72	2 463,56	A
20.	Načítanie programu pre ohrev formy + kontrola zapojenia	170,04	2 463,56	2 633,6	A
21.	Zapojenie hydrauliky na pohyblivej strane formy	65,52	2 633,6	2 699,12	A
22.	Zapojenie hadíc na vodu	307,92	2 699,12	3 007,04	A
23.	**Čakanie na nahriatie formy + chyba settera**	2 366,08	3 007,04	5 373,12	**D**
24.	Nábeh, nábehové cykly do prvého dobrého dielu	494,74	5 373,12	5 867,86	A

Ako najzávažnejší problém plytvania v procese pretypovania vstrekovacieho lisu bolo identifikované čakanie, spôsobené nesprávnym vybalansovaním práce setterov. Príčinou sú spomínané väzby medzi činnosťami, napr. setter č. 2 musí počkať kým setter č. 1 dokončí proces odistenia formy, tzv. demagnetizáciu, až potom môže prejsť k vyňatiu formy č. 1 z lisu.

Tabuľka 10.3. Klasifikácia činností settera č. 2 pri pretypovaní lisu (Rašková,2020)

Č. o.	***Opis pracovnej operácie***	***Trvanie*** (s)	***Začiatočný čas*** (s)	***Koncový čas*** (s)	***Kategória***
1.	Čakanie na settera č.1	84,36	0,00	84,36	C
2.	Výmena nástroja robota (odoberacej ruky)	139,15	84,36	223,51	A
3.	Odkladanie odoberacej ruky	57,12	223,51	280,63	B
4.	**Presun po ovládač + príprava žeriavu k lisu**	129,18	280,63	409,81	**D**
5.	Asistencia pri odpájaní ohrevov formy č.1 setterovi č. 1	46,05	409,81	455,86	B
6.	Odpájanie hydrauliky formy č. 1 na pevnej strane	96,72	455,86	552,58	A
7.	Odpájanie hadíc na vodu formy č. 1	49,13	552,58	601,71	A
8.	Odpájanie hydrauliky formy č. 1 na pohyblivej strane	63,57	601,71	665,28	A
9.	Čakanie na settera č.1	112,18	665,28	777,46	C
10.	Vyňatie formy č.1 z lisu	88,92	777,46	866,38	B
11.	Uloženie formy č.1	81,12	866,38	947,50	A
12.	Odvesenie reťazí pre formu č.1	92,31	947,50	1 039,81	B
13.	Presunutie žeriavu nad formu č.2	96,06	1 039,81	1 135,87	B
14.	Čakanie na settera č.1	45,11	1 135,87	1 180,98	C
15.	Presun formy č.2 do lisu	364,52	1 180,98	1 545,50	B
16.	Čakanie na settera č.1	194,72	1 545,50	1 740,22	C
17.	Zapájanie káblov na ohrevy	242,11	1 740,22	1 982,33	A
18.	Odomykanie zámkov na forme č. 2 na strane operátora	250,16	1 982,33	2 232,49	B
19.	Zapájanie káblov pre bezpečnosť formy + kaskády	169,87	2 232,49	2 402,36	A
20.	Odomykanie formy č. 2 na strane opačnej	205,15	2 402,36	2 607,51	B
21.	Zapojenie hadíc na hydrauliku (olej)	201,44	2 607,51	2 808,95	A
22.	Zapájanie hadíc na vodu	201,75	2 808,95	3 010,70	A
23.	Výmena výrobnej suroviny	885,12	3 010,70	3 895,82	A

Plytvanie bolo pozorované aj v činnostiach, ktoré možno zrealizovať pred samotnou výmenou formy, ako napr. presun settera č. 2 po ovládač na pracovisko údržby a premiestnenie žeriava nad spomínaný lis. Setter č. 2 pri tejto činnosti vykonal 88 krokov, prešiel 66 m a presun žeriavu nad lis trval 56 s.

Rovnako je dôležité spomenúť, že výrobný podnik má vymedzený dostatočný priestor na uloženie foriem v bezprostrednej blízkosti lisov.

V analyzovanom prípade sa forma nachádzala 2 metre ďalej od určenej polohy. Vzdialenosť 2 metre sa v prvom momente nemusí zdať ako veľmi problematická, no je potrebné si uvedomiť, že sa žeriav pri presune formy pohybuje veľmi pomaly a zbytočne

dochádza k časovým stratám. V dôsledku nesprávneho uloženia foriem došlo k strate 39 s.

Tlakové hadice, ktoré slúžia na transport priemyselnej vody a stlačeného vzduchu do vstrekovacieho lisu sú ťažké, dlhé a neusporiadané, setteri ich musia počas odpájania a zapájania opakovane prekladať. Setteri pri ich výmene nemajú k dispozícii žiadny stojan, preto si ich často položia na plece, čo výrazne sťažuje podmienky ich prepájania. Na Obr. 10.5 je znázornené odpájania hadíc na vodu.

Obr. 10.5. Odpájanie káblov na vodu formy č.1 (Rašková, 2020)

Aj napriek komplexnému zaškoleniu spôsobuje dvanásť párov káblov na ohrev formy setterom veľké problémy. Káble nie sú vizuálne ani číselne označené a opakovane dochádza k nesprávnemu zapojeniu na prvýkrát. Tento prípad nastal aj počas vykonávania analýzy. Setter č.1 na túto chybu prišiel až v okamihu, keď bolo potrebné prejsť k nahrievaniu formy. Na Obr. 10.6 je znázornený súčasný stav pri zapájaní káblov na ohrev formy.

Obr. 10.6. Zapájanie káblov na ohrev formy v súčasných podmienkach (Rašková, 2020)

Setteri musia pracovať pri zapájaní a odpájaní káblov v nevhodných ergonomických podmienkach, vo výške piatich metrov. Táto situácia je znázornená na Obr. 10.7. Hrozí, že pracovník pri strate pozornosti môže z lisu spadnúť a spôsobiť si pracovný úraz.

Obr. 10.7. Neergonomické podmienky pri zapájaní káblov na ohrevy (Rašková, 2020)

Pri odomykaní zámkov sme identifikovali plytvanie v dôsledku zdĺhavého skrutkovania. Na priťahovanie a uvoľňovanie zámkov využívajú setteri očkové kľúče, pričom mnohokrát dochádza k viacnásobnému doťahovaniu skrutiek. Výrazným plytvaním je čakanie potrebné na nahriatie formy. Forma sa v súčasných podmienkach zahreje za 10 min, nakoľko výrobný podnik nedisponuje možnosťou externého predohrevu formy.

