

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave

Evidenčné číslo: MTF-104237-103467

Úpravy aktívnych častí tvárniacich nástrojov

Diplomová práca

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave

Evidenčné číslo: MTF-104237-103467

Úpravy aktívnych častí tvárniacich nástrojov

Diplomová práca

Študijný program: výrobné technológie a výrobný manažment

Študijný odbor: strojárstvo

Školiace pracovisko: Ústav výrobných technológií

Vedúci záverečnej práce: doc. Ing. Jana Šugárová, PhD.



ZADANIE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Študent: **Bc. Alexander Gula**
ID študenta: 103467
Študijný program: výrobné technológie a výrobný manažment
Študijný odbor: strojárstvo
Vedúca práce: doc. Ing. Jana Šugárová, PhD.
Vedúci pracoviska: doc. Ing. Ivan Buranský, PhD.
Miesto vypracovania: MTF STU so sídlom v Trnave

Názov práce: **Úpravy aktívnych častí tvárniacich nástrojov**

Jazyk, v ktorom sa práca vypracuje: slovenský jazyk

Špecifikácia zadania:

- 1 Materiály funkčných častí tvárniacich nástrojov
- 2 Úpravy povrchových vrstiev funkčných častí tvárniacich nástrojov
- 3 Analýza vlastností boridovaných povrchov

Termín odovzdania diplomovej práce: 21. 04. 2024
Dátum schválenia zadania diplomovej práce: 14. 02. 2024
Zadanie diplomovej práce schválil: prof. Ing. Peter Šugár, CSc. – garant študijného programu

POĎAKOVANIE

Moje úprimné poďakovanie náleží vedúcej práce – Doc. Ing. Jane Šugárovej, PhD. za jej odborné rady, trpezlivosť a úsilie ktoré mi venovala. Veľká vďaka náleží takisto Doc. Ing. Márii Hudákovej, PhD. , Ing. Jane Ptačinovej, PhD., Ing. Milanovi Haršáňimu a Ing. Matejovi Pašákovi, PhD. za odborné rady a pomoc pri praktickej časti diplomovej práce.

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

SÚHRN

GULA, Alexander : ÚPRAVY AKTÍVNYCH ČASTÍ TVÁRNIACICH NÁSTROJOV (Diplomová práca). Slovenská technická univerzita v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta; Ústav výrobných technológií. Vedúci diplomovej práce: Doc.Ing. Jana Šugárová, PhD.; Trnava, MTF STU, 2024 , počet strán: 74

Diplomová práca sa zaoberala v teoretickej časti nástrojovým materiálom ktoré majú využitie v technológií tvárnenia , možnosťami ich povrchovej úpravy a metódami hodnotenia ich tribologických vlastností. V praktickej časti sa diplomová práca zaoberala difúznym boridovaním 2 nástrojových materiálov s označením K605 (STN 19 614) a K100 (STN 19 436) pri rozličných parametroch a následnej analýze týchto materiálov z hľadiska hrúbky boridickej vrstvy, mikrotvrdosti a adhézneho kvality vzniknutých boridických vrstiev (Mercedes test).

Kľúčové slová : Nástrojové materiály, tribológia, boridovanie, tvárnenie , povrchové úpravy

ABSTRACT

GULA, Alexander: ADJUSTMENTS OF ACTIVE PARTS OF FORMING TOOLS (Diploma thesis). Slovak Technical University in Bratislava, Faculty of Materials Technology; Institute of Production Technologies. Thesis supervisor: doc.Ing. Jana Šugárová, PhD.; Trnava, MTF STU, 2024, Number of pages : 74

The diploma thesis dealt in the theoretical part with tool materials that are used in forming technologies, the possibilities of their surface treatment and methods of evaluating their tribological properties. In the practical part, the diploma thesis dealt with the diffusion boriding of 2 tool materials with the designation K605 (STN 19 614) and K100 (STN 19 436) at various parameters and the subsequent analysis of these materials in terms of the thickness of the boride layer, microhardness and adhesion quality of the resulting boride layers (Mercedes test).

Keywords : Tool materials, tribology, boriding, forming, surface treatments

OBSAH	
ZOZNAM PRÍLOH.....	9
ZOZNAM V PRÁCI POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK.....	10
ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV.....	11
ZOZNAM TABULIEK.....	13
ÚVOD.....	14
1. MATERIÁLY FUNKČNÝCH ČASTÍ TVÁRNIACICH NÁSTROJOV.....	16
1.1 Nástrojové materiály.....	16
1.2 Nástrojové ocele.....	17
1.2.1 Nástrojové uhlíkové ocele.....	17
1.2.2 Nástrojové legované ocele.....	18
1.2.3 Rýchlorezné ocele.....	20
1.3 Spekané karbidy.....	21
1.4 Cermety.....	22
1.5 Stelity.....	23
1.6 Keramika.....	23
2. ÚPRAVY POVRCHOVÝCH VRSTIEV FUNKČNÝCH ČASTÍ TVÁRNIACICH NÁSTROJOV.....	24
2.1 Opatrebenie nástrojov na tvárnenie.....	25
2.1.1 Adhézne opotrebenie.....	26
2.1.2 Abrazívne opotrebenie.....	27
2.2 Možnosti povrchových úprav nástrojov.....	28
2.2.1 Povrchové kalenie.....	28
2.2.2 Chemicko-tepelné spracovanie materiálov.....	29
2.2.3 Povlakovanie.....	32
2.3 Metódy hodnotenia tribologických vlastností.....	34
3. ANALÝZA VLASTNOSTÍ BORIDOVANÝCH POVRCHOV.....	37

3.1	Boridovanie vzoriek K605 a K100	38
3.2	Parametre boridovania vzoriek	40
3.3	Metalografická príprava vzoriek.....	41
3.4	Mikroštruktúrna analýza vzoriek po boridovaní.....	43
3.5	Hrúbka boridickej vrstvy	45
3.6	Mikrotvrdosť HV 0,1	53
3.7	Mercedes Test	60
ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV PRAKTICKEJ ČASTI PRÁCE		65
ZÁVER		68
BIBLIOGRAFICKÉ ODKAZY :		69

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha A – Namerané hodnoty hrúbky boridickej vrstvy

Príloha B – Namerané hodnoty mikrotvrdosti (Materiál K605)

Príloha C – Namerané hodnoty mikrotvrdosti (Materiál K100)

ZOZNAM V PRÁCI POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

HRC	tvrdosť meraná metódou Rockwella
HV 0,1	tvrdosť meraná metódou Vickersa so zaťažением 100 pondov
HK	tvrdosť meraná metódou Knoopu
Hm.%	hmotnostné percentá
Obj.%	objemové percentá
HSSs	rýchlorezné ocele
TRIP	ocle s martenzitickou premenou vyvolanou plastickou deformáciou
SEM	rastrovací elektrónový mikroskop
CHTS	chemicko-tepelné spracovanie
SK	spekané karbidy
PVD	fyzikálny spôsob tvorenia povlaku vo vákuu
CVD	chemický spôsob tvorenia povlaku vo vákuu
Ra	stredná aritmetická odchýlka povrchu
P80-P1200	zrornosť brúsnych kotúčov
CE5AM	Centrum excelentnosti 5-osového obrábania
NO	Nástrojové ocele
ZM	Základný materiál
DZ	Difúzna zóna
Fe ₂ B, FeB	Boridické intermediárne fázy

ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV

Obrázok 1 Príklad použitia legovaných ocelí - progresívny lisovací nástroj s funkčnými časťami z Cr-V nástrojovej ocele Vanadis 6 (Jurči, Ptačinová 2022)	19
Obrázok 2 Typické aplikácie rýchlorezných ocelí (Wang 2023)	20
Obrázok 3 Výrobky zo spekaného karbidu pre rôzne aplikácie (Konyashin 2022)	21
Obrázok 4 Vplyv prísad na vlastnosti cermetov (Jurko 2006)	22
Obrázok 5 Píla na drevo so stelitovým návarom (Jurči, Ptačinová 2022)	23
Obrázok 6 Jednotlivé parametre pôsobiace na životnosť tvárniaceho nástroja (Zdravecká)	25
Obrázok 7 Mechanizmus adhézneho opotrebenia (Jurči, Ptačinová 2022)	26
Obrázok 8 Schéma dvojtelesového (vľavo) a trojtelesového opotrebenia (vpravo) (Jurči, Ptačinová 2022)	27
Obrázok 9 Parametre a vlastnosti tribologického systému na povlakovanom materiáli ktoré ovplyvňujú účinnosť tribológie (Zdravecká)	35
Obrázok 10 Tribologické testy reprezentujúce podmienky trenia v oblasti ťahania plechov : a) čap na rovinnom disku (Pin on disc) , b) skúška natáhovania cez polomer , c) Ťahanie pri tangenciálnom stlačení, d) ťahanie pri ohybe , e) rovinné ťahanie (strip-drawing test) f) ťahanie cez obrubu (draw-bead test) g) Ťahanie cez polomer (strip-tension test) , h) hemisférické ťahanie , i) Ťahanie pri redukcii hrúbky (Strip-reduction test) (Trzepiecinski 2019)	36
Obrázok 11 Elektrická pec MLM	38
Obrázok 12 Difúzne boridovanie vzoriek K605 A K100 v tuhom prostredí.....	39
Obrázok 13 Kovová platňa ktorá je po stranách uzavretá hygienickou vatou.....	40
Obrázok 14 Automatický lis značky Buehler - Simplimet 1000	42
Obrázok 15 Mokrú brúsenie vzoriek na prístroji Buehler EcoMet 300.....	42
Obrázok 16 Ukážka mikroštruktúry materiálu K605 , Vzorky K644 po boridovaní (10 Hodín, 1050 °C) pri 25- násobnom zväčšení.....	43
Obrázok 17 Ukážka mikroštruktúry materiálu K100 , Vzorky K144 po boridovaní (10 Hodín, 1050 °C) pri 25 – násobnom zväčšení	44
Obrázok 18 Ukážka mikroštruktúry materiálu K100, vzorky K111 po boridovaní (4 Hodiny, 900 °C) pri 50 – násobnom zväčšení	45
Obrázok 19 Svetelný metalografický mikroskop ZEISS JENA NEOPHOT 32	45

Obrázok 20 Ukážka merania hrúbky boridickej vrstvy pri vzorke K144 pri 25 – násobnom zväčšení.....	46
Obrázok 21 Vývoj hrúbky boridickej vrstvy materiálu K605 z hľadiska stúpajúcej teploty boridovania pri zachovaní konštantného času boridovania (Modrá farba).....	47
Obrázok 22 Vývoj hrúbky boridickej vrstvy materiálu K605 z hľadiska stúpajúceho času boridovania pri zachovaní konštantnej teploty boridovania (Modrá farba)	49
Obrázok 23 Vývoj hrúbky boridickej vrstvy materiálu K100 z hľadiska stúpajúcej teploty boridovania pri zachovaní konštantného času boridovania (Modrá farba).....	50
Obrázok 24 Vývoj hrúbky boridickej vrstvy materiálu K100 z hľadiska stúpajúceho času boridovania pri zachovaní konštantnej teploty boridovania (Modrá farba)	52
Obrázok 25 mikrotvrdomer Zeiss Jena Neophot 21	53
Obrázok 26 Ukážka merania mikrotvrdoti na vzorke K144	54
Obrázok 27 Vývoj merania tvrdosti materiálu K605 z hľadiska stúpajúcej teploty boridovania pri zachovaní konštantného času boridovania	55
Obrázok 28 Vývoj merania tvrdosti materiálu K605 z hľadiska stúpajúceho času boridovania pri zachovaní konštantnej teploty boridovania	56
Obrázok 29 Vývoj merania tvrdosti materiálu K100 z hľadiska stúpajúcej teploty boridovania pri zachovaní konštantného času boridovania	58
Obrázok 30 Vývoj merania tvrdosti materiálu K100 z hľadiska stúpajúceho času boridovania pri zachovaní konštantnej teploty boridovania	59
Obrázok 31 Adhézne (A) a Kohézne (K) triedy poškodenia (Sosnová, Hájek, Kříž 2006)	60
Obrázok 32 Rastrovací elektrónový mikroskop vo vákuovom prostredí - JEOL JSM-7600F	61
Obrázok 33 Snímky vtlačkov vzoriek K100 boridovaných pri a) 4 hodiny 900 °C b) 10 hodín 900 °C c) 4 hodiny 1050 °C d) 10 hodín 1050 °C , Použité zväčšenie – 80x	62
Obrázok 34 Snímky vtlačkov vzoriek K605 boridovaných pri a) 4 hodiny 900 °C b) 10 hodín 900 °C c) 4 hodiny 1050 °C d) 10 hodín 1050 °C , Použité zväčšenie – 80x	63

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1 Vybrané ocele podľa I.E. Campos-Silvu a ich povrchová tvrdosť boridickej vrstvy (Campos-Silva 2015)	31
Tabuľka 2 Počet vyrazených mincí - štúdia spoločnosti STATON, s.r.o.....	33
Tabuľka 3 Chemické zloženie vzoriek z nástrojovej ocele K605 (BÖHLER Slovakia)...37	
Tabuľka 4 Chemické zloženie vzoriek z nástrojovej ocele K100 (BÖHLER Slovakia)...38	
Tabuľka 5 Parametre boridovania vzoriek K605 a K100	41
Tabuľka 6 Materiál K605 - Vypočítaná priemerná hrúbka boridickej vrstvy a chyby merania vzoriek pri ktorých stúpala teplota boridovania pri zachovaní konštantného času boridovania (4 hodiny).....	47
Tabuľka 7 Materiál K605 - Vypočítaná priemerná hrúbka boridickej vrstvy a chyby merania vzoriek pri ktorých stúpala čas boridovania pri zachovaní konštantnej teploty boridovania. (900 °C).....	48
Tabuľka 8 Materiál K100 - Vypočítaná priemerná hrúbka boridickej vrstvy a chyby merania vzoriek pri ktorých stúpala teplota boridovania pri zachovaní konštantného času boridovania (4 hodiny).....	50
Tabuľka 9 Materiál K100 - Vypočítaná priemerná hrúbka boridickej vrstvy a chyby merania vzoriek pri ktorých stúpala čas boridovania pri zachovaní konštantnej teploty boridovania. (900 °C).....	51
Tabuľka 10 Materiál K605 – Priemerné hodnoty tvrdosti a chyba merania vzoriek pri ktorých sa postupne zvyšovala teplota boridovania pri konštantnom čase boridovania.	54
Tabuľka 11 Materiál K605 – Priemerné hodnoty tvrdosti a chyba merania vzoriek pri ktorých sa postupne zvyšoval čas boridovania pri konštantnej teplote boridovania	56
Tabuľka 12 Materiál K100 – Priemerné hodnoty tvrdosti a chyba merania vzoriek pri ktorých sa postupne zvyšovala teplota boridovania pri konštantnom čase boridovania.	57
Tabuľka 13 Materiál K100 – Priemerné hodnoty tvrdosti a chyba merania vzoriek pri ktorých sa postupne zvyšoval čas boridovania pri konštantnej teplote boridovania	58
Tabuľka 14 Ekonomicky a úžitkovo optimálne parametre boridovania ocelí K605 a K100	67

ÚVOD

Technológií tvárnenia patrí v modernom priemysle veľmi významné postavenie a zaraďuje sa medzi odvetvie, ktoré vďaka rôznorodosti a zložitosti tvarov výtvarkov, ale aj požiadaviek na mechanické alebo fyzikálne vlastnosti výtvarkov neustále napreduje a vyvíja sa. Automobilový priemysel, letecký priemysel, biomedicína ale aj tie najbežnejšie pomôcky v domácnostiach každého človeka sú závislé práve od technológie tvárnenia.

Práve rôznorodosť typov nástrojov pri procesoch tvárnenia a tým aj odlišné pracovné podmienky v jednotlivých aplikáciách môžu predstavovať pri výbere materiálu pre tvárniaci nástroj nemalý problém. Materiál nástrojov pre tvárnenie výraznou mierou ovplyvňuje celý chod výrobného procesu a má taktiež obrovský dopad na kvalitu finálnych výrobkov. Vybraný materiál tvárniaceho nástroja teda musí zaručiť dostatočnú životnosť a vhodné mechanické a fyzikálne vlastnosti na to, aby finálne výrobky boli čo najkvalitnejšie a výrobný proces čo najefektívnejší.

Diplomová práca sa bude v 1. kapitole zaoberať teoretickým vymedzením nástrojových materiálov a oblastiam ich použitia. Bežnejšie používané legované alebo uhlíkové nástrojové ocele, ale aj iné konštrukčné materiály ako napríklad keramika alebo spekané karbidy sú materiály, ktoré majú v oblastiach nástrojových materiálov nemalé zastúpenie.

Po vhodnom výbere materiálového nástroja je ďalšia veľká otázka smerovaná na vhodnú povrchovú úpravu. Práve povrchová úprava môže dodať nástroju potrebné vlastnosti na to, aby sa veľkou mierou zvýšila jeho odolnosť proti opotrebeniu a životnosť. Práve opotrebeniu a hodnotením tribologických vlastností tvárniacich nástrojov a ich následnej modifikácií pomocou povrchových úprav je témou, ktorej sa bude diplomová práca venovať v 2. kapitole.

V praktickej časti sa bude diplomová práca zaoberať chemicko-tepelným spracovaním (boridovaním) 2 konštrukčných materiálov ktoré sa používajú v oblasti tvárniacich nástrojov - K605 a K100 (STN 19 614 , STN 19 436) a ich podrobnej analýze. Vzorky z týchto materiálov sa budú najskôr boridovať pri rôznych parametroch boridovania (teplota boridovania, čas boridovania) , následne sa bude na vzorkách vykonávať metalografická príprava , ukážka mikroštruktúr a napokon aj analýza vlastností materiálov po boridovaní. Konkrétne sa budú vzorky z týchto materiálov testovať na adhéznou kvalitu boridických

vrstiev (Mercedes test) , ďalej bude vyhodnocovaná dosiahnutá hodnota hrúbky boridickej vrstvy a taktiež aj mikrotrvosť vzoriek z týchto materiálov.

1. MATERIÁLY FUNKČNÝCH ČASTÍ TVÁRNIACICH NÁSTROJOV

Prvá kapitola diplomovej práce sa bude zameriavať na teoretický prehľad nástrojových materiálov, na ich oblasti použitia a na ich jednotlivé vlastnosti.

1.1 Nástrojové materiály

Základným využitím nástrojových materiálov je predovšetkým výroba nástrojov. Mnohokrát majú však nástrojové materiály využitie aj na iné aplikácie, kde je potrebné zabezpečiť vysokú pevnosť nástroja a dobrú odolnosť proti opotrebeniu. Nástrojové materiály možno podľa ich chemického zloženia rozdeliť do štyroch skupín : (Jurči, Ptačinová 2022)

- Nástrojové ocele : uhlíkové ocele, nízko a stredne legované ocele, rýchlorezné a ledeburitické ocele ,
- spekané karbidy,
- stelity,
- rezná keramika a iné nekovové materiály – diamanty , tvrdé žiaruvzdorné zlúčeniny

Vyrobiteľnosť a vhodné úžitkové vlastnosti predstavujú všeobecné požiadavky na materiály nástrojov. Z hľadiska vyrobiteľnosti by mal byť nástroj vyrobiteľný dosiahnuteľnými technológiami obrábania, tepelného spracovania a pod. Z hľadiska úžitkových vlastností by malo použitie nástroja dbať na prevládajúce mechanizmy degradácie. (Jurči, Ptačinová 2022)

Medzi úžitkové vlastnosti možno zaradiť : (Jurči , Ptačinová 2022)

- Pevnosť – schopnosť materiálu odolávať zmenám tvaru a rozmerov (plastická deformácia)
- Tvrdosť – odolnosť materiálu proti vnikaniu cudzích telies.
- Odolnosť proti popúšťaniu, tepelná stabilita – schopnosť príslušného nástroja zachovať svoje vlastnosti aj pri zvýšených teplotách.
- Rezná schopnosť – schopnosť nástroja obrábať obrobky.
- Odolnosť voči korózii – schopnosť materiálu odolávať chemickým reakciám so spracovávaným materiálom a aj vonkajším prostredím.