Pri výmene výrobnej suroviny pracovníci využívajú iba 20 litrové nádoby. Setter musel nasypať zo zásobníka granulát do nádoby, prejsť 37 krokov (27,75 m), vyjsť na lis, vsypať granulát a vrátiť sa späť ku zásobníku. Celkovo musel tento proces, kvôli malej nádobe, realizovať trikrát, pričom zbytočne prešiel 131 krokov (98,25 m), a tým došlo k časovej strate 8 min 20 s. Na Obr. 10.8 je znázornená nádoba na výmenu suroviny, ktorá sa používa v súčasných podmienkach.

Obr. 10.8. Nádoba na výmenu výrobnej suroviny (Rašková, 2020)

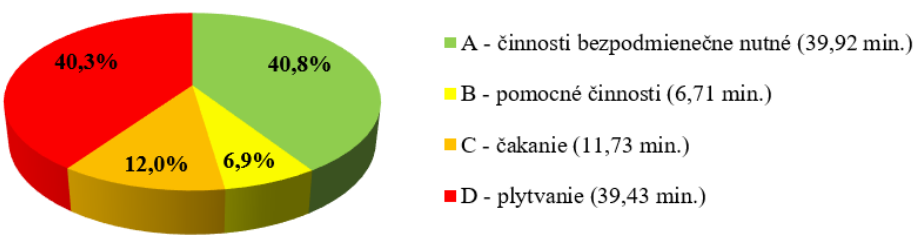
Osobitou skupinou plytvania je zbytočná chôdza setterov pri pretypovaní vstrekovacieho lisu. Setter č. 1 musel počas výmenného procesu celkovo prejsť 382 krokov. Pričom

priemerná dĺžka kroku settera č.1 je 0,75 m, čiže prešiel celkovú vzdialenosť 286,5 m. Setter č. 1 prešiel celkovo 424 krokov, priemerná dĺžka kroku druhého settera je 0,8 m. Celková vzdialenosť, ktorú prešiel setter č. 2 pri pretypovaní lisu bola 339,2 m.

Plytvanie (kategórie C a D) identifikované počas procesu pretypovania vstrekovacieho lisu zoradené podľa dôležitosti (Rašková, 2020):

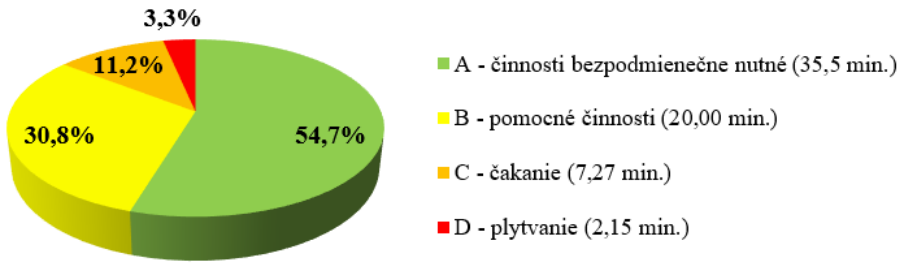
- Čakanie spôsobené nesprávnym vybalansovaním práce setterov.
- Činnosti, ktoré môžu byť vykonané pred/po samotnej výmene formy (žeriav umiestený nad vstrekovacím lisom, ukladanie foriem v bezprostrednej blízkosti stroja, príprava granulátu).
- Ťažké, dlhé a neusporiadané hadice na transport priemyselnej vody a stlačeného vzduchu.
- 12 párov káblov na ohrev formy nie je označených, preto často dochádza k nesprávnemu zapojeniu na prvýkrát.
- Odomykanie zámkov očkovými kľúčmi, ktoré si vyžaduje viacnásobné doťahovanie skrutiek.
- Čakanie na nahriatie formy, chýbajúci externý predohrev formy.
- Malé nádoby na výmenu výrobnej suroviny.
- Osobitou kategóriou je zbytočná chôdza setterov. Setter č. 1 musel počas pretypovania prejsť 286,5 m a setter č. 2 prejsť 339,2 m.

Práca settera č. 1 počas pretypovania má časové trvanie 97,79 min. Setter č. 1 sa zúčastnil celého procesu pretypovania lisu. Až 40,3 % (39,43 min) z realizovaného času predstavovalo plytvanie v kategórii D, ktoré bolo spôsobené predovšetkým chybou settera a dlhým nahrievaním formy. Činnosti v kategórii A označujeme ako činnosti bezpodmienečne nutné pre výmenu formy spolu tvoria 39,92 min. Pomocné činnosti, nachádzajúce sa v kategórii B, ktoré dokážeme s využitím vhodných postupov zefektívniť boli 6,71 min. Čakanie na spolupracujúceho settera č. 2 trvalo 11,73 min (Obr. 10.9).



Obr. 10.9. Kategórie činnosti settera č.1

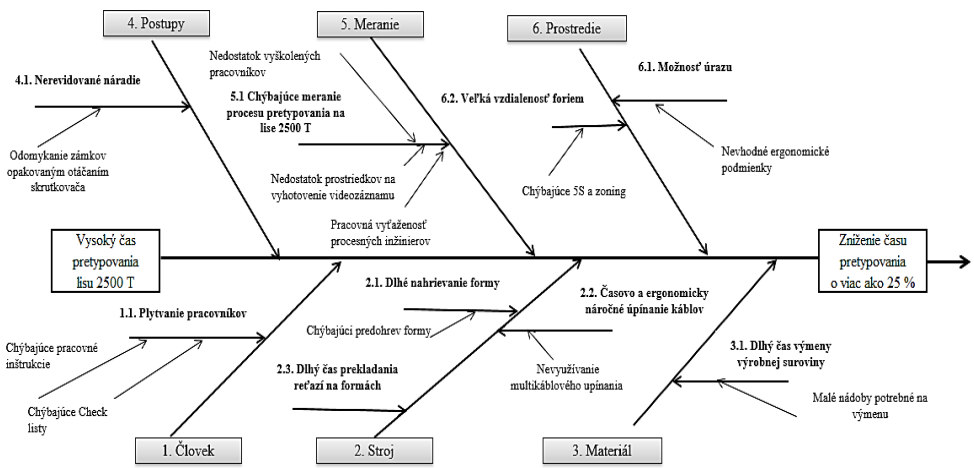
Celková práca settera č. 2 trvá 64,92 min. Bezpodmienečne nutné činnosti spolu tvoria až 54,7 % (35,50 min). Vysoký podiel tvoria činnosti nevyhnutné pre výkon práce, teda 20,00 min. Čakanie settera č.2 zodpovedá 7,27 min a plytvanie v dôsledku zaradených externých činností do procesu pretypovania bolo 2,15 min (Obr. 10.10).



Obr. 10.10. Kategórie činností settera č.2

Najpodstatnejšie príčiny dlhého pretypovania formy na lise sú spracované pomocou Ishikawa diagramu (Obr. 10.11). Na hlavných vetvách sú zakreslené hlavné príčiny, ktoré vychádzajú zo šiestich dimenzií používaných vo výrobe, a to:

- človek,
- postupy,
- metódy,
- materiál,
- stroj,
- prostredie.



Obr. 10.11. Ishikawa diagram procesu pretypovania lisu (Rašková, 2020)

4. ***Aplikácia metódy SMED.*** Na optimalizáciu procesu sa využíva vopred opísaný postup metódy SMED zložený zo 4 krokov, ktorý sa snaží o efektívnejšie vykonávanie činností (Ondra, 2017). Hlavným cieľom implementácie metódy SMED je skrátenie času pretypovania vstrekovacieho lisu minimálne o 25 %. Znížením tohto času dokážeme skrátiť priebežný čas výroby, zabezpečiť úsporu zdrojov výrobného

podniku, zefektívniť prácu setterov, či minimalizovať chyby spôsobené ľudským faktorom. Metóda je založená na 4 základných krokoch (IPA Slovakia, 2017):

a) **V prvom kroku sa rozdelia činnosti na interné a externé podľa toho, či ich možno realizovať počas chodu výrobného zariadenia, alebo je potrebné stroj odstaviť.**

   Externé činnosti sú tie, ktoré je možné vykonávať pred alebo po skončení procesu pretypovania. Naopak interné činnosti sú tie, ktoré nie je možné vykonávať počas riadneho chodu daného výrobného zariadenia. Všetky interné činnosti sú všeobecne považované za prestoj, pretože ich možno realizovať iba počas odstávky vstrekovacieho lisu. Z hľadiska analýzy súčasného stavu pretypovania musia byť takmer všetky činnosti vykonávané interne. Do kategórie externých činností sú z Tab. 10.4, ktorá popisuje postup práce settera č.1 pri výmene formy vstrekovacieho lisu zaradené nasledovné činnosti:

   - Činnosť [12]: Odvesenie reťazí pre formu č. 1. (1,28 min).
   - Činnosť [13]: Zavesenie reťazí pre formu č. 2. (2,34 min).

   V prípade settera č.2 boli do kategórie externých činností vychádzajúce z Tab. 10.5 zaradené tieto činnosti:

   - Činnosť [3]: Odkladanie odoberacej ruky. (0,95 min).
   - Činnosť [4]: Presun po ovládač + príprava žeriavu k lisu. (2,15 min).

   Zaradením a preskupením činnosti z interných na externé klesol interný čas pretypovania pri setterovi 1 z pôvodných 97,79 min na 94,17 min. Pri setterovi 2 prišlo k skráteniu času interných činností zo 64,92 min na 61,82 min.

   Cieľom preradenia vybraných interných činností na externé je zabezpečiť, aby setteri mali pred samotným procesom výmeny formy všetky potrebné nástroje a materiály k dispozícii v správnom množstve, čase a kvalite. Rovnako je potrebné pripraviť formy a všetky dôležité prípravky tak, aby boli čo najbližšie k miestu použitia. Aby setteri nezabudli aké činnosti majú vykonať pred samotnou výmenou formy bolo navrhnuté, aby uvedené činnosti boli štandardizované pomocou „Check listu“. Druhou kategóriou budú činnosti, ktoré setteri musia vykonať po ukončení procesu pretypovania. Návrh „Check listu“ na pretypovanie vstrekovacieho lisu je uvedený na Obr. 10.12.

CHECK LIST PROCESU PRETYPOVANIA

Stroj: Vstrekovací lis **LIST: 1/1**

Činnosti pred zahájením výmeny formy:

10 minút pred výmenou formy skontrolujte všetky uvedené body.
Výmenu formy začnite až keď budú všetky body splnené.

Bod	Opis činnosti	Vyhovuje/Nevyhovuje
1.	Mám nachystanú novú formu v bezprostrednej blízkosti lisu?	
2.	Skontroloval som, či nachystaná forma je v poriadku?	
3.	Mám pripravený ovládač na manipuláciu žeriavu?	
4.	Nachádza sa žeriav nad lisom?	
5.	Mám pripravené náradie na odomykanie bezpečnostných zámkov?	
6.	Mám pripravené náradie na odpájanie/zapájanie káblov?	
7.	Mám nachystané reťaze na výmenu foriem?	
8.	Mám pripravenú výrobnú surovinu v určenej nádobe?	
9.	Je vedúci oddelenia údržby oboznámený o výmene?	

Činnosti po zahájení novej výroby:

Po skončení procesu pretypovania skontrolujte, či ste realizovali všetky uvedené body.

Bod	Opis činnosti	Vyhovuje/Nevyhovuje
1.	Odložil som predchádzajúcu formu na určené miesto?	
2.	Uložil som náradie naspäť do kancelárie údržby?	
3.	Odložil som reťaze potrebné na výmenu na miesto?	
4.	Vysypal som starý nepoužitý materiál do odpadu?	
5.	Vrátil som žeriav do východiskovej polohy?	
6.	Odložil som odoberaciu ruku na určené miesto?	
7.	Presvedčil som sa, že lis pracuje ako má?	

Ak ste činnosť vykonali prosím zapíšte v poslednom stĺpci „OK", ak činnosť nebola vykonaná zapíšte „NOK"

Vypracoval:	Revidoval:	Realizoval:	Schválil:
Dňa:	Dňa:	Dňa:	Dňa:

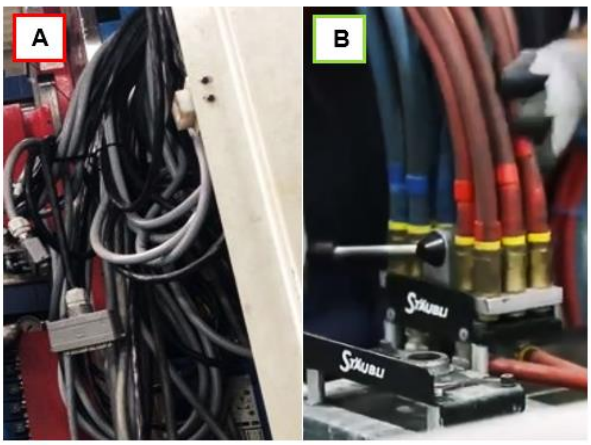
Obr. 10.12. Návrh „Check listu" procesu pretypovania na vstrekovacom lise (Rašková, 2020)

b) Druhý krok je zameraný na elimináciu času interných činností (vykonávajúcich sa počas zastavenia chodu výrobného zariadenia), ktorá sa dosiahne navrhovanými opatreniami.