1.2 Nástrojové ocele

Nástrojová oceľ možno zaradiť do triedy uhlíkových alebo legovaných ocelí, ktoré majú primárne využitie pri výrobe nástrojov vrátane rezných nástrojov, matric, ručných nástrojov, nožov a iných. Existuje viacero druhov nástrojových ocelí, pričom použitie jednotlivých druhov závisí od typu aplikácie. Väčšinový podiel týchto materiálov tvoria ocele, ktoré sa podrobujú tepelnému spracovaniu za účelom získania vysokej tvrdosti a majú strednú až vysokú koncentráciu uhlíka ($> 0,5\%$). (Zambrano 2023)

Chemickým zložením sa nástrojové ocele podobajú bežnejším oceliam s tým rozdielom, že majú vyšší podiel uhlíkových a karbidotvorných prvkov. Špecifické vlastnosti týchto ocelí potom určuje použitie širokej škály legujúcich prvkov. Medzi tieto vlastnosti možno zaradiť odolnosť proti opotrebeniu, tvrdosť, pevnosť a húževnatosť. Nástrojové ocele sa vo vysokej miere využívajú pri výrobe priemyselných produktov, vďaka čomu sú v oblasti výrobných technológií považované ako životne dôležité. (Essam 2023)

Kľúčovú úlohu vo výrobnom procese zohrávajú nástrojové ocele určené pre prácu za studena a to najmä pri aplikáciách razenia, dierovania alebo jemného strihania. Tieto aplikácie vystavujú ocele náročným prevádzkovým podmienkam. Spôsob a mechanizmus zlyhania nástroja závisí od faktorov ako spôsob výroby, pracovné podmienky, dizajn nástroja alebo od typu samotného materiálu. (Yarasu 2023)

Medzi typické mechanické vlastnosti nástrojových ocelí určených pre prácu za studena možno zaradiť vysokú tvrdosť (50 – 66 HRC), vysokú odolnosť proti opotrebeniu (Menej ako 20 mg/min), nízku rázovú húževnatosť a vysokú pevnosť v tlaku. (Essam 2023)

1.2.1 Nástrojové uhlíkové ocele

Medzi ocele ktoré sa vyrábajú s odstupňovaným obsahom uhlíka možno zaradiť nástrojové uhlíkové ocele. Vyrábajú sa s obsahom uhlíka od 0,6 hm. % C (Podeutektoidné ocele) až do približne 1,5 hm. % C. (Jurči , Ptačinová 2022)

Prítomnosť uhlíka v oceli výraznou mierou ovplyvňuje jeho mechanické vlastnosti vrátane pevnosti, tvrdosti alebo ťažnosti. Zvýšenie obsahu uhlíka zvyšuje mechanickú pevnosť a tvrdosť, ale znižuje ťažnosť a zvárateľnosť uhlíkovej ocele. (Sotoodeh 2022)

Ocele s nižším a stredným obsahom uhlíka do 0,6 hm. % C (Pedeutektoidné ocele) sa využívajú pri nástrojoch, ktoré nevyžadujú špeciálne požiadavky na tvrdosť a iné mechanické vlastnosti. Môžu to byť napr. Držiaky, lacné skrutkovače alebo svorky. Eutektoidné uhlíkové ocele majú využitie ako ručné náradie pri aplikáciách opracovania dreva, na kladivá, pilníky a niektoré druhy klieští. Nadeutektoidné uhlíkové ocele majú potom využitie pri nožniciach na strihanie plechov ktoré majú nižšiu pevnosť, na píly alebo vrtáky do dreva. (Jurči , Ptačinová 2022)

Medzi uhlíkové nástrojové ocele ktoré sú vhodné pre nástroje na tvárnenie možno podľa Jurka zaradiť napríklad uhlíkovú nástrojovú ocel' **STN 19 132** , ktorá má využitie pri technológiách tvárnenia na tvárnenie za tepla aj studena a taktiež na strihacie nástroje. Podobnou alternatívou je aj uhlíková nástrojová ocel' **STN 19 191** ktorá má taktiež využitie pri nástrojoch na strihanie a tvárnenie. (Jurko 2006)

1.2.2 Nástrojové legované ocele

Uhlíkové ocele do ktorých boli zámerné pridané malé percentá legujúcich prvkov ako je napríklad chróm alebo vanád, sa nazývajú legované ocele. Pridanie legovacích prvkov do ocele výraznou mierou modifikuje vlastnosti ocelí a sú teda vhodnejšie pre špecifickejšie aplikácie ako u obyčajných uhlíkových ocelí. (Simmons, 2020)

Medzi najbežnejšie prvky ktoré sa pridávajú na výrobu legovanej ocele sú chróm, molybdén, nikel, mangán, kremík, bór alebo vanád. Existujú 2 typy legovaných ocelí : (Yuan, 2021)

- Nízkolegovaná ocel' – Obsah uhlíka je nižší ako 0,25% a často nižší ako 0,15% pre špeciálne aplikácie zvarovania. Medzi najbežnejšie legovacie prvky patria chróm, nikel, molybdén, kremík, mangán, vanád a bór. Medzi menej bežné možno zaradiť meď, titán, volfrám, hliník, kobalt, cín alebo zirkónium. Na zvýšenie prekaliteľnosti a zvýšenie odolnosti proti korózií sa často využíva práve nízkolegovaná ocel'.
- Vysokolegovaná ocel' – Obsahuje viac ako 8% rôznych legujúcich prvkov iných ako železo alebo uhlík. Vysokolegovaná ocel' je tvorená minimálne z 2 prvkov a vlastnosti ocele výraznou mierou závisia od percenta prítomných prvkov v oceli. Vysokolegovaná ocel' je veľmi spoľahlivá a má vysokú odolnosť voči korózií.

Obrázok 1 predstavuje príklad použitia legovaných nástrojových ocelí v oblastiach tvárnenia – progresívny lisovací nástroj (Jurči, Ptačinová 2022)



Obrázok 1 Príklad použitia legovaných ocelí - progresívny lisovací nástroj s funkčnými časťami z Cr-V nástrojovej ocele Vanadis 6 (Jurči, Ptačinová 2022)

Ako príklady legovaných ocelí ktoré sa používajú ako nástroje pre tvárnenie možno uviesť tie od firmy BÖHLER : (BÖHLER Slovakia)

- BÖHLER K110 – (STN 19 573) – Je ledeburitická nástrojová oceľ so značným obsahom chrómu a uhlíka, má využitie ako vysokovýkonné strižné nástroje (matrice, razníky) , ťažné alebo pretláčacie nástroje.
- BÖHLER K490 MICROCLEAN (Špeciálna norma BÖHLER) je oceľ s veľkým obsahom chrómu vyrábaná metódou práškovej metalurgie ktorá má využitie ako nástroj pre lisovanie za studena (Strihacie nástroje, strihacie valce, nástroje pre presné strihanie) a taktiež na tvárnenie za studena (pretláčacie nástroje, razidlá, valcovacie trne..)
- BÖHLER K340 ISODUR (Špeciálna norma BÖHLER) – je nástrojová oceľ používaná pre prácu za studena s vysokým obsahom chrómu, táto nástrojová oceľ sa používa na strižné a lisovacie nástroje , na ohýbacie nástroje , raziace nástroje ale aj na meradlá alebo komponenty strojov.

1.2.3 Rýchlorezné ocele

Rýchlorezné ocele (High-speed steels - HSSs) , patria do špeciálnej kategórie nástrojových ocelí, ktoré sa v súčasnosti používajú na rôzne druhy aplikácií v priemyselnej praxi. Štruktúra rýchlorezných ocelí je typicky charakterizovaná značným množstvom karbidických prvkov (Až do 50% celkového objemu) distribuovaných v temperovanej martenzitickej matici, vďaka čomu majú rýchlorezné ocele výnimočnú povrchovú tvrdosť, odolnosť proti opotrebeniu a odolnosť voči tvoreniu trhlín únavovými zaťažzeniami pri normálnych, ale aj zvýšených teplotách. Rýchlorezné ocele sa vo veľkej miere používajú pre súčiastky odolné voči opotrebovaniu ako sú rezné nástroje, nástroje na valcovanie alebo ložiská – Obrázok 2 (Wang 2023)

Rýchlorezné ocele taktiež patria do skupiny ledeburitických ocelí. Okrem uhlíka (C) , sú legované volfrámom (W) , molybdénom (Mo) , vanádom (V) , kobaltom (Co) a ďalšími legovacími prvkami , ktoré sú známe svojou schopnosťou vytvárať karbidy. Vlastnosti rýchlorezných ocelí veľmi závisia od typu, množstva a veľkosti týchto karbidov. (Liu 2022)



Obrázok 2 Typické aplikácie rýchlorezných ocelí (Wang 2023)

Ako príklad možno uviesť rýchlorezné ocele od firmy BÖHLER, ktoré majú využitie pre nástroje na tvárnenie : (BÖHLER Slovakia)

BÖHLER S590 MICROCLEAN (DIN / EN < 1.3244) – Táto rýchlorezná ocel' vyrobená práškovou metalurgiou sa používa pre nástroje na obrábanie, ale využitie má taktiež pre nástroje pre prácu za studena ako sú strižné nástroje pre presné strihanie materiálov s vysokou pevnosťou, ale aj na lisovanie a tvárnenie.

BÖHLER S790 MICROCLEAN (DIN / EN < 1.3345 >) – Táto rýchlorezná oceľ vyrobená práškovou metalurgiou má využitie ako nástroj pre výstružníky, frézy, vrtáky ale aj pre strižníky, tvárniky, matrice alebo nástroje pre lisovanie a pretláčanie.

1.3 Spekané karbidy

Spekané karbidy (SK) možno zaradiť do špeciálnej triedy kovokeramických kompozitných materiálov ktoré sú charakteristické kombináciou veľmi vysokej pevnosti, tvrdosti, lomovej húževnatosti a odolnosti proti opotrebeniu. Mikroštruktúra spekaných karbidov je tvorená keramickými zrnami, WC zrnami a spojivom – tuhý roztok volfrámu a uhlíka v kobalte, prípadne v inom spojive v množstve od 3 do 30 obj. % , pričom je v niektorých prípadoch možné spojivo legovať rôznymi prvkami ako Ta, Cr alebo V. Typické výrobky zo spekaného karbidu znázorňuje Konyashin na obrázku 3. (Konyashin 2022)

Spekané karbidy sa v priemyselnej praxi aplikujú hlavne v oblastiach obrábania – nástroje ako sú frézy, vrtacie hlavice alebo vymeniteľné rezné doštičky. Taktiež majú využitie v oblasti tvárnenia a ako konštrukčný materiál pre diely ktoré sú tepelne exponované. (Jurči, Ptačinová 2022)



Obrázok 3 Výrobky zo spekaného karbidu pre rôzne aplikácie (Konyashin 2022)

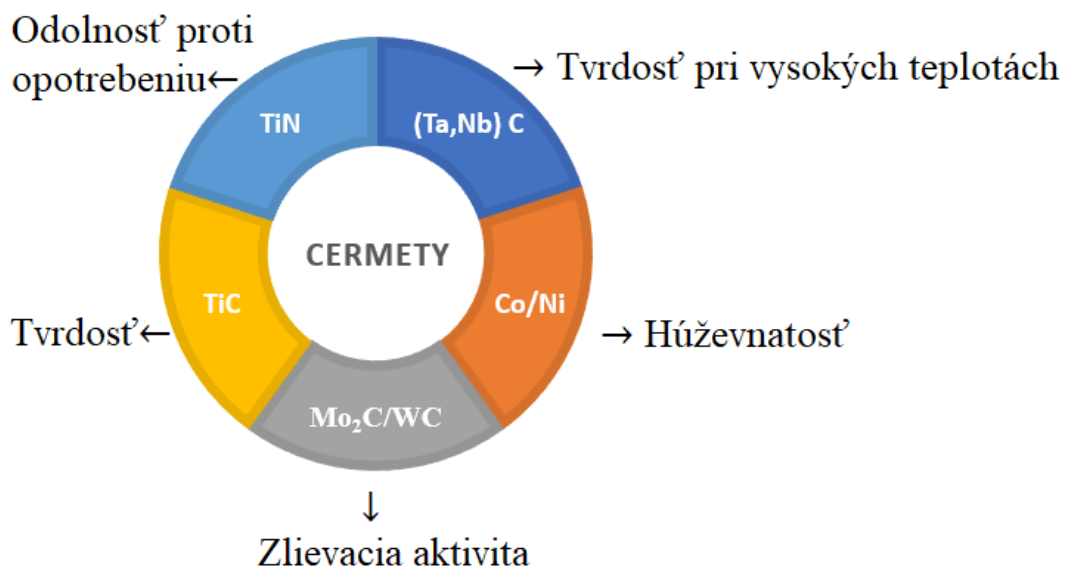
1.4 Cermety

Cermety možno zaradiť do série kompozitných materiálov, ktoré sú tvorené vysokým obsahom keramickej a kovovej zložky. Keramická zložka dodáva materiálu vynikajúcu tvrdosť, pevnosť, výbornú odolnosť voči korózií a celkovému opotrebeniu. Kovová zložka dodáva materiálu výbornú húževnatosť a dobrú tepelnú vodivosť. Práve pre túto jedinečnú zmes vlastností majú cermety veľmi široké využitie najmä ako rezné nástroje, pre súčiastky odolné voči vysokej teplote, ale aj pri vysokoteplotných povlakoch alebo na lisovacie nástroje. (Lei 2023)

Keramická zložka cermetov typicky pozostáva z karbidov, nitridov, oxidov, boridov a kremičitanov. Kovové prvky ako Nb , Cr , Ti, Ta, Al Ni, Mo a Fe a ich zliatiny sa potom používajú ako kovové spojivo. (Aramian 2023)

Vplyv jednotlivých prvkov na cermety vysvetľuje Jurko na obrázku 4.(Jurko 2006)

Prvá Generácia cermetov bola na báze WC-Co a práve cermety na báze WC s rôznymi typmi spojív sa používajú už takmer storočie a vďaka svojej výnimočnej kombinácii modulu pružnosti, húževnatosti, tvrdosti, pevnosti a odolnosti proti opotrebeniu sú aj v dnešnej dobe považované za nadmieru spoľahlivé materiály. (Aramian 2023)

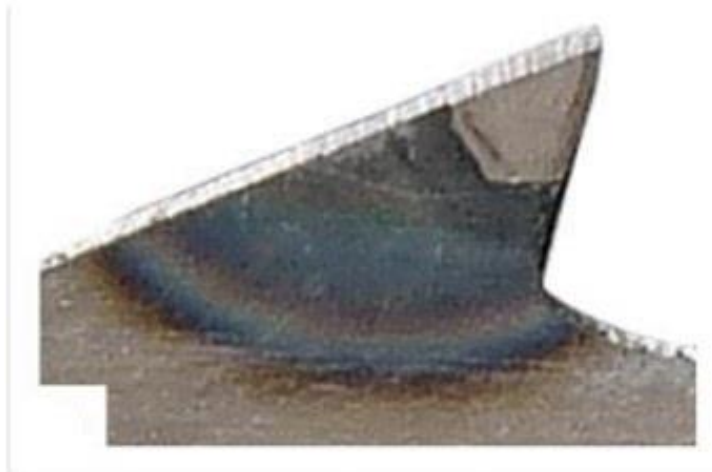


Obrázok 4 Vplyv prísad na vlastnosti cermetov (Jurko 2006)

1.5 Stelity

Stelity možno zaradiť medzi skupinu superzliatin na báze kobaltu (Co) s vysokým obsahom chrómu (Cr) okolo 20 – 30 hm. % , ďalej menším obsahom volfrámu (W) 4 – 18 % hm. % alebo molybdénu (Mo) a určitého podielu uhlíka (C) , zvyčajne okolo 0, 25 – 3 hm. % , ktoré sú spevňované precipitáciou karbidov uložených v matici tuhého roztoku kobaltu. Tieto karbidy poskytujú zliatinám stelitu vynikajúcu odolnosť proti opotrebovaniu. (Yao 2018)

Medzi najvýznamnejšiu nevýhodu stelitov možno zaradiť ich veľkú krehkosť. Z tohoto dôvodu teda tieto zliatiny ani pri vyšších teplotách nemožno tvárniť a považujú sa za neobrobiteľné. Výhodou zliatin stelitu je na druhú stranu vyššia tvrdosť oproti väčšine konvenčných rýchlorezných ocelí. Použitie stelitov je limitované na naváranie za účelom opravy nástrojov (obrázok 5) – plazmovým striekaním stelitovými práškami. (Jurči, Ptačinová 2022)



Obrázok 5 Píla na drevo so stelitovým návarom (Jurči, Ptačinová 2022)

1.6 Keramika

Keramiku možno zaradiť medzi skupinu kryštalických materiálov na báze anorganických zlúčenín ktoré majú nekovový charakter. Nedávnym výskumom sa tomuto krehkému materiálu podarilo zvýšiť húževnatosť , aby bolo možné tento materiál používať v strojárskkej praxi. (Jurči, Ptačinová 2022)

Keramické materiály sú zvyčajne tvrdé a chemicky nereaktívne. Medzi ďalšie vlastnosti možno zaradiť napríklad vysokú odolnosť proti oderu, vynikajúcu tepelnú stabilitu, chemickú inertnosť, rozmerovú stálosť a dobré vlastnosti pre vysokorýchlostné obrábanie. (Kurian 2023)

Vďaka svojim charakteristickým vlastnostiam majú keramické materiály široké využitie v priemyselnej praxi, a to napr. pri tepelných aplikáciách kde sa vyžaduje odolnosť voči vysokým teplotám, pri mechanických aplikáciách kde sa uplatňuje vysoká odolnosť proti opotrebeniu a vysoká tvrdosť, pri fyzikálnych a chemických aplikáciách kde je výhodou zase chemická inertnosť keramiky. Medzi ďalšie oblasti použitia možno zaradiť napr. elektrotechniku, medicínu alebo stavebníctvo. (Jurko 2006)

Klasifikácia reznej keramiky : (Jurči, Ptačinová 2022)

1) Oxidová keramika

- Čistá (Al_2O_3 99,5%) ,
- polozmes ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2 + \text{CoO}$) ,
- zmiešané ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2 + \text{TiC}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC} + \text{TiN}$)

2) Nitridová keramika

- (Si_3N_4 , $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Y}_2\text{O}_3$, $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{TiN}$)

Prvá kapitola sa zaoberala teoretickým vymedzením nástrojových materiálov, ich vlastnostiam a použitiu. V práci sú teoreticky vymedzené materiály ako uhlíkové ocele, rýchlorezné ocele, legované ocele, spekané karbidy, cermety, stelity alebo keramika. Z dostupných literárnych zdrojov možno skonštatovať, že pre technológiu tvárnenia sa používajú tvárniace nástroje vyrobené predovšetkým z legovaných nástrojových ocelí, čo je ekonomicky veľmi výhodná alternatíva so širokým spektrom dostupných modifikácií vďaka použitiu rôznych legujúcich prvkov.

2. ÚPRAVY POVRCHOVÝCH VRSTIEV FUNKČNÝCH ČASTÍ TVÁRNIACICH NÁSTROJOV

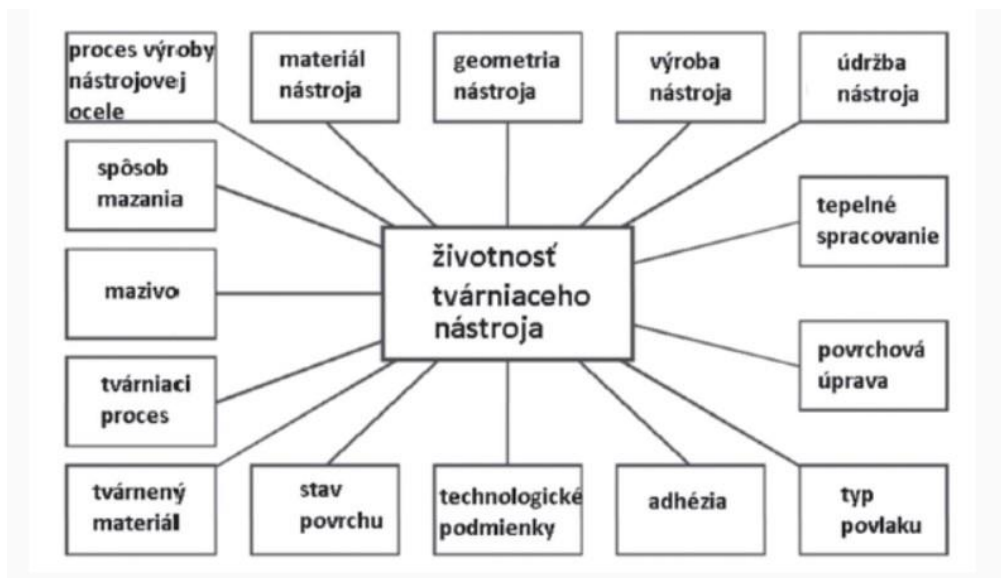
Nasledujúca kapitola diplomovej práce poukazuje na opotrebenia tvárniacich nástrojov a ich životnosť pri aplikáciách v technológií tvárnenia. Ďalej sa v kapitole poukazuje na metódy hodnotenia tribologických vlastností a rôzne typy povrchových úprav tvárniacich nástrojov s cieľom zníženia opotrebenia a zlepšenia mechanických, ale aj fyzikálnych vlastností tvárniaceho nástroja.

2.1 Opatrebenie nástrojov na tvárnenie

Pojem opotrebenie možno označiť ako trvalú nežiadúcu zmenu povrchu, rozmerov alebo tvaru pevných telies, ktorá sa šíri postupne. Spôsobuje ju interakcia funkčného povrchu s prostredím ktoré spôsobuje opotrebenie, poprípade ju môže spôsobovať samotné spolupôsobenie dvoch alebo viacerých funkčných povrchov. Mechanické odstraňovanie alebo redistribúcia častíc z opotrebovaného povrchu sú hlavné prejavy opotrebenia. Medzi meradlá opotrebenia patrí úbytok materiálu, prípadne zmena kvality a tvaru funkčného povrchu nástroja alebo súčiastky. (Jurči, Ptačinová 2022)

Tvárnenie kovov zahŕňa relatívny pohyb medzi nástrojom a obrobkom pri veľmi vysokých kontaktných tlakoch, čo môže viesť k silnému opotrebovaniu nástroja a ohrozuje stabilitu výrobného procesu a kvalitu finálneho produktu. Pri nástrojoch na tvárnenie kovov je koniec životnosti nástroja často spojený so zvýšením drsnosti konečného produktu a s prenosom materiálu z tohto produktu na povrch nástroja. Trenie a opotrebovanie pri tvárnení sú výsledkom relatívneho klzania medzi nástrojom a obrobkom počas tvárnenia, ktorého nerovnosti sú v priamom kontakte pri vysokých kontaktných tlakoch. (Tavares 2021)

Medzi základné parametre ktoré môžu ovplyvňovať životnosť samotného nástroja na tvárnenie možno zaradiť nielen mazanie, technologické podmienky alebo údržbu nástroja ale aj proces výroby samotnej nástrojovej ocele. Na všetky parametre ktoré ovplyvňujú životnosť tvárniaceho nástroja poukazuje Zdravecká na obrázku č.6.