V tomto kroku sa zameriame na nesprávne vybalansovanie práce setterov, ktoré sa prejavuje čakaním jedného settera na druhého. Samotnému vybalansovaniu práce setterov predchádzajú racionalizačné opatrenia, ktoré dokážu zefektívniť interné činnosti, ktoré je nevyhnutné počas procesu pretypovania vykonať.

Prvým návrhom na zníženie času interných činností je zavedenie modulového systému zapájania viacerých káblov naraz. Káble sa medzi sebou motajú, ich konektory nie sú vizuálne označené, ich zoradenie je chaotické (Obr. 10.13A).

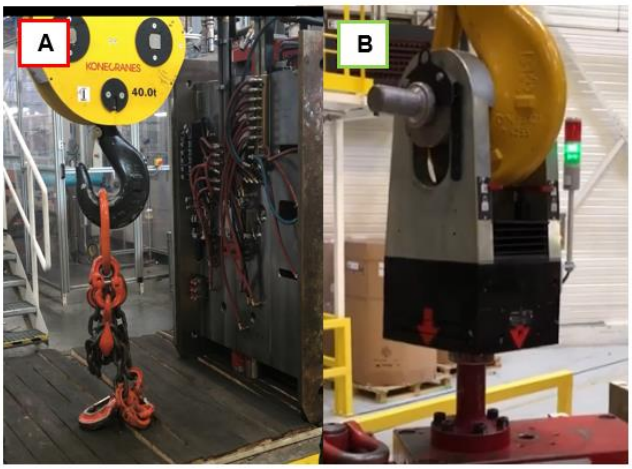
Rovnako 12 párov káblov spôsobuje, že často dochádza k chybám pri ich zapájaní, čo spôsobuje časovú stratu a zbytočný prestoj. Navrhovaný modulový systém je vybavený ochranou proti prehriatiu, skratu a predovšetkým chybnému zapojeniu. Modulový systém umožňuje centralizované pripojenie všetkých káblov na ohrevy naraz jedným pohybom (Obr. 0.13B). Navrhovaným systémom sa zníži čas odpájania káblov na ohrevy z 0,65 min (38,96 s) na 0,27 min (16 s) a čas zapájania káblov na ohrevy z 9,84 min (590,63 s) na 0,5 min (30 s).



Obr. 10.13 .Porovnanie systému zapájania káblov na ohrevy (Rašková, 2020)

Druhým návrhom je skrátenie hadíc na vodu, ktoré sú zbytočne dlhé a ťažké, ako aj aplikáciu stojanu, ktorý ich separuje a zorganizuje.

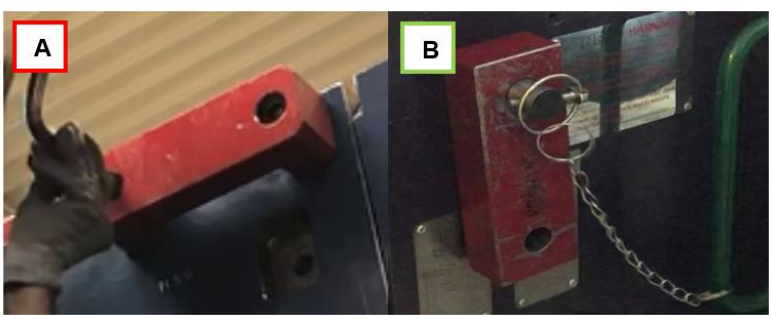
V súvislosti s neustále rastúcim záujmom o implementáciu prvkov Industry 4.0 v priemyselnom odvetví sa navrhlo zefektívniť proces výmeny formy s využitím obojstranného elektropermanentného magnetu. Magnetické dosky zabezpečujú rýchlu a jednoduchú výmenu foriem, pričom magnetizačný čas upnutia dosky sa pohybuje od 0,02 *až* 0,04 min (1 *až* 2 sekundy). Navrhovaným systémom sa nahradí mechanické upínanie formy setterom automatickým upnutím dvoch elektropermanentných magnetov. Navrhovaným zlepšením sa úplne eliminujú činnosti ako zavesenie a odvesenie formy, upnutie formy, zavesenie a odvesenie reťazí, ktoré spolu tvorili 6,71 min práce settera č. 1 a 1,42 min práce settera č. 2. Zároveň sa zlepšia aj ergonomické podmienky, nakoľko možno celý proces ovládať zo zeme ovládačom (Obr. 10.14A a 10.14B).



Obr. 10.14. Upínanie foriem vstrekovacieho lisu (Rašková, 2020)

V celej oblasti vstrekovacích lisov bolo navrhnuté zaviesť chýbajúci „5S – zoning“. Navrhovaným zlepšením sa forma priblíži k lisu o 1,5 m a z časového hľadiska sa dosiahne úspora 0,52 min.

Ďalším návrhom bolo zefektívnenie odomykania zámkov na forme aplikáciou kolíkov a závlačky. V pôvodnom stave sa využíval spôsob dvoch skrutiek, ktoré setter odomykal ôsmimi rotačnými pohybmi skrutkovača (Obr. 10.15A). Pri použití systému kolíkov a závlačky sa pri odomykaní zámkov závlačka jednoducho z kolíku vytiahne, zámok sa otočí o 90° a závlačka sa do kolíku opäť zatlačí (Obr. 10.15B). Celý proces odomknutia zámku trvá 0,16 min, čím z pôvodných 3,42 min sa dosiahne časová úspora 3,26 min.



Obr. 10.15. Odomykanie zámkov na forme lisu (Rašková, 2020)

Posledným racionalizačným opatrením v tomto kroku bolo nahradenie 20 litrovej nádoby nádobou s vyšším objemom, pričom setteri môžu nasypať granulát do nádoby pred samotným procesom pretypovania a nádobu umiestniť na vozík, ktorý bude umiestnený v blízkosti stroja. Eliminuje sa tak nadbytočná chôdza spôsobená opakovaným dopĺňaním materiálu, zlepšia sa ergonomické podmienky.

Predloženým návrhom sa dokáže skrátiť proces výmeny suroviny z pôvodných 14,75 min, na nový čas 6 min.

c) **Tretím krokom metódy SMED je zníženie času externých činností, ktoré sa vykonávajú pred a po skončení procesu pretypovania nasledovnými opatreniami.**

Prvým návrhom je aplikácia dvoch držiakov na reťaze, potrebné na výmenu formy, ktoré budú umiestnené na železnej konštrukcii stroja. Setteri nebudú musieť reťaze hľadať v kancelárii a budú okamžite dostupné pre výmenu formy. Činnosť odkladania odoberacej ruky robota setter vykonal správne, no na zefektívnenie procesu pretypovania bola zaradená medzi externé činnosti.