Obrázok 6 Jednotlivé parametre pôsobiace na životnosť tvárniaceho nástroja (Zdravecká)

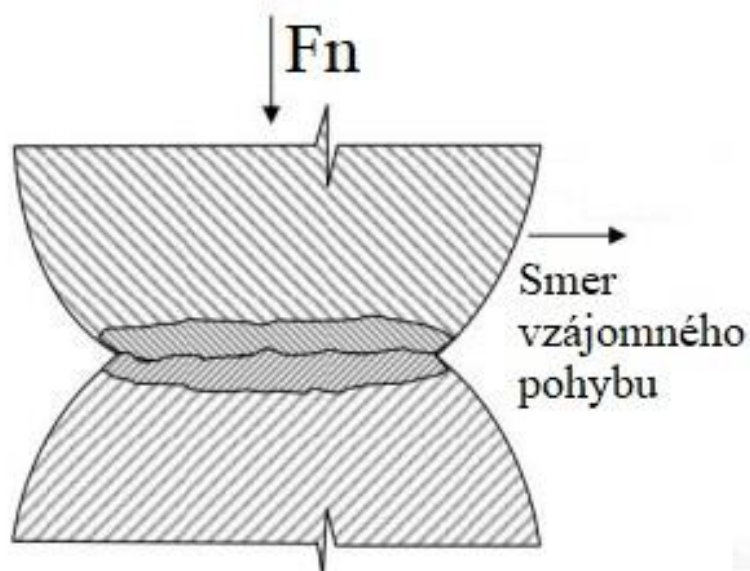
Druhy opotrebenia môžeme podľa Jurčiho a Ptačinovej rozdeliť na : (Jurči, Ptačinová 2022)

- Adhézne
- Abrazívne
- Vibračné
- Erozívne
- Kavitácia
- Únava

2.1.1 Adhézne opotrebenie

Adhézne opotrebenie je výsledkom mikrospojov ktoré sú spôsobené spojením protiľahlých drsností na trecích povrchoch častí, ktoré sú v kontakte. Zaťaženie aplikované na kontaktné nerovnosti je také vysoké, že sa deformujú a pri vytváraní adhéznych spojov k sebe priľnú. Ak potom dôjde k relatívnemu pohybu kontaktných plôch, dôjde k pretrhnutiu mikrospojov a k následnej strate materiálu. (Pouzada 2021)

Mechanizmus adhézneho opotrebenia vysvetľuje Jurči a Ptačinová na obrázku 7.



Obrázok 7 Mechanizmus adhézneho opotrebenia (Jurči, Ptačinová 2022)

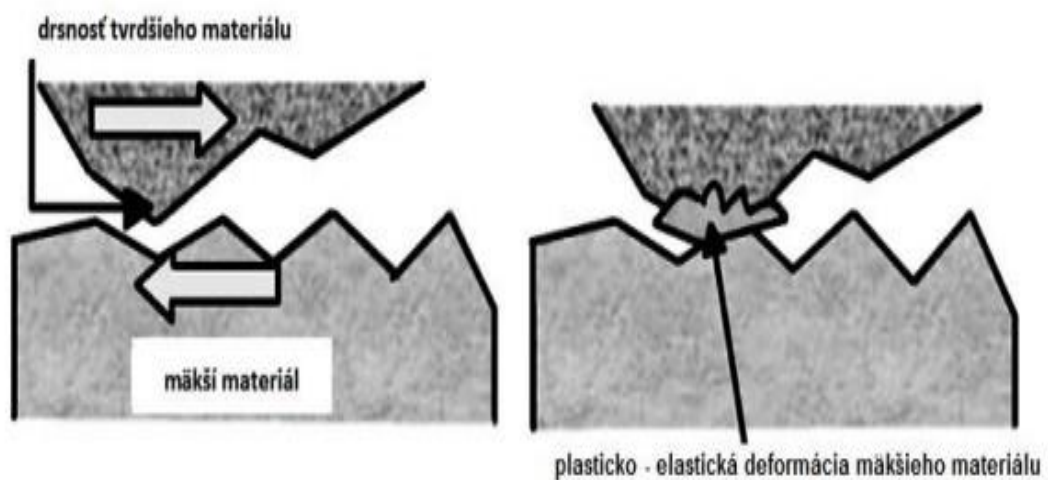
V priemyselnej praxi možno potom rozsah adhézneho opotrebenia redukovať aplikáciou lubrikantov. Ak použitie lubrikantov nie je možné, adhézne opotrebenie možno redukovať zvýšením tvrdosti materiálov, alebo použitím nástrojových ocelí ktoré obsahujú vyšší obsah karbidov. Samotný rozsah tohto opotrebenia potom závisí od výberu dvojice

materiálov a je priamo úmerný klzným podmienkam a zaťaženiu a nepriamo úmerný k tvrdosti materiálu. (Jurči, Ptačinová 2022)

2.1.2 Abrazívne opotrebenie

Abrazívne opotrebenie patrí medzi najčastejšie sa vyskytujúce mechanizmy opotrebovania v priemyselnej praxi. Môže byť spôsobené prítomnosťou tvrdých častíc medzi 2 vzájomnými trecími povrchmi, ktoré odstraňujú materiál z oboch povrchov, alebo sa tieto tvrdé častice môžu usadiť v mäkkom povrchu a odstraňovať materiál z protíľahlého telesa. Tento druh abrazívneho opotrebovania sa nazýva trojtelesové abrazívne opotrebovanie. Abrazívne opotrebenie pri ktorom sa nerovnosti tvrdého povrchu zarývajú do mäkkšieho povrchu protikusy a vytvárajú častice úlomkov sa nazýva dvojtelesové abrazívne opotrebenie. V reálnych podmienkach praxe je najčastejšie pozorovanou formou opotrebovania kombinácia opotrebovania dvomi a tromi telesami. (Sarath 2023)

Mechanizmus abrazívneho (Dvojtelesového a trojtelesového) opotrebenia vysvetľuje Jurči a Ptačinová na obrázku 8.



Obrázok 8 Schéma dvojtelesového (vľavo) a trojtelesového opotrebenia (vpravo) (Jurči, Ptačinová 2022)

V priemyselnej praxi nemožno abrazívne opotrebenie úplne eliminovať. Existuje však veľa rôznych metód ktorými sa dá toto opotrebenie redukovať. Jednou z možností je použitie rôznych tesnení, ktoré môžu znížiť vstup cudzích častíc a prachu do konštrukčného celku. Ďalšou alternatívou môže byť výroba tvrdších povrchov materiálov pomocou kalenia, boridovania, nauhličovania , prípadne fyzikálnymi technikami naparovania. Ďalšou možnosťou je aj použitie TRIP ocelí , ktoré majú tvrdú a oteruvzdornú povrchovú vrstvu pri mechanickom zaťažení. (Jurči, Ptačinová 2022)

2.2 Možnosti povrchových úprav nástrojov

V súčasnej dobe existuje mnoho rôznych technologických alternatív, pomocou ktorých môžeme doceliť spevnenie kovových súčiastok či už zvýšením ich pevnosti, tvrdosti alebo odolnosti proti opotrebeniu. Operácie ako napríklad povrchové alebo objemové kalenie, tvárnenie za studena, vytvrdzovanie, chemicko-tepelné spracovanie, tepelno-mechanické spracovanie, aplikácie termických nástrekov, práškovou metalurgiou alebo výroba kompozitných materiálov patria medzi alternatívy, s ktorými je možné takéto spevnenie a zlepšenie mechanických vlastností dosiahnuť. (Hazlinger 2022)

2.2.1 Povrchové kalenie

Povrchové kalenie je proces úpravy kovových povrchov, ktorého cieľom je vytvorenie homogénnej štruktúry zrn, ktorá má tendenciu zvyšovať ich fyzikálno-chemické a mechanické vlastnosti. Ide hlavne o zvyšovanie tvrdosti, odolnosti proti opotrebeniu, zvyšovanie životnosti materiálu a zlepšenie mikroštruktúrných vlastností. Povrchové kalenie sa delí predovšetkým na fyzikálne a chemické metódy. Proces fyzikálneho vytvrdzovania zahŕňa metódy indukcie, plameňa, ochladzovania elektrolytu a naparovania. Chemické metódy potom zahŕňajú nitridáciu, difúzne spracovanie, cementáciu kovov, nauhličovanie a chemické vylučovanie z pár. (Senthil 2023)

Pri aplikáciách povrchového kalenia nie je potrebné ohrievať celý objem materiálu, nakoľko sa kalenie aplikuje len na povrch materiálu. Medzi najvýznamnejšie výhody tejto aplikácie možno zaradiť : (Hazlinger 2022)

- nižšia energetická náročnosť,
- zmenšenie náchylnosti súčiastok na deformácie,
- jemnozrnné mikroštruktúry vrstiev,
- šetrenie materiálov nakoľko používané sú predovšetkým uhlíkové ocele,
- čistejšie pracovné prostredie,
- ekologickejšia prevádzka.

Z kategórie najviac používaných ocelí, pre ktoré sa aplikujú metódy povrchového kalenia patria medzi najviac spoľahlivé predovšetkým uhlíkové ocele , pri ktorých nevznikajú trhliny spôsobené ohrevom a ochladzovaním materiálu. Sú to hlavne ocele s koncentráciou uhlíka od 0,4 % až 0,5 %. Výhodou týchto ocelí je aj docielenie značnej

povrchovej tvrdosti. Legované kalené ocele majú potom využitie pri aplikáciách ktoré vyžadujú značnú húževnatosť a pevnosť, sú to predovšetkým ocele legované prvkami niklu, vanádu, molybdénu alebo chrómu. (Gábrišová 2019)

Po kalení súčiastok je obyčajne nasledujúcou operáciou popúšťanie. Hlavným zmyslom procesu popúšťania je dosiahnutie finálnych vlastností súčiastok ako sú húževnatosť, pevnosť a tvrdosť. Z Hľadiska použitej teploty možno popúšťanie členiť na :

(Jurči, Ptačinová 2022)

- Nízkoteplotné (Do 200 °C) – Využitie má najmä pre nauhličené a následne kalené ocele , uhlíkové nástrojové ocele alebo ložiskové ocele.
- Strednoteplotné (300 – 350 °C) – Oproti nízkoteplotnému popúšťaniu výraznejšou mierou klesá tvrdosť, využitie má najmä pri pružinových oceliach.
- Vysokoteplotné (400 – 650 °C) – Pri vysokoteplotnom popúšťaní sa zvyšuje húževnatosť a klesá tvrdosť ocelí, tento typ popúšťania sa zvyčajne používa na konštrukčné ocele ktoré majú stredný obsah uhlíka. (0,3 – 0,5 hm.%)
- Popúšťanie na sekundárnu tvrdosť - Zmyslom tohto typu popúšťania je dosiahnutie sekundárnej tvrdosti ocele, vo veľa prípadoch je táto tvrdosť vyššia ako tvrdosť po kalení.

2.2.2 Chemicko-tepelné spracovanie materiálov

Proces chemicko-tepelného spracovania materiálov (CHTS) je metóda, pomocou ktorej je možné dosiahnuť zmenu chemického zloženia povrchu kovových materiálov a zliatin. Účelom chemicko-tepelného spracovania je predovšetkým získanie lepších chemických, fyzikálnych a mechanických vlastností spracovávaného materiálu – táto operácia sa najčastejšie používa za účelom zvýšenia odolnosti proti opotrebeniu a zvýšenia tvrdosti materiálu. (Hazlinger 2022)

Nauhličovanie

Nauhličovanie alebo cementáciu možno zaradiť medzi najbežnejšiu chemicko-tepelnú úpravu materiálu. Zahŕňa zohrievanie nízkouhlíkovej ocele v prostredí bohatého na uhlík – uhlík je difúzne sýtený na povrch ocele takže materiál získa povrchovú vrstvu s vysokým obsahom uhlíka, ktorá má vyššie hodnoty tvrdosti ako jadro s nižším obsahom

uhlíka. Tvrdosť tejto vrstvy môže byť okolo $HRC = 60$, pričom povrch zostáva húževnatý a tvárny, takže materiál odoláva značnému únavovému namáhaniu. (Groover 2010)

Medzi hlavné ciele nauhličovania súčiastok vyrobených z kovov (predovšetkým ocelí) možno zaradiť predovšetkým zlepšenie tvrdosti súčiastok, zvýšenie ich pevnosti, odolnosti proti opotrebovaniu, nosnosti a únavovej pevnosti súčiastok. (Edenhofer 2015)

Medzi ocele na nauhličovanie možno zaradiť napríklad ocele triedy 14 (Napr. DIN 16MnCr5) , ktoré sa používajú na výrobu ozubených kolies. Ďalšou možnosťou sú ocele triedy 16 ktoré sa používajú pri aplikáciách namáhaných prevodov v ťažiarenskom alebo automobilovom priemysle. (Jurči, Ptačinová 2022)

Nitridovanie

Proces nitridovania možno zaradiť medzi chemicko-tepelné metódy spracovania, pri ktorom je povrch ocele difúzne obohacovaný dusíkom. Hlavným účelom nitridácie je získanie značnej tvrdosti povrchu a húževnatého jadra materiálu. Medzi vlastnosti ktoré je možné nitridovaním dosiahnuť možno zaradiť : (Hazlinger 2022)

- Zvýšenie povrchovej tvrdosti,
- ochrana súčiastok voči korózií a kavitácií,
- dosiahnutie značnej odolnosti proti mechanickému opotrebeniu,
- pri oceliach možnosť dosiahnutia vysokej medzi únavy,
- zvýšenie odolnosti proti zadieraniu,
- zníženie negatívneho účinku vrubov.

Medzi ocele vhodné na nitridovanie možno zaradiť konštrukčné ocele triedy 31CrMo9 a 41CrAlMo7. Veľmi vhodné sú taktiež vysokolegované nástrojové ocele – predovšetkým chromové ledeburitické a ledeburitické nástrojové ocele. (Jurči, Ptačinová 2022)

Karbonitridovanie

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

V priemyselnej praxi má karbonitridovanie využitie pre komponenty v automobilovom priemysle, predovšetkým komponenty prevodoviek ako sú ozubené kolesá, vypínacie páky alebo čapy. (Hazlinger 2022)

Boridovanie

Boridovanie je proces chemicko-tepelného spracovania, ktorý sa používa na vytvorenie výnimočne tvrdej boridickej vrstvy. Vďaka výnimočnej tvrdosti a nízkemu koeficientu trenia je táto vrstva mimoriadne odolná voči opotrebeniu. Boridovanie možno aplikovať na väčšinu železných materiálov ale taktiež aj na neželezné materiály alebo cermety. Pri boridovaní sa atómy bóru difundujú do povrchovej vrstvy materiálu a tým vzniká boridická vrstva. (Winter 2015)

Tabuľka 1 predstavuje výslednú povrchovú tvrdosť vybraných boridovaných ocelí podľa Camposa-Silvu.

Tabuľka 1 Vybrané ocele podľa I.E. Camposa-Silvu a ich povrchová tvrdosť boridickej vrstvy (Campos-Silva 2015)

BORIDOVANÁ OCEL	POVRCHOVÁ TVRDOSŤ BORIDICKEJ VRSTVY
AISI 1018	2250 HK
AISI 1040	1500 HV
AISI P20	1650 HV
AISI H13	1650-2000 HV
AISI 4140	1397-1848 HV
AISI 4340	2000 HK
AISI W1	1690-1800 HV
AISI 316	1700 HV
AISI 304	2100 HK

Aplikácie boridovania v priemyselnej praxi : (Hazlinger 2022)

- Tvárniace nástroje,
- vytláčovacie nástroje termoplastických hmôt,
- prievlaky na ťahanie drôtových alebo tyčových polotovarov,
- súčiastky pracujúce v abrazívnom prostredí,
- trne využívané v sklárstve,
- formy na tlakové liatie,
- komponenty v automobilovom a traktorovom priemysle,
- komponenty textilných strojov,

2.2.3 Povlakovanie

Povlak možno definovať ako časť materiálu, ktorá je nanosená na povrch základného materiálu (substrátu) odlišujúca sa od základného materiálu chemickým a často aj fázovým zložením so zreteľne oddeleným (bezdifúznym) rozhraním.(Hazlinger 2022)

V praxi existuje množstvo technológií nanášania povlakov, najvýznamnejšie miesta však majú procesy tvorenia tenkých vrstiev z plynnej fázy, a to : (Jurko 2006)

- Fyzikálne spôsoby tvorby povlakov vo vákuu (PVD)
- Chemické spôsoby tvorby povlakov (CVD)

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

Nástroje v procesoch tvárnenia sú vystavené cyklickému rázovému zaťaženiu. Povlaky s fyzikálnym naparovaním môžu potenciálne zlepšiť životnosť takýchto nástrojov. Fyzikálne naparovanie povlakov (PVD) je v priemysle etablovaným riešením na zlepšenie funkčnosti a životnosti nástrojov. (Bobzin 2023)

Aplikácie tenkých tvrdých povlakov na tvárniace nástroje sa používajú aj na zníženie výskytu zadierania, a to zvýšením odolnosti proti opotrebovaniu a reguláciou trenia počas tvárnenia. Pri nástrojoch na tvárnenie kovov sa používa široká škála PVD povlakov a to najmä : (Tavares 2021)

- Povlaky na báze TiN,
- povlaky na báze CrN,
- povlaky na báze TiC,
- povlaky na báze TiAlN, TiCNAl,
- povlaky na báze DLC (Diamond like carbon).

Výrobca Staton ktorý sa špecializuje na povlakovanie nástrojov a ukážka životnosti vysokošpecializovaného TiCrN PVD povlaku aplikovaných na razidlách. Výsledok : Razidlo povlakované TiCrN povlakom je viac ako 9-krát účinnejšie v porovnaní s bežnými razidlami. (Tabuľka 2)

Tabuľka 2 Počet vyrazených mincí - štúdia spoločnosti STATON, s.r.o.



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

Medzi bežne používané CVD povlaky možno spomenúť napríklad tie od firmy Voestalpine : (Voestalpine)

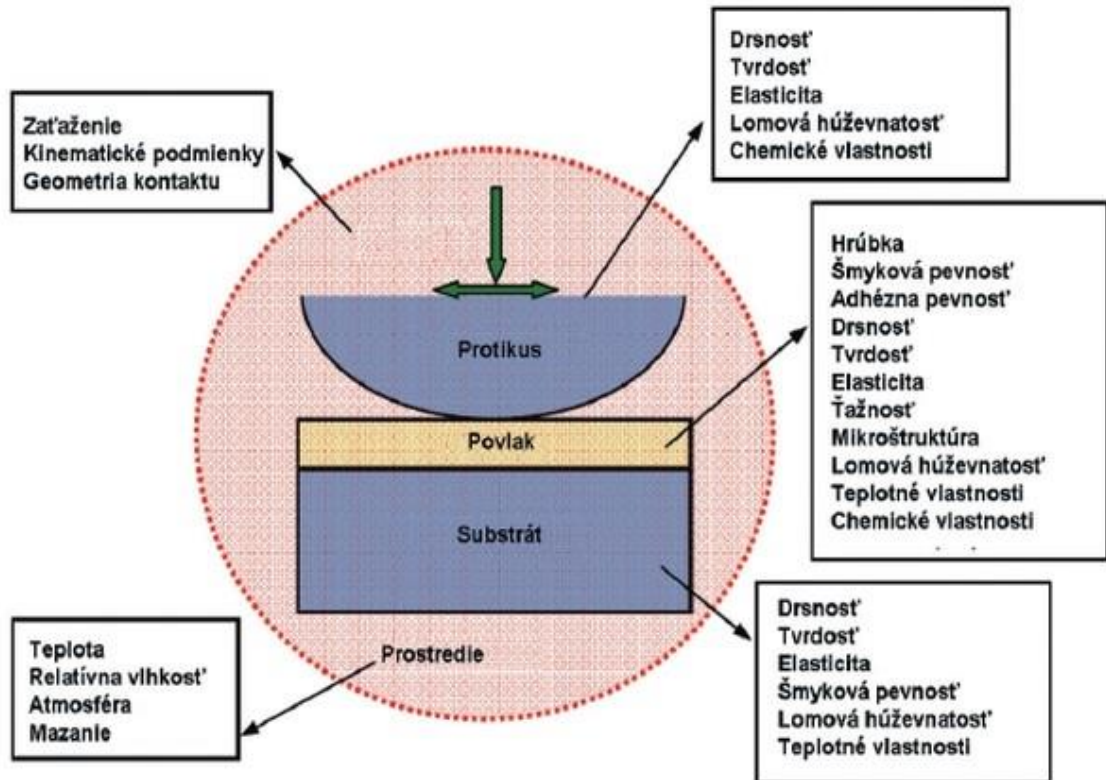
- CVD povlak na báze TiC (Karbid titánu) – Hlavnou prednosťou tohto povlaku je najmä jeho vysoká tvrdosť (Okolo 3700 HV) a dobrá priľnavosť. Využíva sa hlavne pri ťažných, lisovacích, tlakových a tvárniacich nástrojoch.
- CVD povlak na báze TiC/TiN (Karbid titánu / nitrid titánu) – Ktorého hlavná prednosť je vysoká húževnatosť a využitie má pri nástrojoch na vysekávacie a tvárniace nástroje , alebo pri obrábacích nástrojoch ako rezné doštičky.
- CVD povlak na báze TiN/TiC (Nitrid titánu / karbid titánu) – Tvrdosť sa pohybuje okolo 3000 HV – využitie má najmä pri ťažných, lisovacích, vysekávacích a tvárniacich nástrojoch.

2.3 Metódy hodnotenia tribologických vlastností

Tribológiu možno špecifikovať ako obor, ktorý sa zaoberá javmi ako sú trenie, opotrebenie a mazanie. V náväznosti na tribológiu vznikla aj tribotechnika, ktorú možno špecifikovať ako aplikáciu tribologických poznatkov v priemyselnej praxi. V prevažnej miere sa tribotechnika zaoberá praktickými postupmi ktoré redukujú, alebo optimalizujú trenie a následné opotrebenie či už nástroja alebo obrábanej súčiastky. (Hakim, Blažovský 2002)

Tribológia predstavuje jednu z najzásadnejších úloh pri tvárnení rozličných materiálov a následnej kvalite finálnych výtvarkov. Vlastnosti ako sú povrchová drsnosť tvárnených materiálov alebo tvárniacich nástrojov, ich následná modifikácia pomocou povrchových úprav ale aj typ mazania patria medzi najzásadnejšie parametre celkového tribologického výkonu. (Trzepiecinski 2019)

Parametre a vlastnosti ako napríklad drsnosť protikusu alebo substrátu, teplota prostredia a mazanie zásadnou mierou ovplyvňujú účinnosť celého tribologického systému, bližšie všetky tieto činitele ktoré ovplyvňujú účinnosť tribologického systému popisuje Zdravecká na obrázku č. 9. (Zdravecká 2010)



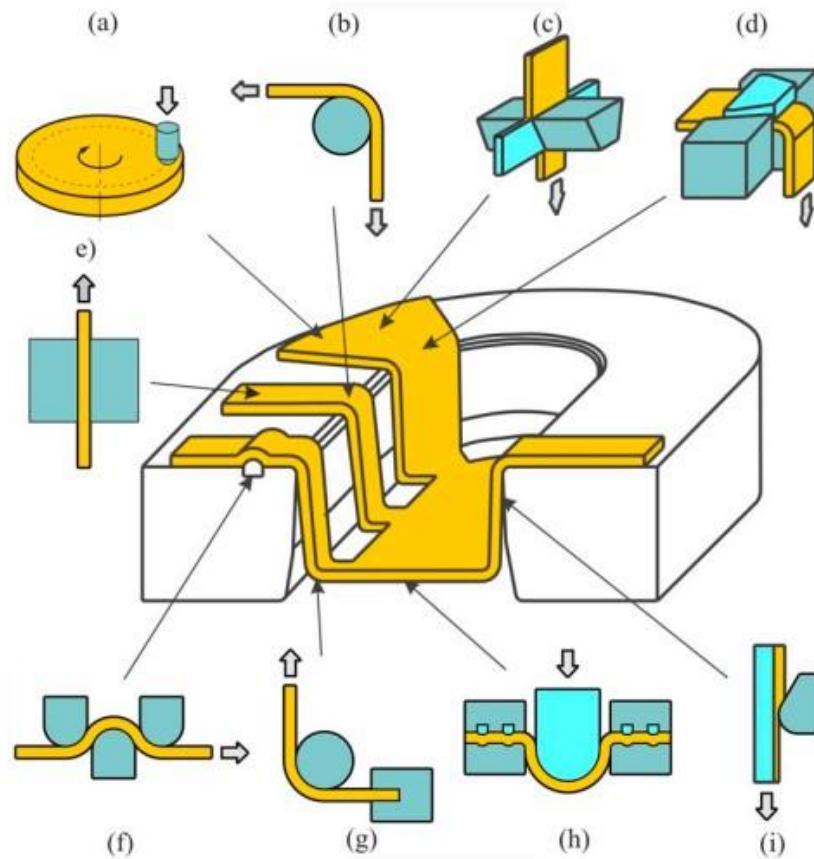
Obrázok 9 Parametre a vlastnosti tribologického systému na povlakovanom materiáli ktoré ovplyvňujú účinnosť tribológie (Zdravecká)

V procesoch plošného tvárnenia je veľmi dôležité produkovať výrobky tej najvyššej kvality a vyvarovať sa možným defektom ako sú trhliny, zmršťovanie a závažné opotrebenie nástroja. Pre túto skutočnosť je veľmi dôležité chápať a ovplyvňovať trecie podmienky nakoľko trecia sila ovplyvňuje rozloženie napätia a následnú tváriteľnosť plechu. (Trzepiecincki 2019)

Analýzu a rozbor javov trenia a získavanie následných údajov o opotrebení možno realizovať viacerými metódami – tribologickými skúškami, ktoré možno roztriediť do troch primárnych skupín : (Zdravecká, Ondáč 2012)

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

Medzi plechom a matricou sa vyskytujú v procesoch tvárnenia rôznych typov kontaktov. Na obrázku 10 Trzepiecinski dodáva prehľad simulačných skúšok, ktoré reprezentujú podmienky trenia v oblasti tvárnenia plechov. (Trzepiecinski 2019)



Obrázok 10 Tribologické testy reprezentujúce podmienky trenia v oblasti ťahania plechov : a) čap na rovinnom disku (Pin on disc), b) skúška naťahovania cez polomer , c) Ťahanie pri tangenciálnom stlačení, d) ťahanie pri ohybe , e) rovinné ťahanie (strip-drawing test) f) ťahanie cez obrubu (draw-bead test) g) Ťahanie cez polomer (strip-tension test), h) hemisférické ťahanie , i) Ťahanie pri redukcii hrúbky (Strip-reduction test) (Trzepiecinski 2019)

Druhá kapitola sa zaoberala opotrebením nástrojových materiálov, špeciálne zameraných na tvárniace nástroje, následnou modifikáciou vlastností pomocou použitia rôznych povrchových úprav a taktiež vysvetlením tribologických vlastností pri tvárnení a ich metódam hodnotenia . Medzi povrchové úpravy ktorými sa diplomová práca zaoberala možno spomenúť povrchové kalenie, chemicko-tepelné spracovanie ako nitridovanie, karbonitridovanie, nauhličovanie alebo boridovanie ale taktiež povlakovanie nástrojov. Z dostupných literárnych zdrojov možno konštatovať že ako najlepšia možnosť pre tvárniace nástroje sa javí boridovanie alebo povlakovanie a práve boridovaním materiálu sa bude diplomová práca zaoberať v jej praktickej časti.

3. ANALÝZA VLASTNOSTÍ BORIDOVANÝCH POVRCHOV

Praktická časť diplomovej práce sa bude zameriavať na chemicko-tepelné spracovanie (difúzne boridovanie) nástrojových ocelí s označením K605 (STN 19 614) a K100 (STN 19 436) pri rôznych teplotách a časoch boridovania (tabuľka 5) a následným posudzovaním ich vlastností ako sú hrúbka boridickej vrstvy, meranie mikrotvrdości boridickej vrstvy a taktiež sa budú vzorky posudzovať z hľadiska adhéznej kvality boridických vrstiev – Mercedes Test .

Skúmaný materiál K605 sa zaraďuje medzi nástrojové ocele na prácu za studena s veľmi dobrou úrovňou prekaliteľnosti a húževnatosti. Využitie má predovšetkým pri nástrojoch na tvárnenie za studena, prípadne raziace nástroje. Materiál K100 je ledeburitická chrómová oceľ, ktorá veľmi dobre odoláva rozmerovým zmenám a má taktiež využitie pri nástrojoch na tvárnenie za studena ako rozličné strižné a lisovacie nástroje, prípadne raziace nástroje všetkých druhov. (BÖHLER Slovakia)

V nasledujúcich tabuľkách sú znázornené chemické zloženia použitých nástrojových ocelí. Pri oceli K605 je najviac zastúpený chemický prvok Ni (nikel) , ktorý sa pridáva do ocelí s cieľom zvýšenia ich húževnatosti. Pri oceli K100 je najviac zastúpený chemický prvok Cr (Chróm) ktorý sa pridáva za účelom zvýšenia tvrdosti, odolnosti proti opotrebeniu a zlepšuje odolnosť ocele voči korózií. (BÖHLER Slovakia)

Tabuľka 3 Chemické zloženie vzoriek z nástrojovej ocele K605 (BÖHLER Slovakia)

Chemické zloženie	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
Obsah prvkov v %	0,55%	0,30%	0,40%	1,00%	0,25%	3,00%

Tabuľka 4 Chemické zloženie vzoriek z nástrojovej ocele K100 (BÖHLER Slovakia)

Chemické zloženie	C	Si	Mn	Cr
Obsah prvkov v %	2,00%	0,25%	0,35%	11,50%

Jednotlivé vzorky boli oddelené z tyčových polotovarov nástrojových ocelí K605 a K100. Oddelenie vzoriek prebiehalo v laboratóriách MTF STU za pomoci rovinnej brúsky. Následne boli v centre excelentnosti 5-osového obrábania CE5AM pomocou obrábacieho centra DMG Hsc 105 obrábané na veľkosť vzoriek 15x15x10 mm s parametrom drsnosti Ra = 0,8 µm. Takto pripravené vzorky sa následne mohli podrobiť boridovaniu.

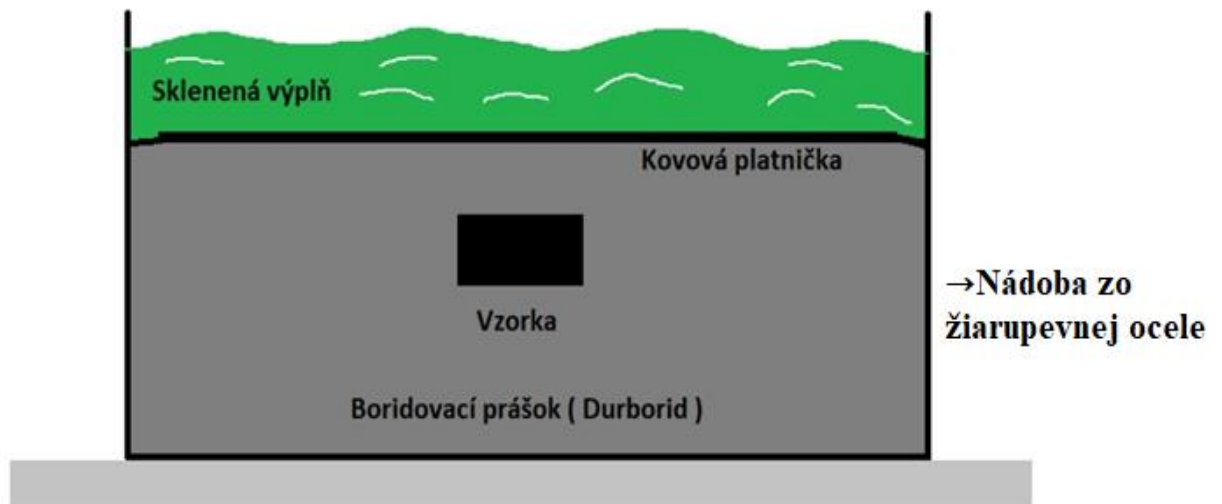
3.1 Boridovanie vzoriek K605 a K100

Samotné boridovanie vzoriek prebiehalo na ústave materiálov MTF STU so sídlom v Trnave. Vzorky boli difúzne boridované v tuhom prostredí, v elektrickej peci značky MLM, ktorá dokáže produkovať teplotu až 1200 °C. (obrázok 11)



Obrázok 11 Elektrická pec MLM

Medzi najväčšie výhody difúzneho boridovania možno zaradiť predovšetkým nenáročnosť celého procesu z hľadiska nákladov, prípadne na iné vybavenie. Ako tuhé prostredie bol použitý boridovací prášok Durborid. Ilustračné znázornenie difúzneho boridovania je vyzobrazené na obrázku 12.



Obrázok 12 Difúzne boridovanie vzoriek K605 A K100 v tuhom prostredí

Postup boridovania vzoriek :

1. Na spodok špeciálnej nádoby z materiálu žiarupevnej ocele sa do zhruba 1/4 objemu nasype boridovacia zmes v práškovej forme Durborid.
2. V nasledujúcom kroku sa do nádoby vloží predom vyleštená a odmastená vzorka. Na vyleštenie a odmastenie vzorky bol potrebný špeciálny lieh a ultrazvukový prístroj na leštenie vzoriek.
3. Vzorky sa v ďalšom kroku môžu zhruba do 3/4 nádoby zasypať boridickým práškom.
4. Na hornú hladinu prášku je v ďalšom kroku po celej ploche umiestnená kovová platňa zo žiarupevnej ocele pričom sa museli medzery medzi platňou a stenou nádoby uzavrieť pomocou hygienickej vaty. Cieľom je boridovací prášok oddeliť od okolitej atmosféry. (Obrázok 13)
5. V poslednom kroku sa zvyškový objem nádoby dosype použitím drveného skla a nádoba sa vloží do pece. Drvené sklo sa počas stúpajúcej teploty v peci roztaví a tak hermeticky uzatvorí nádobu.

6. Nádoba sa po zvolenom čase boridovania môže vybrať a nechať sa ochladzovať na vzduchu. Vzorka môže byť následne vybraná.



Obrázok 13 Kovová platňa ktorá je po stranách uzavretá hygienickou vatou.

3.2 Parametre boridovania vzoriek

Jednotlivé parametre boridovania sa určovali podľa použitého boridovacieho prostredia (Tuhé prostredie – boridická prášková zmes Durboridu). Prášková zmes Durboridu je tvorená zo 60% zloženia ferrobóru, prípadne karbidu bóru. Ďalších zhruba 37% zmesi je tvorenej mletým šamotom. Malé percento zmesi (Okolo 3%) tvorí NH_4Cl . Pre takéto boridovacie prostredie sú typické teploty boridovania od 800 až 1100 °C. Difúzne boridovaných bolo celkovo 16 vzoriek , 8 vzoriek z materiálu K605 a 8 vzoriek z materiálu K100 , obidva materiály pri 4 rôznych časoch boridovania – 4, 6 , 8 a 10 hodín a pri 4 rôznych teplotách boridovania – 900, 950, 1000 a 1050 °C.

V nasledujúcej tabuľke č.5 sú vyznačené použité parametre boridovania (Čas, teplota) pri vzorkách z nástrojovej ocele K605 a K100. Cieľom takto zvolených parametrov boridovania bolo porovnanie vzoriek na jednej strane z hľadiska stúpajúceho času boridovania a na druhej strane stúpajúcej teploty boridovania a následne tieto vzorky porovnať so vzorkou pri ktorej stúpali obidva tieto parametre. (Vzorka K644 , K144 – 10 hodín 1050 °C).

Tabuľka 5 Parametre boridovania vzoriek K605 a K100

Čas boridovania (h)	Teplota boridovania (°C)			
	900	950	1 000	1 050
4	K 605 _(K611) K 100 _(K111)	K 605 _(K612) K 100 _(K112)	K 605 _(K613) K 100 _(K113)	K 605 _(K614) K 100 _(K114)
6	K 605 _(K621) K 100 _(K121)			
8	K 605 _(K631) K 100 _(K131)			
10	K 605 _(K641) K 100 _(K141)			K 605 _(K644) K 100 _(K144)

3.3 Metalografická príprava vzoriek

Po aplikácii boridovania nasledovala metalografická príprava vzoriek. V 1. kroku bolo nutné každú vzorku pomocou kotúčovej píly značky Buehler rozrezať takým spôsobom, aby bol prístupný ich prierez. Následne boli vzorky tepelne lisované pomocou automatického lisu značky Buehler – Simplimet 1000 (obrázok 14). Na samotné lisovanie vzoriek sa použila špeciálna prášková zmes tvrdej živice Buehler EpoMet. Lisovanie prebiehalo stlačením tejto zmesi, jej ohriatím a následným ochladením.

Všetky vzorky sa po procese lisovania podrobili následnému brúseniu, lešteniu a leptaniu tak, aby sa pod mikroskopom zaručila dostatočná viditeľnosť boridickej vrstvy. Brúsenie a leštenie vzoriek sa vykonávalo za mokra na stroji Buehler EcoMet 300 (obrázok 15) s brúsnyimi metalografickými kotúčmi. Brúsenie začalo na hrubších kotúčoch so zrnitosťou P80 a následne sa postupne brúsilo na jemnejších kotúčoch o zrnitosti P280, P600 a P1200. Na každom brúsnom kotúči sa vzorky brúsili 10 minút, pričom pri každej výmene kotúčov rôznych zrnitostí sa museli vzorky opláchnuť vodou a liehom.



Obrázok 14 Automatický lis značky Buehler - Simplimet 1000



Obrázok 15 Mokrú brúsenie vzoriek na prístroji Buehler EcoMet 300

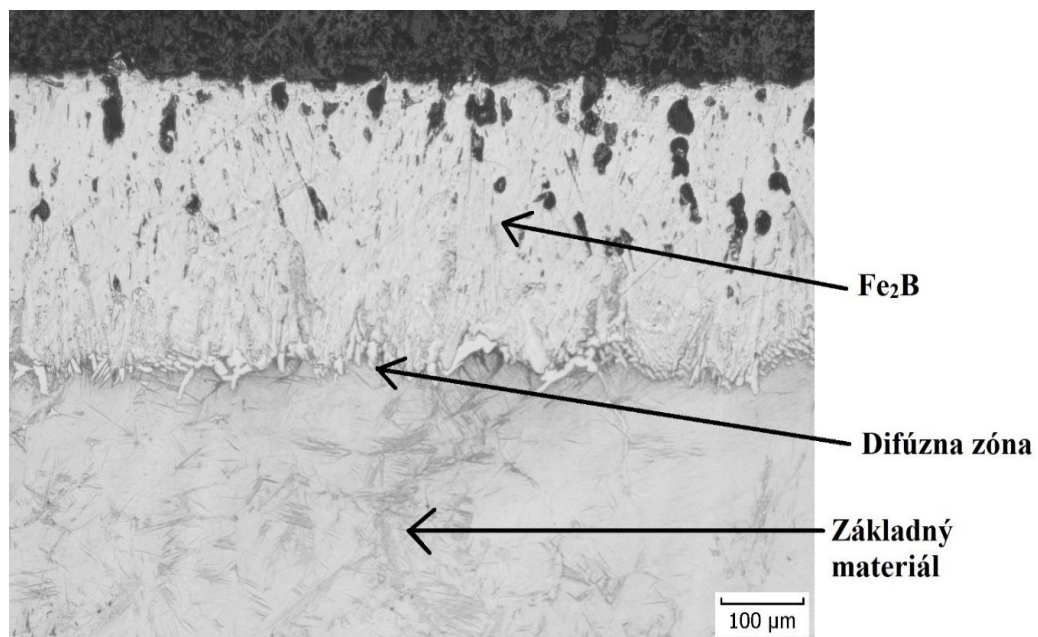
Po brúsení sa následne každá vzorka leští na semišových kotúčoch 9, 6, 3 a 1 μm s použitím diamantových pást a roztoku na zmačanie. Po každom prechode medzi jednotlivými semišovými kotúčmi sa musela vzorka opláchnuť vodou a liehom z dôvodu ochrany vzoriek proti korózií.

Po leštení bolo potrebné vzorky chemicky leptať, pričom bola ako leptadlo použitá 4%-tná kyselina pikrová (4% roztok kyseliny pikrovej v etanole). Leptanie prebiehalo po dobu 5 sekúnd pri každej vzorke. Takto pripravené vzorky sa mohli následne podrobiť mikroštruktúrnej analýze vzoriek.

3.4 Mikroštruktúrna analýza vzoriek po boridovaní

Mikroštruktúrna analýza vzoriek po boridovaní sa uskutočňovala v materiálových laboratóriách MTF STU v Trnave, a to na optickom svetelnom metalografickom mikroskope NEOPHOT 32 pri rôznych zväčšeniach.