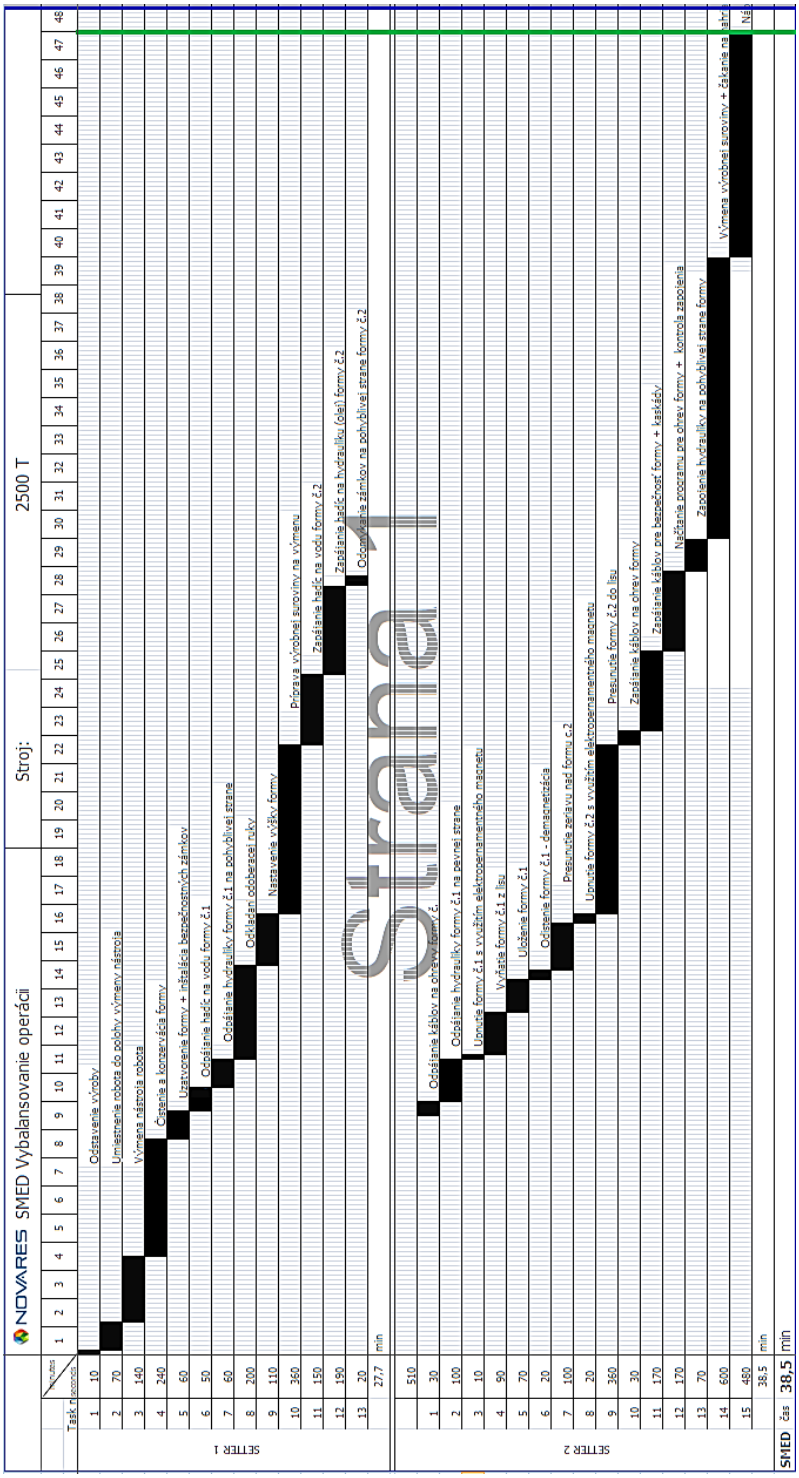
Posledným návrhom na redukciu času externých činností je vizualizácia a označenie ovládača na žeriav v kancelárii údržby. Všetci pracovníci z oddelenia údržby majú na manipuláciu so žeriavom k dispozícii jeden ovládač, ktorý v kancelárii nemá svoje pridelené miesto, preto ho ukladajú kdekoľvek. Často preto dochádza k časovým stratám spôsobeným jeho hľadaním po kancelárii údržby. Riešením bude pre ovládač prideliť riadne miesto a označiť ho metódou 5S.

d) **Štvrtým krokom je redukcia celkového času pretypovania.**

Na zabezpečenie maximálnej efektívnosti procesu pretypovania sa reorganizovali činnosti medzi settermi, znížila sa chôdza setterov na minimum a odstránilo sa čakanie jedného settera na druhého.

V Tab. 10.4 a 10.5 sú znázornené činnosti a ich časové trvania, ktoré by setteri po zavedení technických a reorganizačných opatrení mali vykonať. Na Obr. 10.16 je graficky zobrazená nadväznosť činností setterov pomocou Ganttového diagramu.

Celý proces pretypovania bude po zavedení zlepšení trvať 47 min. V porovnaní s predchádzajúcim stavom, v časovom trvaní 97,79 min sa proces pretypovania lisu skrátil o 50,79 min (51,9 %).



Obr. 10.16. Vybalansovanie operácie práce setterov pri pretypovaní lisu

Setter č. 1 skončí proces pretypovania po 27,67 min (tab. 10.4). Jeho práca sa počas procesu pretypovania vstrekovacieho lisu skráti o 70,12 min (v prepočte o 71,7 %). Cieľom opatrení bolo, aby jeden zo setterov zabezpečil prepojenie káblov a hadíc na pohyblivej strane lisu a druhý setter na pevnej strane. Setter č.1 by po zavedení opatrení musel prejsť 256 m.

Tabuľka 10.4. Postup činnosti settera č.1 pri pretypovaní lisu (Rašková, 2020)

SMED	***PRACOVNÁ INŠTRUKCIA – setter č. 1***			***Kategória***
P. č.	***Opis činnosti***	***Čas operácie*** (s)	***Kumulatívne vyjadrenie času*** (min:s)	
1.	Odstavenie výroby	10	00:10	A
2.	Umiestnenie robota do polohy výmeny nástroja	70	01:20	A
3.	Výmena nástroja robota	140	03:40	A
4.	Čistenie a konzervácia formy	240	07:40	A
5.	Uzatvorenie formy + inštalácia bezpečnostných zámkov	60	08:40	A
6.	Odpájanie hadíc na vodu (forma č. 1)	50	09:30	A
7.	Odpájanie hydrauliky na pohyblivej strane	60	10:30	A
8.	Odkladanie odoberacej ruky	200	13:50	B
9.	Nastavenie výšky formy	110	15:40	A
10.	Príprava výrobnej suroviny	360	21:40	A
11.	Zapájanie hadíc na vodu (forma č. 2)	150	24:10	A
12.	Zapájanie hadíc na hydrauliku (forma č.2)	190	27:20	A
13.	Odomykanie zámkov na pohyblivej strane	20	27:40	B

Setter č. 2 bude potrebný v procese pretypovania až po 8,33 min, pričom na procese bude zúčastnený až po nábehové cykly prvého dobrého dielu (tab. 10.5). V súvislosti s uvedenou reorganizáciou práce setter č. 2 zabezpečí všetky externé činnosti, ktoré je potrebné vykonať po ukončení procesu pretypovania. Práca settera č. 2 sa v procese pretypovania (interné činnosti) skráti o 26,25 min (40,7 %) na 38,67 min. Po zavedení zlepšení by setter č. 2 musel prejsť 276 m.