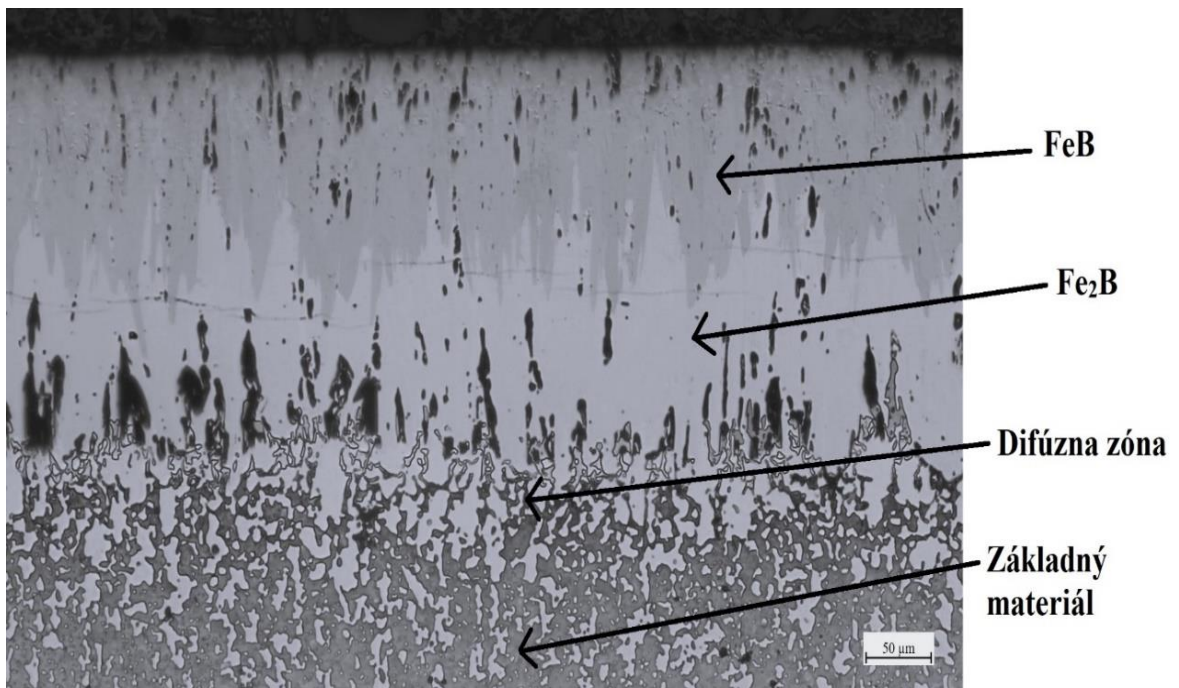
V prípade materiálu K605 sa boridická vrstva vytvorila len vo forme Fe_2B a tvrdšia súvislá boridická vrstva FeB pozorovaná nebola na žiadnej vzorke tohto materiálu. Príčinou absencie tvrdšej vrstvy môže byť chemické zloženie danej ocele ktorá významnou mierou ovplyvňuje tvorbu tejto vrstvy. Na obrázku 16 môžeme pozorovať jednotlivé vrstvy na vzorke K644 ktorá sa difúzne boridovala 10 hodín pri teplote 1050 $^{\circ}\text{C}$. Sú to boridická vrstva Fe_2B , difúzna zóna ktorá sa nachádza tesne pod boridickou vrstvou a základný materiál.



Obrázok 16 Ukážka mikroštruktúry materiálu K605, Vzorky K644 po boridovaní (10 Hodín, 1050 $^{\circ}\text{C}$) pri 25- násobnom zväčšení.

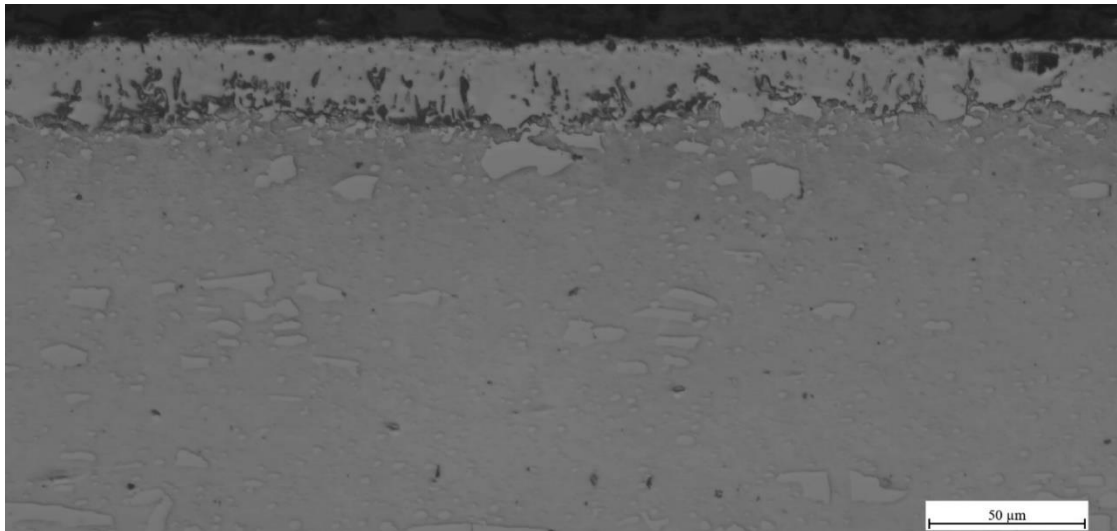
V prípade materiálu K100 sa už v mikroštruktúre vyskytla aj tvrdšia vrstva FeB a to pri teplotách 950, 1000 a 1050 °C . Pri teplote 900 °C sa v mikroštruktúre vyskytovala len vrstva Fe₂B. Na základe tohto pozorovania teda možno usúdiť, že pri tomto materiáli má práve teplota boridovania veľký vplyv na tvorbu súvislej tvrdšej vrstvy FeB.

Ukážka mikroštruktúry tohto materiálu K100 je znázornená na obrázku 17 pri vzorke K144 ktorá sa boridovala 10 hodín pri teplote 1050 °C. Pri tejto vzorke možno pozorovať aj súvislú vrstvu FeB.



Obrázok 17 Ukážka mikroštruktúry materiálu K100 , Vzorke K144 po boridovaní (10 Hodín, 1050 °C) pri 25 – násobnom zväčšení

Na obrázku 18 je vyobrazená mikroštruktúra materiálu K100 , konkrétne vzorky K111 ktorá sa boridovala 4 hodiny a 900 °C, v tomto prípade sa na vzorke súvislá vrstva FeB nevyskytla.

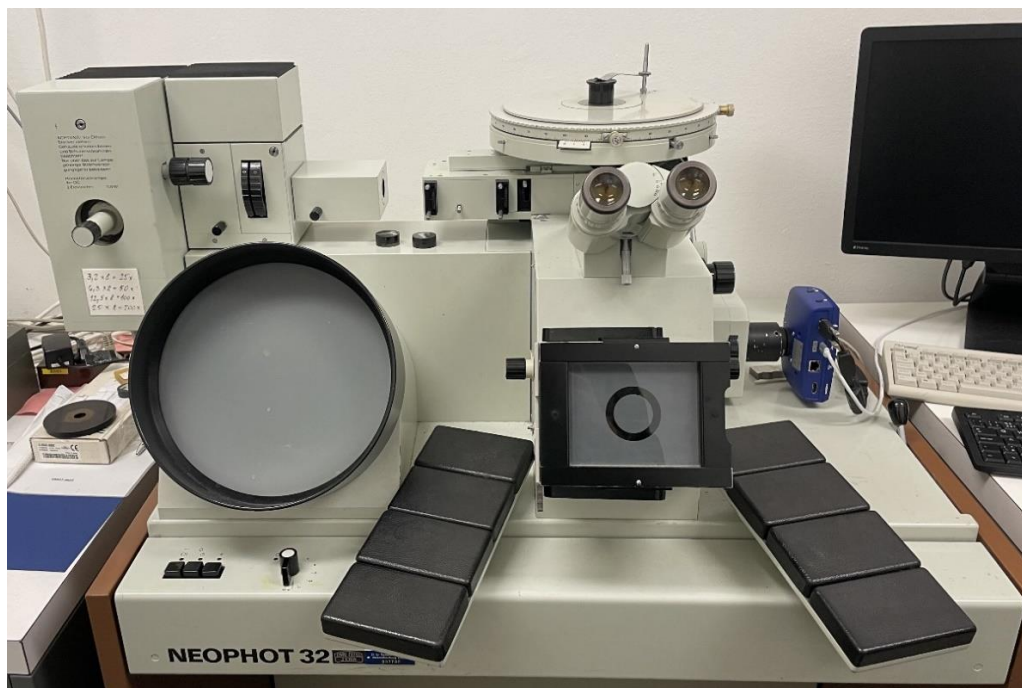


Obrázok 18 Ukážka mikroštruktúry materiálu K100, vzorky K111 po boridovaní (4 Hodiny, 900 °C) pri 50 – násobnom zväčšení

Po mikroštruktúrej analýze jednotlivých materiálov sa vzorky podrobili meraním hrúbky vytvorenej boridickej vrstvy.

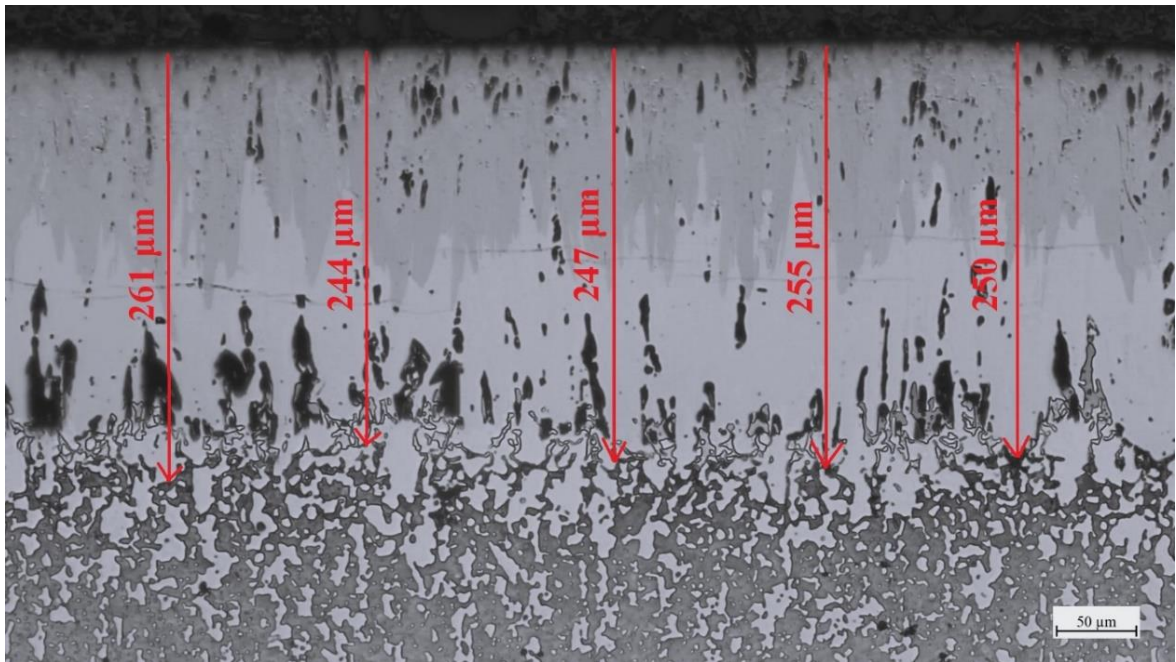
3.5 Hrúbka boridickej vrstvy

Hrúbka boridickej vrstvy sa merala na snímkoch ktoré boli vyhotovené pomocou optického svetelného metalografického mikroskopu ZEISS JENA NEOPHOT 32 (obrázok 19) pri sledovaní mikroštruktúry, kde sa pomocou mierky a počítačového programu imageJ na jednotlivých boridovaných vzorkách merala dosiahnutá hrúbka boridickej vrstvy.



Obrázok 19 Svetelný metalografický mikroskop ZEISS JENA NEOPHOT 32

Obrázok 20 znázorňuje ukážku merania dosiahnutej boridickej vrstvy pri vzorke K144 , teda vzorke ktorá sa boridovala pri najväčších parametroch – 10 hodín pri 1050 °C.



Obrázok 20 Ukážka merania hrúbky boridickej vrstvy pri vzorke K144 pri 25 – násobnom zväčšení

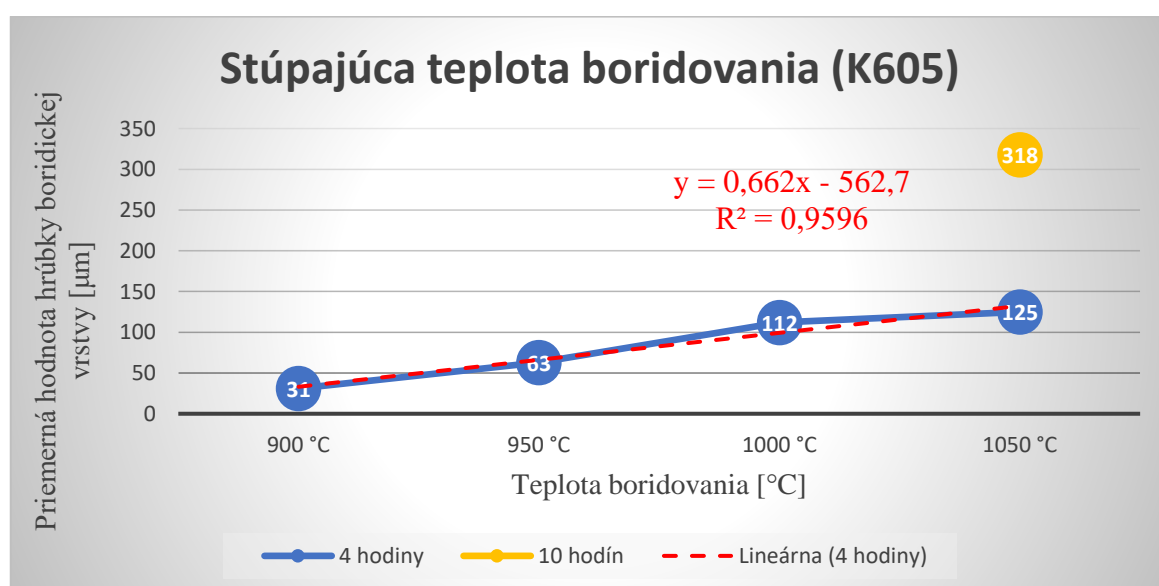
Meranie hrúbky sa uskutočňovalo celkovo 5 krát na každej vzorke tak ako je zobrazené na obrázku 20 , pričom bolo z odmeraných hodnôt následne potrebné vypočítať priemernú hrúbku boridickej vrstvy a chybu merania.

V tabuľke 6 sú zobrazené vypočítané priemerné hodnoty hrúbky boridickej vrstvy a chyba merania pri vzorkách z materiálu K605, pri ktorých sa postupne zvyšovala teplota boridovania pri zachovaní konštantného času boridovania (4 hodiny) . Posledný stĺpec tabuľky predstavuje porovnávaciu vzorku, teda vzorku ktorá sa boridovala pri najvyšších možných parametroch (1050 °C, 10 hodín) .

Tabuľka 6 Materiál K605 - Vypočítaná priemerná hrúbka boridickej vrstvy a chyby merania vzoriek pri ktorých stúpala teplota boridovania pri zachovaní konštantného času boridovania (4 hodiny)

NÁZOV VZORKY	Priemerná hrúbka boridickej vrstvy	Chyba merania
K611– 4hod.,900 °C	31 μm	±2,4
K612– 4hod.,950 °C	63 μm	±5,8
K613 – 4hod.,1000 °C	112 μm	±17,8
K614 – 4hod.,1050 °C	125 μm	±16,9
K644–10hod.,1050 °C	318 μm	±11,0

Nasledujúce grafické znázornenie (obrázok 21) poukazuje na vzorky z materiálu K605, ktoré sa boridovali pri konštantnom čase boridovania 4 hodiny, pričom teplota boridovania stúpala – vzorky K611,K612,K613,K614 (Modrá farba) , Oranžová farba znázorňuje vzorku K644 , teda porovnávaciu vzorku ktorá sa boridovala pri najvyššej možnej teplote a čase boridovania – 1050 °C, 10 hodín.



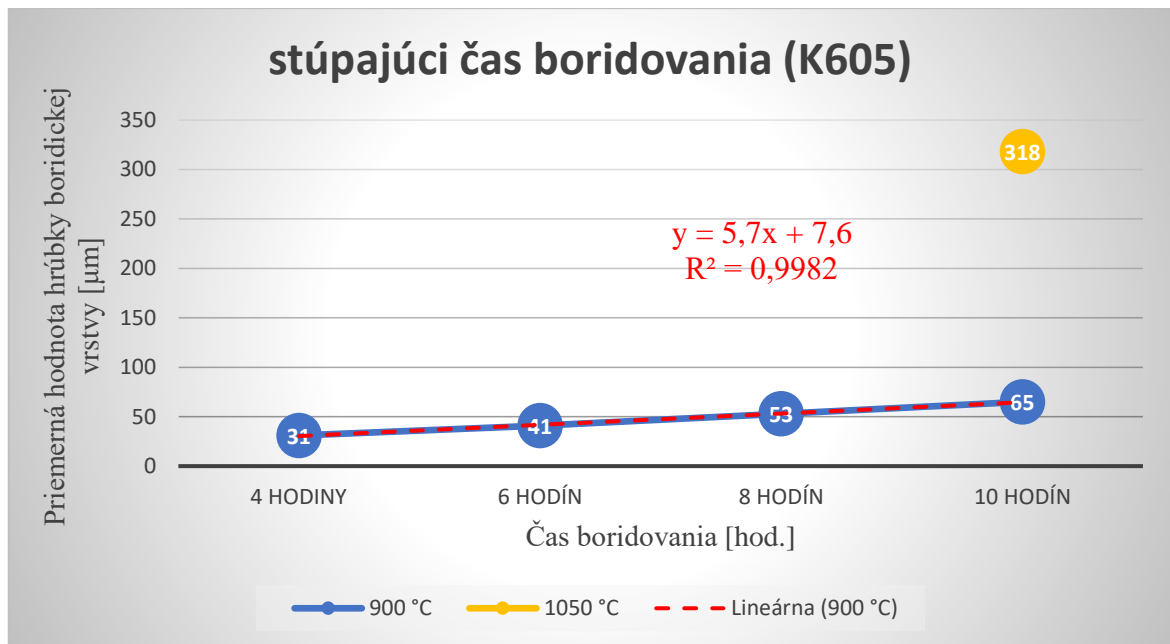
Obrázok 21 Vývoj hrúbky boridickej vrstvy materiálu K605 z hľadiska stúpajúcej teploty boridovania pri zachovaní konštantného času boridovania (Modrá farba)

V tabuľke 7 sú zobrazené vypočítané priemerné hodnoty hrúbky boridickej vrstvy a chyba merania pri vzorkách z materiálu K605, pri ktorých sa postupne zvyšoval čas boridovania pri zachovaní konštantnej teploty boridovania (900 °C) . Posledný stĺpec tabuľky predstavuje porovnávaciu vzorku, teda vzorku ktorá sa boridovala pri najvyšších možných parametroch (1050 °C, 10 hodín) .

Tabuľka 7 Materiál K605 - Vypočítaná priemerná hrúbka boridickej vrstvy a chyby merania vzoriek pri ktorých stúpal čas boridovania pri zachovaní konštantnej teploty boridovania. (900 °C)

NÁZOV VZORKY	Priemerná hrúbka boridickej vrstvy	Chyba merania
K611– 4hod.,900 °C	31 µm	±2,4
K621 – 6hod., 900 °C	41 µm	±3
K631 – 8hod., 900 °C	53 µm	±5
K641– 10hod.,900 °C	65 µm	±6,5
K644–10hod.,1050 °C	318 µm	±11,0

Nasledujúce grafické znázornenie (obrázok 22) poukazuje na vzorky z materiálu K605, ktoré sa boridovali pri konštantnej teplote boridovania 900 °C , pričom postupne stúpal čas boridovania – vzorky K611, K621, K631, K641 (Modrá farba) , oranžová farba znázorňuje vzorku K644 , teda porovnávaciu vzorku ktorá sa boridovala pri najvyššej možnej teplote a čase boridovania – 1050 °C, 10 hodín.



Obrázok 22 Vývoj hrúbky boridickej vrstvy materiálu K605 z hľadiska stúpajúceho času boridovania pri zachovaní konštantnej teploty boridovania (Modrá farba)

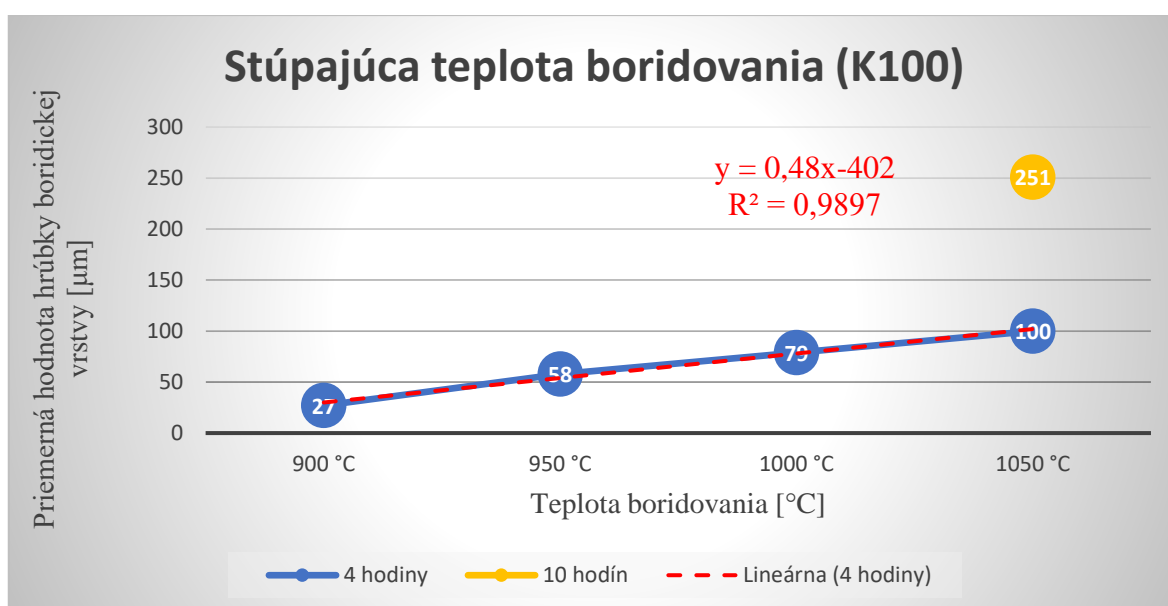
Z grafických znázornení možno usúdiť, že pri materiáli K605 sa hrúbka boridickej vrstvy zvyšuje s narastajúcim časom boridovania ale aj s narastajúcou teplotou boridovania. Lepšie výsledky (väčšia nameraná hodnota hrúbka boridickej vrstvy) však mali vzorky pri ktorých sa postupne zvyšovala teplota boridovania, kde sa hrúbka boridickej vrstvy vyšplhala až na 125 μm. Z vyplývajúcich zistení možno teda usúdiť že pri tomto materiáli má na väčšiu hodnotu hrúbky boridickej vrstvy výrazný vplyv hlavne teplota boridovania.

V tabuľke 8 sú zobrazené vypočítané priemerné hodnoty hrúbky boridickej vrstvy a chyba merania pri vzorkách z materiálu K100, pri ktorých sa postupne zvyšovala teplota boridovania pri zachovaní konštantného času boridovania (4 hodiny) . Posledný stĺpec tabuľky predstavuje porovnávaciu vzorku, teda vzorku ktorá sa boridovala pri najvyšších možných parametroch (1050 °C, 10 hodín) .

Tabuľka 8 Materiál K100 - Vypočítaná priemerná hrúbka boridickej vrstvy a chyby merania vzoriek pri ktorých stúpala teplota boridovania pri zachovaní konštantného času boridovania (4 hodiny)

NÁZOV VZORKY	Priemerná hrúbka boridickej vrstvy	Chyba merania
K111– 4hod.,900 °C	27 μm	±4,1
K112– 4hod.,950 °C	58 μm	±14,0
K113 – 4hod.,1000 °C	79 μm	±11,7
K114 – 4hod.,1050 °C	100 μm	±6,8
K144–10hod.,1050 °C	251 μm	±6,8

Nasledujúce grafické znázornenie (obrázok 23) poukazuje na vzorky z materiálu K100, ktoré sa boridovali pri konštantnom čase boridovania 4 hodiny, pričom teplota boridovania postupne stúpala – vzorky K111,K112,K113,K114 (Modrá farba) , Oranžová farba znázorňuje vzorku K144 , teda porovnávaciu vzorku ktorá sa boridovala pri najvyššej možnej teplote a čase boridovania – 1050 °C, 10 hodín.



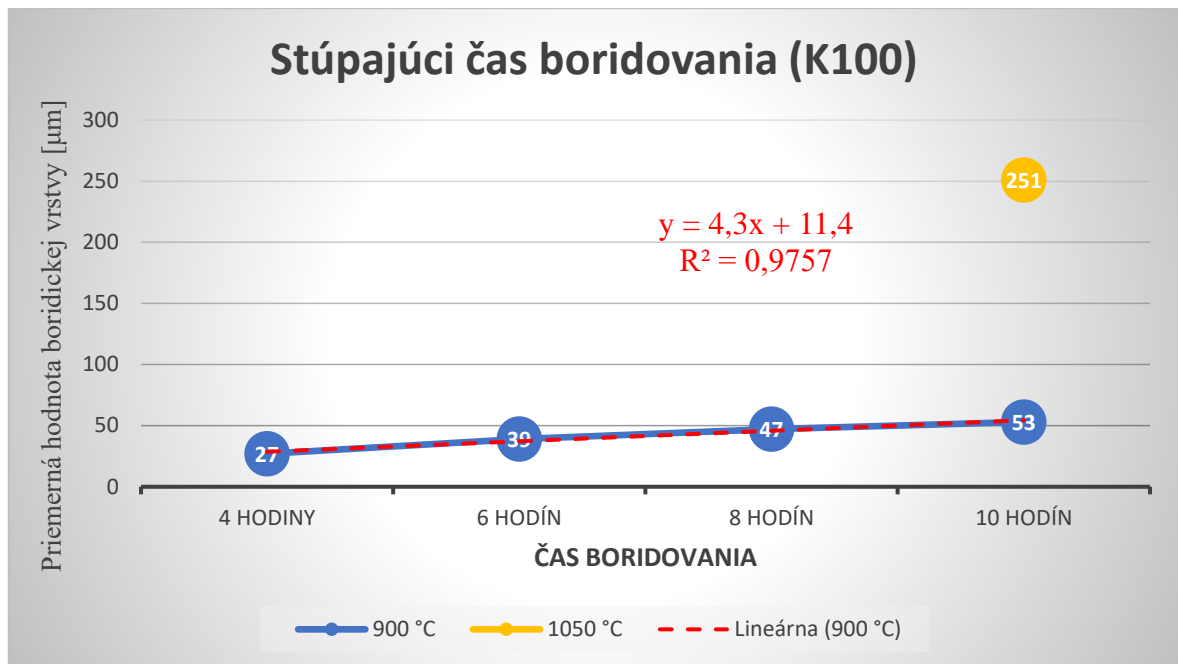
Obrázok 23 Vývoj hrúbky boridickej vrstvy materiálu K100 z hľadiska stúpajúcej teploty boridovania pri zachovaní konštantného času boridovania (Modrá farba)

V tabuľke 9 sú zobrazené vypočítané priemerné hodnoty hrúbky boridickej vrstvy a chyba merania pri vzorkách z materiálu K100, pri ktorých sa postupne zvyšoval čas boridovania pri zachovaní konštantnej teploty boridovania (900 °C) . Posledný stĺpec tabuľky predstavuje porovnávaciu vzorku, teda vzorku ktorá sa boridovala pri najvyšších možných parametroch (1050 °C, 10 hodín) .

Tabuľka 9 Materiál K100 - Vypočítaná priemerná hrúbka boridickej vrstvy a chyby merania vzoriek pri ktorých stúpala čas boridovania pri zachovaní konštantnej teploty boridovania. (900 °C)

NÁZOV VZORKY	Priemerná hrúbka boridickej vrstvy	Chyba merania
K111– 4hod.,900 °C	27 μm	±4,1
K121 – 6hod., 900 °C	39 μm	±4
K131 – 8hod., 900 °C	47 μm	±1,8
K141– 10hod.,900 °C	53 μm	±3
K144–10hod.,1050 °C	251 μm	±6,8

Nasledujúce grafické znázornenie (obrázok 24) poukazuje na vzorky z materiálu K100, ktoré sa boridovali pri konštantnej teplote boridovania 900 °C , pričom čas boridovania stúpala – vzorky K111, K121, K131, K141 (Modrá farba) , oranžová farba znázorňuje vzorku K144 , teda porovnávaciu vzorku ktorá sa boridovala pri najvyššej možnej teplote a čase boridovania – 1050 °C, 10 hodín



Obrázok 24 Vývoj hrúbky boridickej vrstvy materiálu K100 z hľadiska stúpajúceho času boridovania pri zachovaní konštantnej teploty boridovania (Modrá farba)

Z grafických znázornení možno usúdiť, že tak ako pri materiáli K605, aj pri materiáli K100 sa s narastajúcimi parametrami hodnota hrúbky boridickej vrstvy postupne zväčšuje, pričom pri oboch materiáloch mal ako parameter boridovania väčší vplyv práve stúpajúca teplota boridovania. V porovnaní hrúbok oboch materiálov dosiahol väčšie hodnoty materiál K605. Pri porovnávacích vzorkách dosiahol väčšiu hodnotu hrúbky **318 μm** oproti materiálu K100 ktorý mal hrúbku **251 μm**. Taktiež pri ostatných vzorkách mal materiál K605 väčšiu hrúbku – konkrétne pri grafe so stúpajúcou teplotou boridovania to bolo pri najvyššej teplote až **125 μm** oproti materiálu K100 ktorý mal hodnotu len **100 μm**. Pri grafoch so stúpajúcim časom dosiahol vyšších hodnôt taktiež materiál K605 kde mal pri najdlhšom čase hodnotu **65 μm** oproti **53 μm** pri materiáli K100.

Všetky grafy merania hodnôt hrúbok zároveň obsahujú lineárne trendové spojnice s prislúchajúcimi rovnicami, takže je možné predikovať približný vývoj hodnôt hrúbok aj pri iných časoch alebo teplotách. Vysvetlenie empirickej rovnice z obrázku 24 je nasledovné : **y** predstavuje hodnotu hrúbky vrstvy a za **x** možno dosadiť čas alebo teplotu boridovania podľa typu grafu.

$$y \text{ (hodnota hrúbky)} = 4,3 x \text{ (čas boridovania/teplota boridovania)} + 11,4$$

Všetky namerané hodnoty hrúbky boridickej vrstvy obsahuje Príloha A – Namerané hodnoty hrúbky boridickej vrstvy.

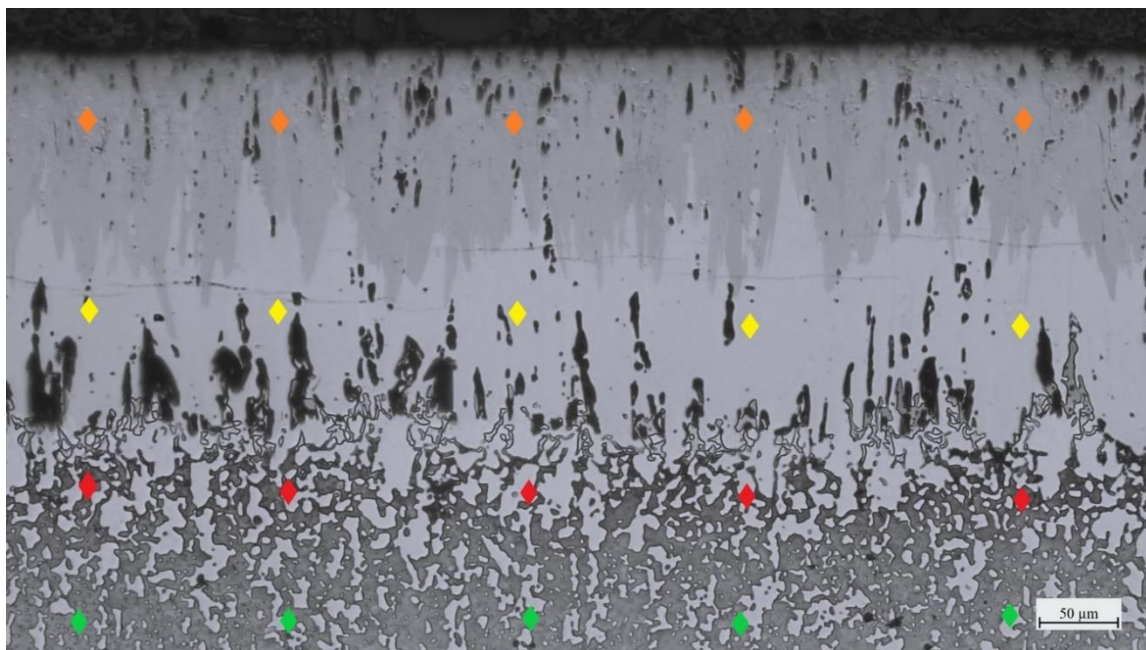
3.6 Mikrotvrdosť HV 0,1

Po meraní hrúbok boridických vrstiev sa na všetkých vzorkách uskutočňovalo meranie mikrotvrdości (HV 0,1), teda meranie mikrotvrdości podľa Vickersa so zaťažením 100 pondov. Samotné meranie sa uskutočňovalo na mikrotvrdomeri ZEISS JENA NEOPHOT 21 v laboratóriách materiálového inžinierstva (obrázok 25).



Obrázok 25 mikrotvrdomer Zeiss Jena Neophot 21

Na každej vzorke bolo v jednotlivých oblastiach vykonaných 5 meraní. Jednalo sa o oblasti intermediárnych fáz FeB (Tá sa vytvorila len pri materiáli K100 pri väčších teplotách), Fe₂B , difúznej zóny a základného materiálu. Ukážka meraní je zobrazená na obrázku 26 , pričom oranžové kosoštvorce zobrazujú vtlacky v boridovanej vrstve FeB, žlté kosoštvorce vtlacky vo vrstve Fe₂B , červené kosoštvorce vtlacky v difúznej zóne a zelené kosoštvorce vtlacky v základnom materiáli. Z nameraných hodnôt boli potom vypočítané priemerné hodnoty tvrdosti a chyba merania.



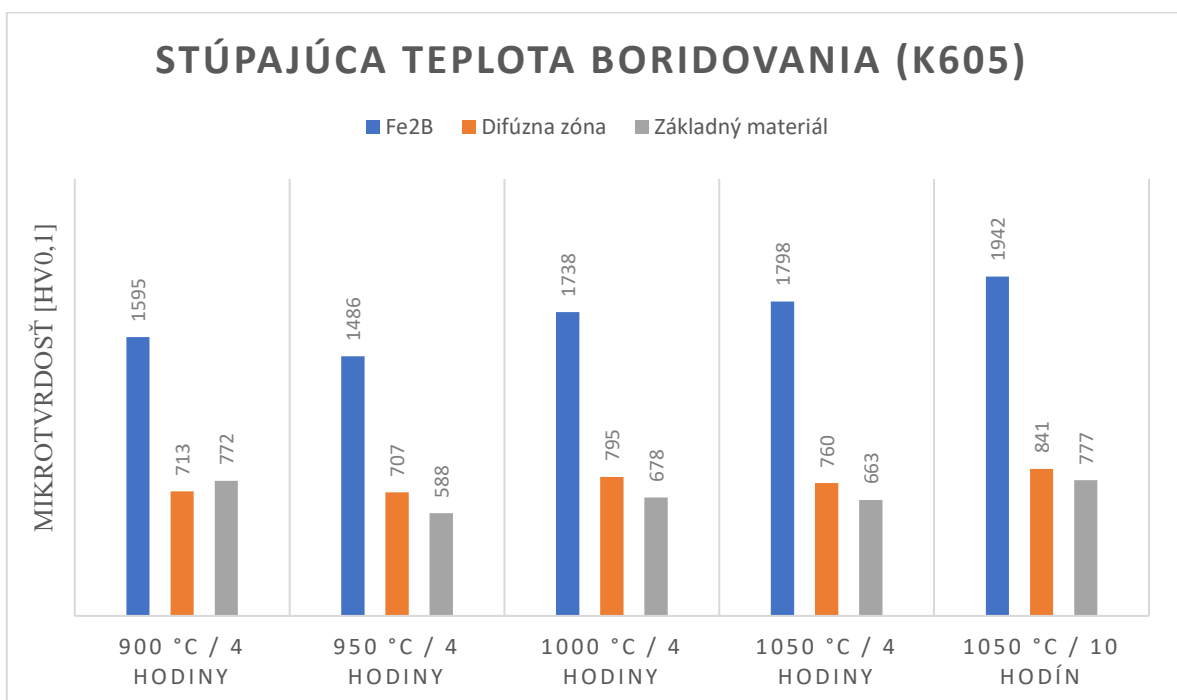
Obrázok 26 Ukážka merania mikrotvrdości na vzorke K144

Tabuľka 10 poukazuje na vzorky z materiálu K605, ktoré sa postupne boridovali pri stúpajúcej teplote a konštantnom čase boridovania (4 hodiny) , posledný riadok zobrazuje porovnávaciu vzorku, teda vzorku ktorá sa boridovala pri najväčšej teplote a najdlhšom čase boridovania. V prípade materiálu K605 boli pozorované oblasti Fe_2B , Difúzna zóna a základný materiál, pričom výsledky tvrdosti a veľká chyba merania dokázali že sa v materiáli nachádzali aj lokálne ložiská tvrdšej vrstvy FeB ktorá podľa literatúry môže dosahovať hodnotu okolo 2000 HV 0,1 . V prípade vrstvy Fe_2B literatúra uvádza hodnoty mikrotvrdości okolo 1600 HV 0,1.

Tabuľka 10 Materiál K605 – Priemerné hodnoty tvrdosti a chyba merania vzoriek pri ktorých sa postupne zvyšovala teplota boridovania pri konštantnom čase boridovania.

VZORKA	Oblasť merania		
	Fe_2B [HV0,1]	Difúzna zóna [HV0,1]	Základný materiál [HV0,1]
K611 (4 hod., 900 °C)	1595 ±124,7 HV	713 ±26,5 HV	772 ±16,1 HV
K612 (4 hod., 950 °C)	1486 ± 171,1 HV	707 ± 51,8 HV	588 ± 60 HV
K613 (4 hod., 1000 °C)	1738 ± 242,8 HV	795 ± 75,9 HV	678 ± 25 HV
K614 (4 hod., 1050 °C)	1798 ± 92,9 HV	760 ± 34,8 HV	663 ± 9,9 HV
K644 (10 hod., 1050 °C)	1942 ± 187,6 HV	841 ± 38,7 HV	777 ± 78,9 HV

Obrázok 27 zobrazuje priemerné mikrotvrdoosti vzoriek z materiálu K605, pri ktorých sa postupne zvyšovala teplota pri zachovaní konštantného času boridovania (Stĺpce 1 až 4) Posledný stĺpec predstavuje porovnávaciu vzorku K644, teda vzorku ktorá sa boridovala pri najvyšších možných parametroch – 10 hodín, 1050 °C. Z grafu možno vyčítať že sa s pribúdajúcou teplotou vo väčšine prípadoch mikrotvrdosť zvyšovala, pričom sa mikrotvrdosťou 1798 HV 0,1 najviac k porovnávacej vzorke priblížila vzorka ktorá sa boridovala 4 hodiny na teplote 1050 °C . Z ekonomického hľadiska možno konštatovať že rozdiel **144 HV** medzi touto vzorkou a porovnávacou vzorkou nie je veľký, čiže pridávanie dlhšieho času boridovania k najvyššej teplote nie je nutné.



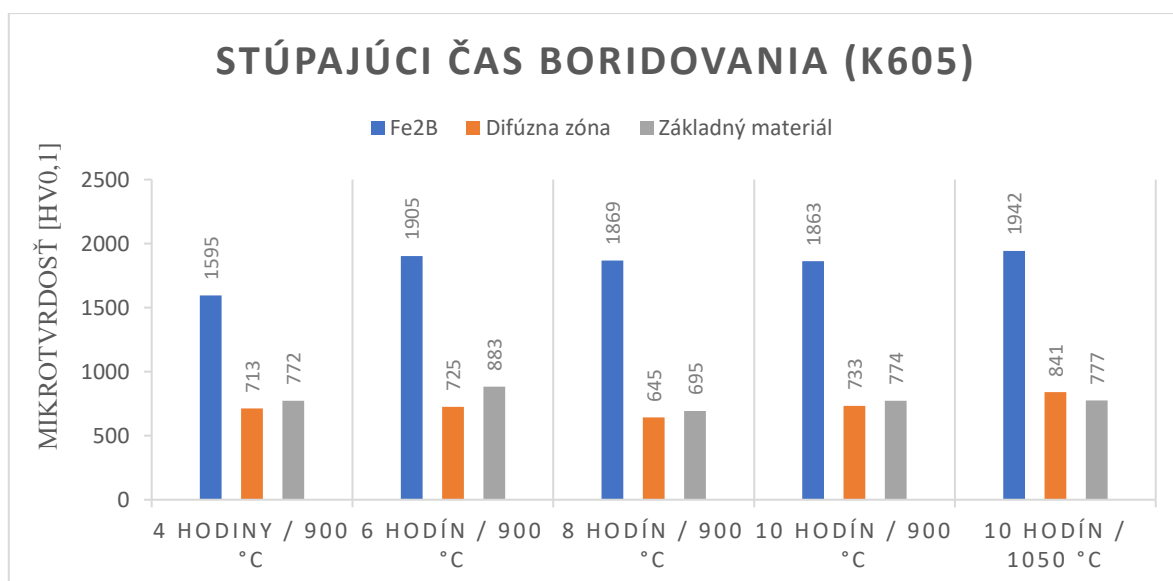
Obrázok 27 Vývoj merania tvrdosti materiálu K605 z hľadiska stúpajúcej teploty boridovania pri zachovaní konštantného času boridovania

Tabuľka 11 poukazuje na vzorky z materiálu K605, ktoré sa postupne boridovali pri stúpajúcom čase a konštantnej teplote boridovania (900 °C) , posledný riadok zobrazuje porovnávaciu vzorku, teda vzorku ktorá sa boridovala pri najväčšej teplote a najdlhšom čase boridovania.