Tabuľka 10.5. Postup činnosti settera č.2 pri pretypovaní lisu 2500 T (Rašková, 2020)

SMED	PRACOVNÁ INŠTRUKCIA – setter č. 2			
P. č.	***Opis činnosti***	***Čas operácie*** (s)	***Kumulatívne vyjadrenie času*** (min:s)	***Kategória***
1.	Odpájanie káblov na ohrev (forma č. 1)	30	00:30	A
2.	Odpájanie hydrauliky na pevnej strane (forma č. 2)	100	02:10	A
3.	Upnutie formy č. 1 s využitím elektropernamentného magnetu	10	02:20	B
4.	Vyňatie formy č. 1 z lisu	90	03:50	B
5.	Uloženie formy č. 1	70	05:00	A
6.	Odistenie formy č. 1 – demagnetizácia	20	05:20	A
7.	Presunutie žeriavu nad formu č. 2	100	07:00	B
8.	Upnutie formy č. 2 s využitím elektropernamentného magnetu	20	07:20	B
9.	Presunutie formy č. 2 do lisu	360	13:20	B
10.	Zapájanie káblov na ohrev formy	30	13:50	A
11.	Zapájanie káblov na bezpečnosť formy	170	16:40	A
12.	Načítanie programu pre ohrev formy + kontrola zapojenia	170	19:30	A
13.	Zapojenie hydrauliky na pohyblivej strane formy	70	20:40	A
14.	**Výmena výrobnej suroviny + čakanie na nahriatie formy**	600 (z toho čakanie 400)	30:40	**D**
15.	Nábehové cykly do prvého dobrého dielu	480	38:40	B

10.3.1 Zhodnotenie návrhov procesu pretypovania vstrekovacieho lisu

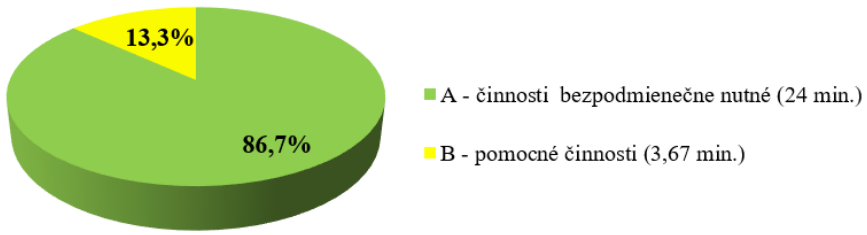
Pôvodne proces pretypovania vstrekovacieho lisu trval 97,79 min, zavedením návrhov sa proces skráti na 47 min, čím sa dosiahlo skrátenie procesu pretypovania o 51,9 %. Cieľ, t. j. skrátenie procesu pretypovania minimálne o 25 % bol splnený. V Tab. 10.6 sú zosumarizované opatrenia technického a organizačného charakteru z hľadiska ich prínosu pre proces pretypovania vstrekovacieho lisu, ako aj nevyhnutnej potreby vynaloženia finančných prostriedkov.

Tabuľka 10.6. Sumarizácia návrhov na zefektívnenie procesu pretypovania vstrekovacieho (Rašková, 2020)

Navrhované opatrenie	***Sumarizácia zlepšenia súčasného stavu navrhovaným opatrením***
Zavedenie „Check listu" procesu pretypovania	• odstránenie externých činností z procesu pretypovania
Presun externých činností na interné	• skrátenie procesu pretypovania
Reorganizácia práce setterov	• odstránenie čakania jedného settera na druhého • odstránenie zbytočnej chôdze • skrátenie času celého procesu pretypovania • zlepšenie ergonomických podmienok práce
Modulový systém zapájania káblov	• zapojenie káblov na ohrevy naraz • časová úspora pri zapájaní a odpájaní káblov.
Skrátenie hadíc na vodu + aplikácia stojanu na hadice	• zlepšenie ergonomických podmienok práce • časová úspora pri manipulácii s hadicami
Implementácia elektropernamentného magnetu	• jednoduchá výmena formy • zlepšenie ergonomických podmienok práce • výrazná časová úspora pri manipulácii s formami a reťazami na formu
Aplikácia „5S − zoning" pre výmenu foriem	• časová úspora
Aplikácia kolíka a závlačky na odomykanie zámkov	• časová úspora
Aplikácia väčšej nádoby na výmenu výrobnej suroviny + vozíka	• časová úspora • odstránenie zbytočnej chôdze
Vizualizácia ovládača v kancelárii údržby	• eliminácia plytvania pri hľadaní ovládača v kancelárii údržby
Zavedenie pracovnej inštrukcie pre proces výmeny formy vstrekovacieho lisu 2500 T	• zavedenie efektívnej postupnosti krokov. • odstránenie čakania • zníženie chýb a zmätkovosti práce

Po zavedení vyššie uvedených riešení je percentuálne zastúpenie jednotlivých kategórií činností oboch zamestnancov uvedené na Obr. 10.17 a Obr. 10.18.

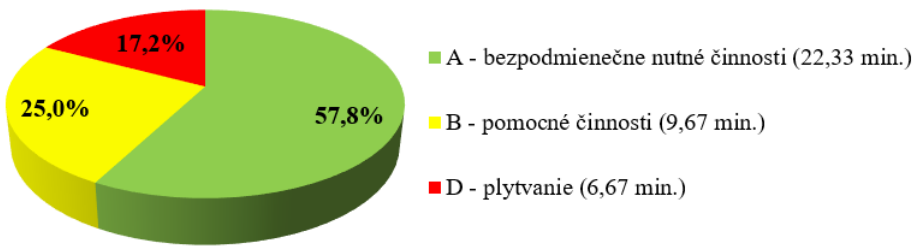
Z Obr. 10.17 vyplýva, že po zavedení navrhovaných riešení predstavujú Činnosti bezpodmienečne nutné (pridávajúce hodnotu) 86,7 % a pomocné činnosti (nevyhnutné činnosti) 13,3 %. Z činnosti settera č. 1 sa úplne eliminovali činnosti, ktoré boli kategorizované ako plytvanie (skupina D) a čakanie (skupina C).