Tabuľka 11 Materiál K605 – Priemerné hodnoty tvrdosti a chyba merania vzoriek pri ktorých sa postupne zvyšoval čas boridovania pri konštantnej teplote boridovania

VZORKA	Oblasť merania		
	Fe ₂ B [HV0,1]	Difúzna zóna [HV0,1]	Základný materiál [HV0,1]
K611 (4 hod., 900 °C)	1595 ±124,7 HV	713 ±26,5 HV	772 ±16,1 HV
K621 (6 hod., 900 °C)	1905 ± 170,9 HV	725 ± 9,1 HV	883 ± 31,9 HV
K631 (8 hod., 900 °C)	1869 ± 155,1 HV	645 ± 59 HV	695 ± 45,8 HV
K641 (10 hod., 900 °C)	1863 ± 70,6 HV	733 ± 17,5 HV	774 ± 49 HV
K644 (10 hod., 1050 °C)	1942 ± 187,6 HV	841 ± 38,7 HV	777 ± 78,9 HV

Obrázok 28 zobrazuje priemerné tvrdosti vzoriek z materiálu K605, pri ktorých sa postupne zvyšoval čas boridovania pri zachovaní konštantnej teploty boridovania (stĺpce 1 až 4). Posledný stĺpec predstavuje porovnávaciu vzorku K644. Z grafu možno usúdiť, že najvyšší rozdiel tvrdostí bol medzi 4 hodinami a 6 hodinami a pri ďalšom zvyšovaní času boridovania už mikrotvrdosť kolísala v približne rovnakých hodnotách. Najvyššia mikrotvrdosť sa dosiahla už pri boridovaní na 6 hodinách (1905 HV 0,1), táto hodnota je oproti porovnávacej vzorke K644 ktorá veľmi dobrá (rozdiel len 37 HV 0,1) a z ekonomického hľadiska by bolo ďalšie zvyšovanie parametrov boridovania nevýhodné.



Obrázok 28 Vývoj merania tvrdosti materiálu K605 z hľadiska stúpajúceho času boridovania pri zachovaní konštantnej teploty boridovania

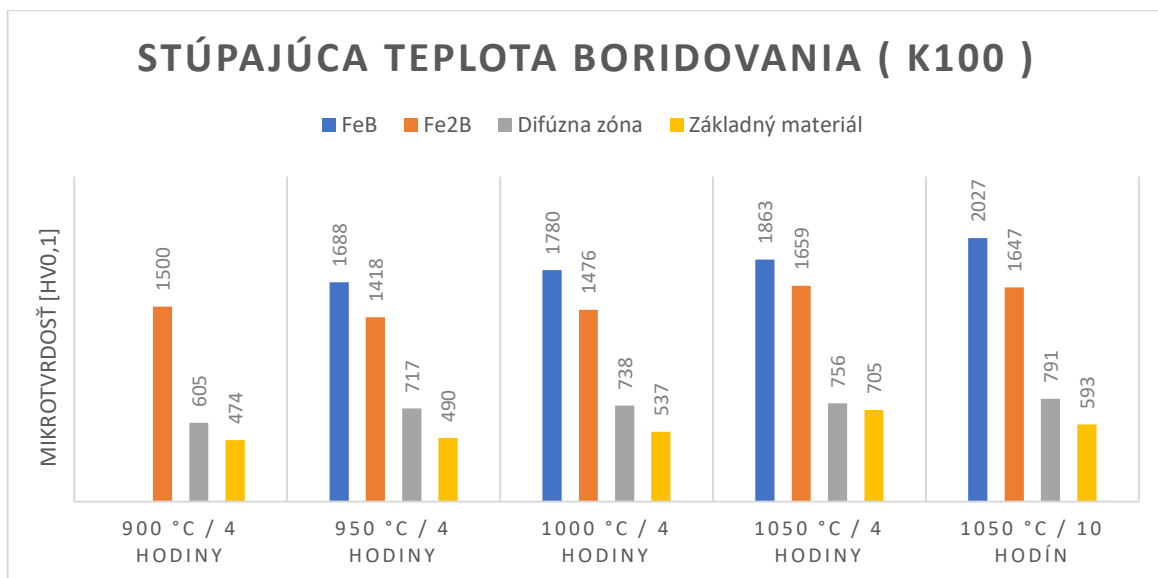
Všetky namerané hodnoty mikrotvrdomostí vzoriek z materiálu K605 obsahuje Príloha B – Namerané hodnoty mikrotvrdomosti (Materiál K605)

Tabuľka 12 poukazuje na vzorky z materiálu K100, ktoré sa postupne boridovali pri stúpajúcej teplote a konštantnom čase boridovania (4 hodiny) , posledný riadok zobrazuje porovnávaciu vzorku, teda vzorku ktorá sa boridovala pri najväčšej teplote a najdlhšom čase boridovania. Súvislá vrstva FeB sa vytvorila len na vzorkách ktoré sa boridovali pri vyšších teplotách – (950 °C, 1000 °C a 1050 °C).

Tabuľka 12 Materiál K100 – Priemerné hodnoty tvrdosti a chyba merania vzoriek pri ktorých sa postupne zvyšovala teplota boridovania pri konštantnom čase boridovania.

VZORKA	Oblasť merania			
	FeB [HV0,1]	Fe ₂ B [HV0,1]	Difúzna zóna [HV0,1]	Základný materiál [HV0,1]
K111 (4 hod., 900 °C)	Nevyskytla sa	1500 ± 51,3 HV	605 ± 13 HV	474 ± 18,5 HV
K112 (4 hod., 950 °C)	1688 ± 52 HV	1418 ± 47,5 HV	717 ± 23,3 HV	490 ± 15,3 HV
K113 (4 hod., 1000 °C)	1780 ± 66 HV	1476 ± 50,8 HV	738 ± 32,4 HV	537 ± 22,5 HV
K114 (4 hod., 1050 °C)	1863 ± 70,7 HV	1659 ± 38,9 HV	756 ± 43,1 HV	705 ± 29,7 HV
K144 (10hod., 1050 °C)	2027 ± 96,5 HV	1647 ± 94,2 HV	791 ± 30,6 HV	593 ± 17,5 HV

Nasledujúce grafické znázornenie (obrázok 29) zobrazuje priemerné mikrotvrdomosti vzoriek z materiálu K100, pri ktorých sa postupne zvyšovala teplota pri zachovaní konštantného času boridovania (Stĺpce 1 až 4). Posledný stĺpec predstavuje porovnávaciu vzorku K144, teda vzorku ktorá sa boridovala pri najvyšších možných parametroch – 10 hodín, 1050 °C , Tá dosiahla mikrotvrdomosť 2027 HV 0,1.



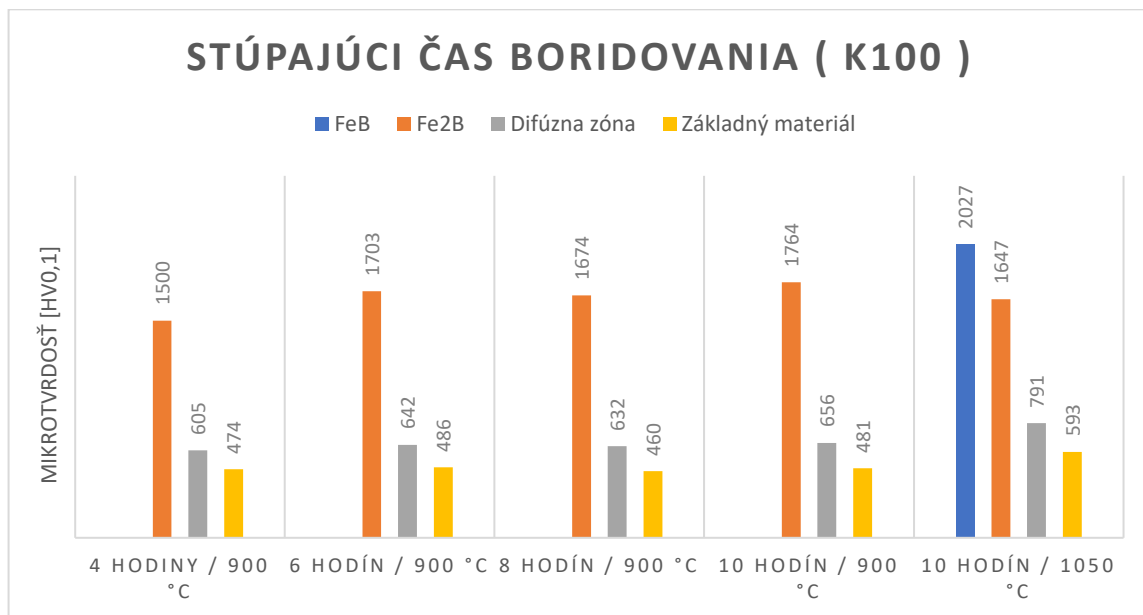
Obrázok 29 Vývoj merania tvrdosti materiálu K100 z hľadiska stúpajúcej teploty boridovania pri zachovaní konštantného času boridovania

Tabuľka 13 poukazuje na vzorky z materiálu K100, ktoré sa postupne boridovali pri stúpajúcom čase boridovania a konštantnej teplote boridovania (900 °C) – v tomto prípade sa tvrdšia vrstva FeB nevyskytla. Posledný riadok zobrazuje porovnávaciu vzorku.

Tabuľka 13 Materiál K100 – Priemerné hodnoty tvrdosti a chyba merania vzoriek pri ktorých sa postupne zvyšoval čas boridovania pri konštantnej teplote boridovania

VZORKA	Oblasť merania			
	FeB [HV0,1]	Fe ₂ B [HV0,1]	Difúzna zóna [HV0,1]	Základný materiál [HV0,1]
K111 (4 hod., 900 °C)	Nevyskytla sa	1500 ± 51,3 HV	605 ± 13 HV	474 ± 18,5 HV
K121 (6 hod., 900 °C)	Nevyskytla sa	1703 ± 61,8 HV	642 ± 19,7 HV	486 ± 21,9 HV
K131 (8 hod., 900 °C)	Nevyskytla sa	1674 ± 61,2 HV	632 ± 21,9 HV	460 ± 17,3 HV
K141 (10 hod., 900 °C)	Nevyskytla sa	1764 ± 55,5 HV	656 ± 14,7 HV	481 ± 16,7 HV
K144 (10hod., 1050 °C)	2027 ± 96,5 HV	1647 ± 94,2 HV	791 ± 30,6 HV	593 ± 17,5 HV

Nasledujúce grafické znázornenie (obrázok 30) zobrazuje priemerné mikrotvrdoosti vzoriek z materiálu K100, pri ktorých sa postupne zvyšoval čas boridovania pri zachovaní konštantnej teploty boridovania (Stĺpce 1 až 4) Posledný stĺpec predstavuje porovnávaciu vzorku K144.



Obrázok 30 Vývoj merania tvrdosti materiálu K100 z hľadiska stúpajúceho času boridovania pri zachovaní konštantnej teploty boridovania

Z grafických znázornení obrázkov 29 a 30 možno usúdiť že zvyšovanie oboch parametrov boridovania má vplyv na výslednú mikrotvrdoť oblastí, pričom väčší vplyv mala teplota boridovania, kde sa pri väčšej teplote (950 °C , 1000 °C , 1050 °C) vytvorila aj tvrdá boridická vrstva FeB ktorá dosiahla pri teplote 1050 °C hodnotu tvrdosti 1863 HV 0,1. V prípade obrázku 30 sa so stúpajúcim časom boridovania a zachovaním konštantnej teploty 900 °C nevytvorila tvrdšia vrstva FeB, takže aj výsledné tvrdosti boridickej vrstvy boli menšie, pričom najvyššiu mikrotvrdoť dosiahla vzorka ktorá sa boridovala 10 hodín – 1764 HV 0,1. V prípade tohto materiálu teda možno zhodnotiť, že je ekonomicky výhodnejšie boridovať pri väčšej teplote a nižšom čase.

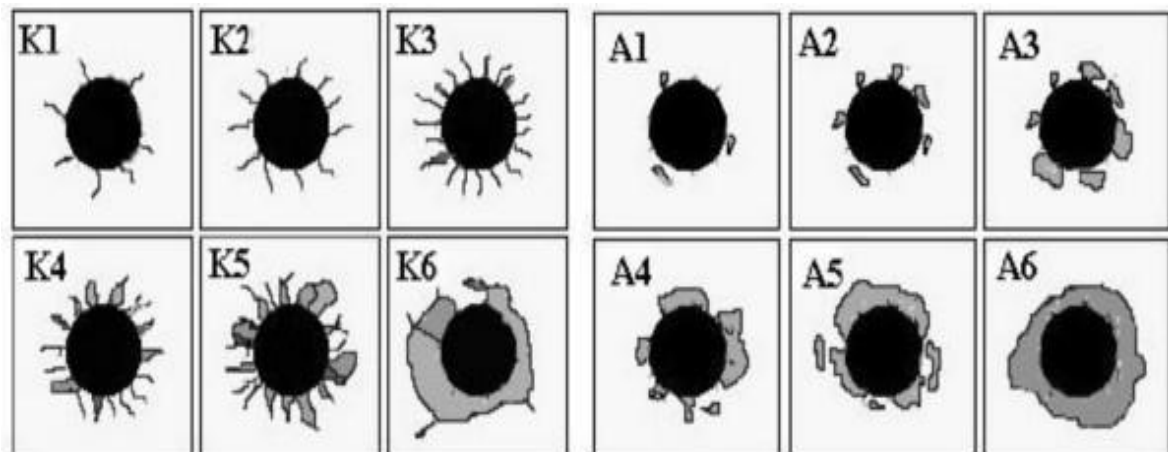
V celkovom hodnotení tvrdosti oboch materiálov možno konštatovať, že obidva parametre boridovania mali vplyv na zvyšovanie tvrdosti boridickej vrstvy, pričom na materiál K605 mal väčší vplyv čas boridovania a pri materiáli K100 teplota boridovania. Pri vzorkách z materiálu K605 dosiahla porovnávacia vzorka K644 hodnotu tvrdosti 1942 HV 0,1 a najbližšie sa k tejto hodnote priblížila vzorka ktorá sa boridovala pri 6 hodinách a 900 °C (1904 HV 0,1). V prípade materiálu K100 mala porovnávacia vzorka K144 hodnotu

tvrdosti 2027 HV 0,1 a najbližšie sa k tejto hodnote priblížila vzorka ktorá sa boridovala 4 hodiny pri 1050 °C (1863 HV 0,1).

Všetky namerané hodnoty mikrotvrdostí vzoriek z materiálu K100 obsahuje Príloha C – Namerané hodnoty mikrotvrdosti (Materiál K100)

3.7 Mercedes Test

V ďalšej časti diplomovej práce sa vzorky podrobili Mercedes testu - skúmaniu adhézneho kvality boridických vrstiev. Princíp tejto skúšky spočíva v skúmaní vzniknutých trhlín a celkového adhézneho poškodenia okolo vtláčku, ktorý sa do vzoriek vtláčal po boridovaní. Vyhotovenie vtláčkov prebiehalo v ľahkých laboratóriách MTF STU v Trnave Rockwelovým indentorom – HRC , pomocou ktorého sa silou 1500 N vyhotovil do boridickej vrstvy vtláčok. Vzorky s vtláčkami boli následne pozorované rastrovacím elektrónovým mikroskopom JEOL JSM-7600F vo vákuovom prostredí (obrázok 32) a boli vyhotovené snímky pri rôznych zväčšeniach. Posledným krokom bolo vyhodnocovanie samotných vtláčkov pomocou adhézných čísiel (Obrázok 31) , kde jednotlivé kategórie zodpovedajú stupňu adhézneho opotrebenia , pričom A1, K1 zodpovedá najlepšej adhézii – teda najmenšiemu adhéznemu poškodeniu a A6, K6 najhoršej adhézii – teda najväčšiemu adhéznemu poškodeniu.



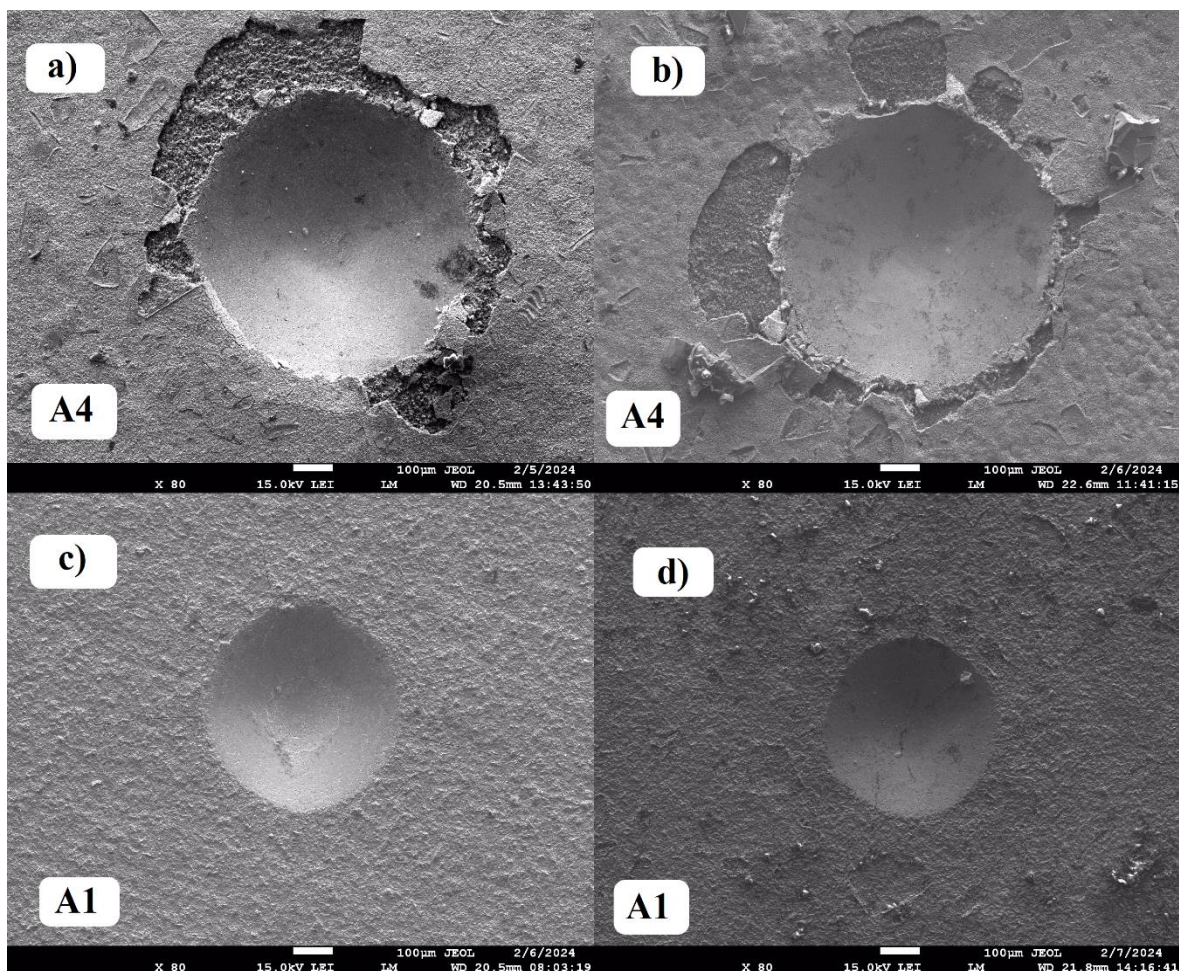
Obrázok 31 Adhézne (A) a Kohézne (K) triedy poškodenia (Sosnová, Hájek, Kříž 2006)



Obrázok 32 Rastrovací elektrónový mikroskop vo vákuovom prostredí
- JEOL JSM-7600F

Z dôvodu veľkej technickej a časovej náročnosti celého procesu vákuovania a vyhotovovania jednotlivých snímok, sa mercedes testu podrobilo len 8 vzoriek z celkového počtu 16 vzoriek. 4 vzorky z materiálu K605 a 4 vzorky z materiálu K100. Z každého materiálu sa vybrali vzorky s hraničnými parametrami boridovania to znamená z každého materiálu 2 vzorky ktoré sa boridovali 4 hodiny , pričom 1 vzorka pri 900 °C a druhá vzorka pri 1050 °C a ďalšie 2 vzorky ktoré sa boridovali 10 hodín, pričom 1 vzorka pri 900 °C a jedna pri 1050 °C. Pre lepší prehľad sú vzorky ktoré sa podrobili mercedes testu vyznačené zelenou farbou v tabuľke 5.