Obr. 10.17. Kategórie činnosti settera č. 1 po realizácii opatrení

Obr. 10.18 zachytáva percentuálne vyjadrenie činností vykonávaných setterom č. 2 po implementácii navrhovaných riešení. Z grafu vyplýva, že bezpodmienečne nutné činnosti (činnosti pridávajúce hodnotu) predstavujú 57,8 % z celkového času pretypovania a činnosti nepridávajúce hodnotu 42,2 %. Zo štruktúry sa úplne eliminovala skupina čakanie, napr. čakanie v dôsledku nesprávneho vybalansovania. Časové trvanie pomocných činností (skupina B) sa znížilo z pôvodných 20 min na 9,67 min.

Čakanie na nahriatie formy nebolo možné úplne odstrániť (skupina D – plytvanie), no správnym vybalansovaním práce setterov sa ho podarilo skrátiť na 6,67 min.



Obr. 10.18. Kategórie činnosti settera č. 2 po realizácii opatrení

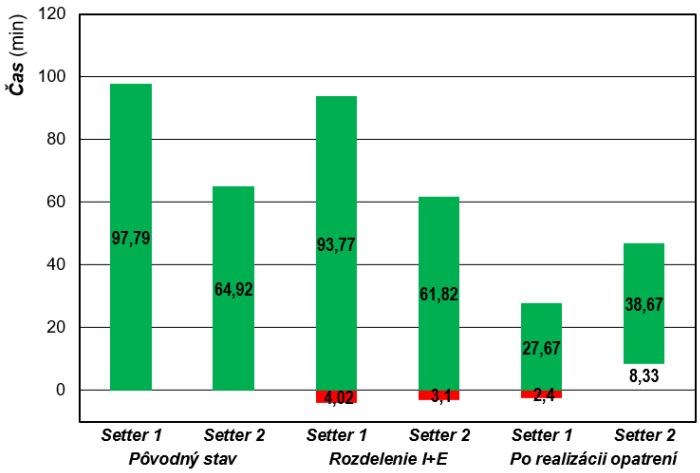
Záver

Vo výrobnom procese sa často vyskytujú činnosti, ktoré výrobku nepridávajú žiadnu hodnotu. Zákazník nie je ochotný za tieto činnosti platiť a preto ich je potrebné eliminovať. Na riešenie tohto problému sa do podnikov zavádzajú prvky štíhlej výroby. Zoštíhľovanie výrobného procesu podniku prinesie zníženie nákladov, väčšie využitie výrobných kapacít, zdrojov a zlepšenie ekonomických výsledkov.

Snaha o uspokojovanie špecifických požiadaviek zákazníkov spôsobuje variabilitu výroby, čo má dopad na prerušovanie plynulého výrobného procesu zmenou nastavenia/prestavenia strojného zariadenia. Z dôvodu prerušenia výroby je pretypovanie samo o sebe plytvaním. Uvedené plytvanie nie je možné úplne vylúčiť z výrobného procesu, preto sa autori štúdie zamerali na skrátenie jeho časového trvania aplikáciou metódy SMED.

Komplexné zhodnotenie navrhovaných riešení zameraných na zlepšenie procesu pretypovania je založené na porovnaní prechádzajúceho času pretypovania a času pretypovania po zavedení všetkých nápravných opatrení.

Čas procesu pretypovania sa skrátil z pôvodných 97,79 min na 47 min. V pôvodnom procese pretypovania sa všetky činnosti vykonávali počas odstavenia zariadenia, z čoho vyplýva, že čas pretypovania bol považovaný za prestoj.



Obr. 10.19 Časové trvanie procesu pretypovania

Po aplikácii prvého kroku metódy SMED – rozdelení konkrétnych činností na interné a externé, čas prestoja kvôli pretypovaniu predstavoval 93,77 min (časové trvanie interných činností pretypovania). Čas pretypovania po realizácii nápravných opatrení, zahŕňajúci iba interné činnosti, ktoré predstavujú prestoj, je 47 min. Z uvedeného vyplýva, že čas prestojov sa skrátil celkovo o 50,79 min, čo predstavuje 51,9 %. Grafické porovnanie časového trvania procesu pretypovania pôvodného stavu, stavu po rozdelení činností pretypovania na interné a externé a stavu po realizácii nápravných opatrení je zobrazené na Obr. 10.19, pričom zelená farba zobrazuje časové trvanie interných činností pretypovania (prestoj zariadenia) a červená farba predstavuje externé činnosti, ktoré sú vykonávané počas chodu stroja. Hodnota 8,33 min predstavuje čas, o ktorý začne neskôr pracovať setter 2 v porovnaní so setterom 1.

Pôvodne proces pretypovania vstrekovacieho lisu trval 97,79 min, zavedením návrhov sa proces skráti na 47 min, čím sa splní cieľ skrátenia procesu pretypovania minimálne o 25 %. Ušetrený čas, vzniknutý implementáciou návrhov sa prepočíta na počet kusov dielov vyrábaných na lise, ktoré podnik môže skrátením procesu pretypovania vyrobiť. Taktový čas pre výrobu vybraného dielu je stanovený na 50 s. Celkovo sa dosiahla časová úspora procesu pretypovania 50,79 min, za tento čas dokáže podnik vyrobiť 60 ks dielov vyrábaných na lise. Výmena formy vstrekovacieho lisu sa vo výrobnom podniku realizuje trikrát za týždeň. Za týždeň podnik dokáže vyrobiť o 180 ks dielov viac v porovnaní s pôvodným stavom. Kalendárny rok bol členený na 53 týždňov, pričom výrobný podnik uplatňuje každoročne celozávodnú odstávku v časovom rozhraní troch týždňov. Aplikáciou navrhovaných opatrení dokáže podnik ročne vyrobiť viac o 9 000 ks dielov.

Zoznam bibliografických odkazov

ALUKAL, G. 2003. Create a lean, mean machine. Quality Progress. Vol. 36 No. 4, s. 29-35. [online]. [cit. 2019-12-13]. Dostupné na internete: <https://docuri.com/download/lean-ans-six-sigma_59c1e22ef581710b286a5420_pdf>.

APOS Consulting s.r.o. 2015. SMED. [online]. [cit. 2020-5-20]. Dostupné na internete: <http://apos.sk/metody/stihla-vyroba-lean/rychle-pretypovanie-smed/>.

BAUER, M. a kol., 2012. *Kaizen. Cesta ke štíhlé a flexibilní firmě.* Brno: BizBooks. 193 s. ISBN 978-80-265-0029-2.

BHAMU, J., SINGH SANGWAN, K. 2014. Lean manufacturing: literature review and research issues. *International Journal of Operations & Production Management*. Vol. 34 No. 7, s. 876-940, 2014. [online]. [cit. 2020-09-13]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1108/IJOPM-08-2012-0315>.

BICHENO, J. a HOLWEG, M. 2016. *The Lean Toolbox: A handbook for lean transformation.* Buckingham: Picsie Books, 342 s. ISBN 978-0-9568307-5-3.

BIRMINGHAM, F. a JELINEK, J. 2007. *Commiting to Quick Changeover*. In *Quick Changeover Simplified: The Manager´s Guide to Improving Profits with SMED.* New York : Productivity Press, s. 7-14. ISBN 978-1-56327-349-0.

BOLEDOVIČ, Ľ. 2018. *SMED (Single Minute Exchange of Dies).* IPA Slovakia. [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné na internete: <https://www.ipaslovakia.sk/clanok/smed-single-minute-exchange-of-dies>.

BOLEDOVIČ, Ľ. 2017. *Plytvanie. IPA Slovakia.* [online]. [cit. 2019-12-10]. Dostupné na internete: <https://www.ipaslovakia.sk/sk/ipa-slovnik/plytvanie>.

BURIETA, J. 2013. *Praktická ukážka školiacich materiálov metódy Single Minute Exchange of Die.* [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné na internete: <http://www.slideshare.net/AlzbetaSlapkova/smed-skracovanie-casov-pretypovania-vyrobnych-zariadeni>.

ČERKALA, P. a POTOCZKY, S. 2012. Druhy plytvania v rôznych prostrediach a možnosti ich eliminácie. *Transfer inovácií.* 23/2012, s. 179-180. ISSN 1337-7094. Dostupné na internete: <https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/23-2012/pdf/179-180.pdf>.

ČERVINKA, M. 2013. *Štíhla výroba.* [online]. [cit. 2019-11-24] Dostupné na internete: <https://www.stihlavyroba.sk/2013/02/plytvanie.html>.

IPA Slovakia. 2017. IPA SLOVNÍK. SMED. [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné na internete: <https://www.ipaslovakia.sk/clanok/smed>.

JIRÁSEK, J. 1998. *Štíhla výroba.* Praha, Grada Publishing. 232 s. ISBN 80-7169-394-4.

JOSHI, R. R. a NAIK, G. R. 2012. Application of SMED Methodology - A Case Study in Small Scale Industry. *International Journal of Scientific and Research Publications.* Volume 2, Issue 8, 2012. ISSN 2250-3153.

KORMANEC, P. a kol. 2008. SMED. Žilina, IPA Slovakia. 42 s. ISBN 978-80-89667-07-9.

KOŠTURIAK, J. a kol. 2006. *Štíhlý a inovatívní podnik.* Praha: Alfa Publishing, 237 s. ISBN 80-86851-38-9.

KOŠTURIAK, J. 2006. *Štíhly podnik – móda alebo nevyhnutnosť?* IPA Slovakia. [online]. [cit. 2020-13-06]. Dostupné na internete: <https://www.ipaslovakia.sk/clanok/stihly-podnik-moda-alebo-nevyhnutnost>.

LIKER, J. K. 2008. *Tak to delá Toyota.* Praha, Management Press, 390 s. ISBN 978-80-7261-173-7.

McGEE-ABE, J. 2015. *The 8 Deadly Lean Wastes − DOWNTIME*. Pex online, [online]. [cit. 2020-13-06]. Dostupné na internete: <https://www.processexcellencenetwork.com/business-transformation/articles/the-8-deadly-lean-wastes-downtime>.

NENADÁL, J. a kol. 2008. *Moderní manažment jakosti.* Praha, Management Press, 377 s. ISBN 978-80-726-1186-7.

ONDRA, P. 2017. *SMED: Projektový přístup k zavádění* [online]. [cit. 2020-13-07]. Dostupné na internete: <http://www.prumysloveinzenyrstvi.cz/smed-4-projektovy-pristup-k-zavadeni/>.

RAŠKOVÁ, S. 2020. Návrh uplatnenia vybraných nástrojov štíhlej výroby v podniku Novares Slovakia Automotive s.r.o. Diplomová práca. 2020.

SAYER, N. a WILLIAMS, B. 2012. *Lean For Dummies.* Hoboken, John Wiley & Sons, 408 s. ISBN 978-1-118-11756-9.

SOUSA, E., SILVA, F. J. G., FERREIRA, L. P., PEREIRA, M. T., GOUVEIA, R. a SILVA, R. P. 2018. Applying SMED methodology in cork stoppers production. *Procedia Manufacturing.* Volume 17, 2018, Pages 611-622. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.103>.

STEVENSON, W. 2008. *Operations management*. New York, McGraw – Hill/Irwin. 906 s. ISBN 978-0-07-337784-1.

SUTHERLAND, J. a BENNETT, B. 2007. *The Seven Deadly Wastes of Logistics: Applying Toyota Production System Principles*, Lehigh University Center for Value Chain Research, [online]. [cit. 2020-13-07]. Dostupné na internete: <http://www.distributiongroup.com/articles/SevenWastesofLogistics.pdf>.

Schaeffler Slovensko, spol. s r. o., Skalica

HKS Forge, spol. s r. o., Trnava

Eiben, spol. s r. o., Vlkanová

Novares Slovakia Automotive, spol. s r. o., Zavar

prof. Ing. Peter Šugár, CSc., doc. Ing. Dagmar Babčanová, PhD.
doc. Ing. Jozef Bílik, PhD., doc. Ing. Henrieta Hrablik Chovanová, PhD.
Ing. Lukáš Jurík, PhD., Ing. Michaela Kritikos, PhD.
Ing. Marcel Kuruc, PhD., Ing. Barbora Ludrovcová
Ing. Ján Petrovič, PhD., Ing. Simona Rašková
Ing. Marek Šmida, doc. Ing. Jana Šugárová, PhD.
Ing. Lukáš Zahnaš, Ing. Patrik Žilínek

PROBLÉMOVO ORIENTOVANÉ ÚLOHY Z OBLASTI OBRÁBANIA, TVÁRNENIA, ZVÁRANIA A RIADENIA PODNIKOVÝCH PROCESOV

Vydala Slovenská technická univerzita v Bratislave vo Vydavateľstve SPEKTRUM STU, Bratislava, Vazovova 5, v roku 2021.

Edícia vedeckých monografií

Rozsah 237 strán, 237 obrázkov, 49 tabuliek, 15,100 AH, 15,415 VH, 1. vydanie, edičné číslo 6093, tlač ForPress NITRIANSKE TLAČIARNE, s. r. o.

85 – 227 – 2021

ISBN 978-80-227-5134-6