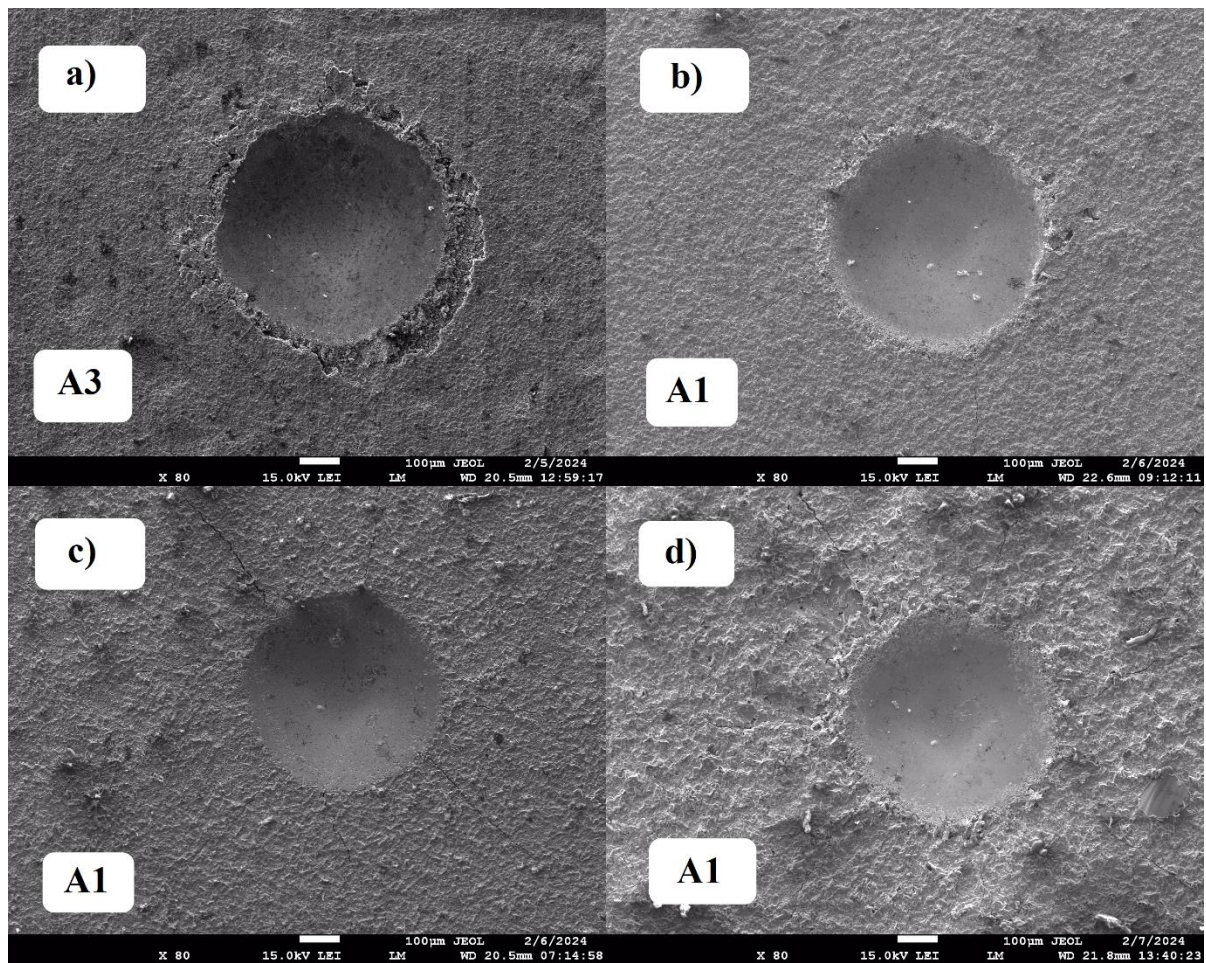
Obrázok 33 predstavuje SEM snímky vtlačkov materiálu K100, ktorým boli priradené jednotlivé adhézne kategórie.



Obrázok 33 Snímky vtláčkov vzoriek K100 boridovaných pri a) 4 hodiny 900 °C b) 10 hodín 900 °C c) 4 hodiny 1050 °C d) 10 hodín 1050 °C , Použité zväčšenie – 80x

Z mercedes testu materiálu K100 vyplýva, že výrazné zlepšenie odolnosti materiálu voči adhéznemu opotrebeniu sme dosiahli predovšetkým zvýšením teploty boridovania z 900 °C (vzorky a , b) na 1050 °C (vzorky c , d) . Naopak predĺženie času boridovania pri tomto materiáli neprineslo výrazné zlepšenie odolnosti proti adhéznemu opotrebeniu.

Obrázok 34 predstavuje SEM snímky vtláčkov materiálu K605, ktorým boli priradené jednotlivé adhézne kategórie.



Obrázok 34 Snímky vtláčkov vzoriek K605 boridovaných pri a) 4 hodiny 900 °C b) 10 hodín 900 °C c) 4 hodiny 1050 °C d) 10 hodín 1050 °C , Použité zväčšenie – 80x

Z Mercedes testu materiálu K605 vyplýva, že jedinou odlišnosť môžeme pozorovať pri vzorke a) teda pri vzorke ktorá sa boridovala pri najmenších možných parametroch - 4 hodiny a 900 °C , kde sa v okolí vtláčku vyskytla vylúpená časť. Táto vzorka spadá do kategórie A3 – priemerná odolnosť voči adhéznemu opotrebeniu , pričom všetky ostatné vzorky spadajú do kategórie A1 – Veľmi dobrá odolnosť voči adhéznemu opotrebeniu.

Pri celkovom porovnaní jednotlivých materiálov možno podľa Mercedes Testu poznamenať, že z hľadiska odolnosti voči adhéznemu opotrebeniu sa ako lepšia varianta javí materiál K605 kde sme nižší stupeň odolnosti (A3) zaznamenali len u vzorky ktorá sa boridovala 4 hodiny pri 900 °C. Pri vzorkách K100 mali vyhovujúcu odolnosť voči opotrebeniu (A1) len vzorky ktoré sa boridovali pri 1050 °C. Vzorky ktoré sa boridovali pri 900 °C mali nevyhovujúcu odolnosť voči opotrebeniu (A5) . Tento rozdiel medzi jednotlivými materiálmi možno vysvetliť práve chemickým zložením a legujúcimi prvkami

jednotlivých ocelí, nakoľko s narastajúcim podielom legujúcich prvkov ako napríklad chrómu ktorého materiál K100 obsahuje konkrétne 11,50 % obsahu a materiál K605 len 1,00 % obsahu vytváranie jednotlivých boridických vrstiev znižuje. Taktiež možno predpokladať, že lepšie adhézne výsledky pri materiáli K605 mohla zapríčiniť aj absencia veľmi tvrdej ale zároveň krehkej súvislej boridickej vrstvy FeB.

ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV PRAKTICKEJ ČASTI PRÁCE

Cieľom praktickej časti diplomovej práce bolo posúdiť vlastnosti 2 experimentálnych materiálov, konkrétne nástrojových ocelí s označením K605 (STN 41 19614) a K100 (STN 41 19436) ktoré sa podrobili difúznemu boridovaniu v tuhom prostredí pri rôznych parametroch boridovania (teplota, čas). Konkrétne sa zvolili 2 spôsoby postupného zvyšovania parametrov – Na jednej strane postupné zvyšovanie teploty boridovania (900 °C → 950 °C → 1000 °C → 1050 °C) pri konštantnom čase boridovania 4 hodiny. Na druhej strane postupné zvyšovanie času boridovania (4h.→ 6h.→ 8h.→10h.) pri konštantnej teplote boridovania 900 °C. Za účelom porovnania bola vytvorená z každého materiálu taktiež 1 porovnávací vzorka ktorá sa boridovala pri najväčšej možnej teplote 1050 °C a najväčšom možnom čase boridovania 10 hodín.

Po samotnom boridovaní a metalografickej príprave vzoriek sa na vzorkách pozorovali jednotlivé vytvorené boridické vrstvy. Pri materiáli K605 sa vytvorila len vrstva Fe₂B. Pri materiáli K100 sa okrem vrstvy Fe₂B vytvorila aj tvrdšia vrstva FeB a to konkrétne pri vzorkách ktoré sa boridovali pri vyšších teplotách 950 °C, 1000 °C a 1050 °C. Dôvodom absencie tvrdšej vrstvy FeB pri vzorkách z materiálu K605 môže byť hlavne chemické zloženie danej ocele. Zároveň možno z pozorovania materiálu K100 usúdiť, že na tvorbu tejto vrstvy majú okrem chemického zloženia vplyv aj parametre boridovania a to konkrétne v tomto prípade vyššia teplota boridovania.

V ďalšej časti nasledovalo meranie hrúbok boridickej vrstvy na jednotlivých vzorkách. Z výsledkov merania možno usúdiť, že sa pri oboch materiáloch hodnota hrúbky boridickej vrstvy pri zvyšovaní oboch parametrov postupne zväčšovala, pričom väčšie hodnotu hrúbky vykazoval materiál K605. Z hľadiska vplyvu jednotlivých parametrov na hodnotu hrúbky mal pri oboch materiáloch významne väčší vplyv práve parameter stúpajúcej teploty boridovania kde sa pri oboch materiáloch dokázala pri väčších teplotách vyšplhať hodnota na alebo nad hodnotu 100 μm čo je dostačujúca hodnota na to, aby sa tieto materiáli okrem bežnejších strojných súčiastok a komponentov mohli použiť aj v náročnejších adhézných a abrazívnych podmienkach. Porovnávacie vzorky oboch materiálov ktoré sa boridovali 10 hodín a 1050 °C dosiahli omnoho väčšie hrúbky boridickej vrstvy, konkrétne 318 μm pri materiáli K605 a 251 μm pri materiáli K100. Z ekonomického hľadiska však takto vysoké parametre boridovania nie sú výhodné, nakoľko hodnotu 100 μm sme mohli dosiahnuť pri oboch materiáloch aj pri čase boridovania 4 hodiny a teplote 1050

°C a tak skrátiť čas boridovania až o 6 hodín. Zároveň obsahujú grafy lineárne trendové spojnice s prislúchajúcimi rovnicami, takže je možné predikovať približný vývoj hodnôt hrúbok aj pri iných časoch alebo teplotách.

Mikrotvrdosť sa v prípade oboch materiálov posudzovala vo všetkých sledovaných oblastiach. V prípade materiálu K605 to boli intermediárna fáza Fe₂B, difúzná zóna a základný materiál. V prípade materiálu K100 pribudla ešte intermediárna fáza FeB. V prípade materiálu K605 bola na mikroskope pozorovaná len vrstva Fe₂B, ktorá by mala mať hodnotu tvrdosti podľa literatúry okolo 1600 HV 0,1, výsledkami tvrdosti a veľkou chybou merania sme však dokázali, že aj tvrdšia vrstva FeB sa v tomto materiáli vyskytuje, ale iba v lokálnych ložiskách a nie v súvislej viditeľnej vrstve. Pri oboch materiáloch sa s postupným zvyšovaním teploty a času postupne mikrotvrdosť zvyšovala, prípadne kolísala okolo približne rovnakej hodnoty. Najvyššie hodnoty mikrotvrdosti dosiahli pri oboch materiáloch opäť porovnávacie vzorky ktoré sa boridovali pri najväčšej teplote a najdlhšom čase, pričom v prípade materiálu K605 sa namerala hodnota 1942 HV 0,1 a pri materiáli K100 to bolo 2027 HV 0,1. Pri materiáli K605 sa najbližšie k porovnávej vzorke priblížila vzorka ktorá sa boridovala 6 hodín pri 900 °C a to hodnotou 1905 HV 0,1. Pri materiáli K100 to bola vzorka ktorá sa boridovala 4 hodiny pri 1050 °C a to hodnotou 1863 HV 0,1. V prípade materiálu K605 je to rozdiel len 37 HV 0,1 a v prípade materiálu K100 to je 164 HV 0,1. V oboch prípadoch to nie sú zásadné rozdiely v mikrotvrdosti, takže z ekonomického hľadiska nie je výhodné zvyšovať obidva parametre boridovania. Pre takúto mikrotvrdosť vzoriek možno tento materiál po boridovaní použiť na rôzne druhy strojných súčastí ktoré dokážu odolať veľkému adhéznemu aj abrazívnemu opotrebeniu.

Na záver sa vzorky podrobili skúške adhéznej kvality boridickej vrstvy (Mercedes test). Z dôvodu veľkej časovej náročnosti sa podrobili tejto skúške z každého materiálu len 4 vzorky. Konkrétne hraničné vzorky ktoré sa boridovali pri 900 °C a 1050 °C pri čase boridovania 4 hodiny a 10 hodín. Z porovnania oboch materiálov možno konštatovať že lepšie odoláva adhéznemu opotrebeniu materiál K605, kde sa horšia kvalita vrstvy (A3) namerala len pri vzorke ktorá sa boridovala pri 4 hodinách a 900 °C. V prípade materiálu K100 sa horšie kvality vrstvy (A4) vyskytli pri 2 vzorkách ktoré sa boridovali pri teplote 900 °C v čase 4 a 10 hodín. Z ekonomického hľadiska možno konštatovať že materiál K605 stačí boridovať pri teplote 900 °C a čase 10 hodín alebo 1050 °C pri čase 4 hodiny na to aby dosiahli výborné výsledky. V prípade materiálu K100 zase pri 4 hodinách a 1050 °C. Oba

materiály však dosiahli výborné adhézne triedy, čiže sú vhodné pre rozličné súčiastky ktoré odolávajú veľkému adhéznemu opotrebeniu.

Tabuľka 14 predstavuje ekonomicky a úžitkovo optimálne parametre pre boridovanie materiálov K605 a K100 z hľadiska hodnoty hrúbky boridickej vrstvy, mikrotvrdości a adhéznej kvality vzniknutých boridických vrstiev (Mercedes test) . Použitie týchto parametrov predurčuje takto boridované nástrojové materiály na širokú škálu aplikácií ktoré budú odolávať abrazívnemu aj adhéznemu opotrebeniu. V oblasti tvárnenia to môžu byť nástroje pre prácu za studena ako strihanie, ťahanie , vysoko namáhané raziace nástroje, vtláčanie za studena , dierovanie alebo lisovanie.

Tabuľka 14 Ekonomicky a úžitkovo optimálne parametre boridovania ocelí K605 a K100

Materiál	Optimálne parametre pre hodnotu hrúbky boridickej vrstvy	optimálne parametre - Mikrotvrdość	optimálne parametre - Mercedes test
K605	4 hodiny, 1050 °C , výsledná hodnota hrúbky boridickej vrstvy : 125 µm	6 hodín, 900 °C , výsledná mikrotvrdość boridickej vrstvy : 1905 HV 0,1	4 hodiny, 1050 °C , výsledná trieda poškodenia : A1
K100	4 hodiny, 1050 °C , výsledná hodnota hrúbky boridickej vrstvy : 100 µm	4 hodiny, 1050 °C , výsledná mikrotvrdość boridickej vrstvy : 1863 HV 0,1	4 hodiny, 1050 °C , výsledná trieda poškodenia : A1

ZÁVER

Čoraz viac sa v modernej priemyselnej praxi kladie dôraz na predlžovanie životnosti a trvanlivosti všetkých súčastí, a to vrátane nástrojov na aplikácie tvárnenia. Výber vhodného materiálu nástroja a následnej povrchovej úpravy zvyšuje nie len výkonnosť celého výrobného procesu, ale predlžuje aj intervaly výmeny týchto nástrojov a tým znižuje aj ekonomické náklady podniku.

Teoretická pasáž diplomovej práce bola cielená práve na vymedzenie nástrojových materiálov používaných vo všetkých odvetviach tvárnenia. Zároveň bola táto časť práce zameraná aj na vysvetlenie spôsobov opotrebenia týchto nástrojov, metódam hodnotenia tribologických vlastností týchto materiálov a povrchovými úpravami nástrojov s cieľom zvýšenia ich životnosti a výkonnosti.

Práve boridovanie je jedna z metód povrchových úprav nástrojov, ktorou sa zaoberala diplomová práca v jej praktickej časti. Konkrétne sa boridovali 2 nástrojové materiály ktoré majú hlavné využitie v oblasti tvárnenia s označením K605 (STN 19 614) a K100 (STN 19 436). Po aplikácii difúzneho boridovania pri rôznych parametroch (teplota, čas) sa následne na vzorkách z týchto materiálov pozorovala ich mikroštruktúra, vyhodnocovala hrúbka dosiahnutej boridickej vrstvy, merala mikrotvrdosť a následne sa vzorky podrobili testom adhézie (Mercedes test). Hlavný prínos tejto práce potom spočíval v podrobnej analýze týchto 2 materiálov a určení ekonomicky a účelovo najvhodnejších parametrov boridovania.

BIBLIOGRAFICKÉ ODKAZY :

ARAMIAN,A., a kol. in International Journal of Refractory Metals and Hard Materials - A review on the microstructure and properties of TiC and Ti(C,N) based cermets (© 2023) , ISSN 0263-4368, [cit. 30.10.2023] , dostupné na internete z : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436823002202>

BOBZIN,K., KALSCHEUER,C., TAYYAB,M., in Surface and coatings technology volume 471 – effect of crain coating properties on impact fatigue of tool steel , ISSN 0257-8972, (© 2023) [cit. 4.12.2023] , dostupné na internete z : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897223006448#s0040>

BÖHLER Slovakia , produktový list a chemické zloženie ocelí K605 a K100. Dostupné na internete z : <https://www.bohler.sk/sk/product-category/ocele-pre-pracu-za-studena/> , [cit. 28.3.2024]

CAMPOS-SILVA, I.E., in Thermochemical surface engineering of steels , chapter 18 – boriding to improve the mechanical properties and corrosion resistance of steels Pages 651-702 , ISBN 9780857095923 , (© 2015) , [cit. 4.12.2023], dostupné na internete z : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857095923500185#s0035>

EDENHOFER,B., a kol., in Thermochemical surface engineering of steels , chapter 13 – Carburizing of steels, Pages 485-553, ISBN 9780857095923 [cit. 4.12.2023] , (© 2015) , dostupné na internete z : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857095923500136#s0200>

ESSAM, M. a kol., in Materials - Influence of micro-alloying elements and deep cryogenic treatment on microstructure and mechanical properties of S5 cold work shock resisting tool steel (© 2023) , ISSN 2590-048X , [cit. 9.10.2023] dostupné na internete : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590048X23000122>

GÁBRIŠOVÁ,Z., BRUSILOVÁ,A., – Tepelné spracovanie návody na cvičenia , STU 2019 , ISBN 978-80-227-4894-0 ,[cit. 4.12.2023]

GROOVER,M.,P., in FUNDAMENTALS OF MODERN MANUFACTURING – Materials, processes and systems – Fourth edition, ISBN 978-0470-467002, (© 2010) [cit. 4.12.2023]

HAKIM, H., BLAŽOVSKÝ, J. , Technická Univerzita v Košiciach – fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove. Tribológia a servis strojov (© 2002) , ISBN : 807099875X , [cit. 28.3.2024]

HAZLINGER,M., MORAVČÍK,R., JURČI,P., – Materiálovotechnologická fakulta STU so sídlom v Trnave - Inžinierstvo povrchov (© 2022) , ISBN 978-80-8096-293-7 [cit. 20.11.2023]

JURČI, P., Ptačinová, J., - NÁUKA O MATERIÁLOCH II (© 2022) , ISBN 978-80-8096-295-1 [cit. 30.10.2023]

JURKO, J., ZAJAC, J., ČEP,R., in Top trendy v obrábání – II. Časť – Nástrojové materiály

KONYASHIN,I., RIES,B., in Cemented carbides – chapter 2 – classification and general characteristics of cemented carbides (© 2022) , [cit. 28.10.2023] , ISBN 9780128228203, dostupné na internete z : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128228203000045#f0040>

KURIAN,M., THANKACHAN,S., in Ceramic catalysts – Introduction : Ceramics classification and applications – abstract (© 2023) , ISBN 9780323857468 , [cit. 17.11.2023] Dostupné na internete z : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780323857468000096>

LEI,C., a kol., in Ceramics International - Influences of solution treatments on the microstructure and mechanical properties of TiCx-Cu (x = 0.5, 0.6, 0.7) cermets prepared by infiltration method (© 2023) , ISSN 0272-8842, [cit. 30.10.2023] , dostupné na internete z : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884223020965#fig3>

LIU, W., a kol., in Journal of Materials Research and Technology, A hot-compression bonding method for manufacturing large high-speed homogeneous steels (© 2022) , ISSN 2238-7854, [cit. 23.10.2023] , dostupné na internete z : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785422000436>

POZAUDA,A.,S., in In Plastics Design Library – Design and manufacturing of plastics products Chapter 5 – Basic data required for designing plastic parts (© 2021) , ISBN 9780128197752, [cit. 20.11.2023], dostupné na internete z : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128197752000115#s0010>

SARATH,P.S., a kol., In Elsevier Series on Tribology and Surface Engineering - Tribology of polymers, polymer composites and polymer nanocomposites – A journey to the tribological behavior of polymeric materials. (© 2023), ISBN 9780323907484 , [cit. 20.11.2023] , Dostupné na internete z : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780323907484000108> , <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/abrasive-wear>

SENTHIL,K.,P., a kol. in Materials Today : Review on laser surface hardening of alloy metals, ISSN 2214-7853 (© 2023) , [cit. 4.12.2023] , ISSN 2214-7853, dostupné na internete z : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323021612>

SIMMONS, C., MAGUIRE, D., PHELPS, N., - Manual of Engineering Drawing (Fifth Edition) (© 2020) , [cit. 16.10.2023] , ISBN 9780128184820, dostupné na internete z : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128184820000323#s0015>

SOSNOVÁ, M., HÁJEK, J., KRÍŽ, A., - Adhezívno kohezívne charkateristiky tenkých vrstiev určených pre nástroje na obrábanie plastov. Vrstvy a povlaky (© 2006) , ISBN : 80-969310-2-4. , [cit. 28.3.2024]

SOTOODEH, K., in Cryogenic Valves for Liquefied Natural Gas Plants - Chapter Four - Corrosion study and material selection for cryogenic valves in an LNG plant, ISBN 9780323995849 , (© 2022) [cit. 16.10.2023] , dostupné na internete z : <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/carbon-steel> , <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B978032399584900001X>

STATON, s.r.o. – Povlakovanie a výroba nástrojov [cit. 4.12.2023] , dostupné na internete z : https://www.staton.sk/wp-content/uploads/2015/11/Staton_Povlaky_SK_LR.pdf

TAVARES,A.F., a kol. in Wear - Effect of transfer layers on friction and wear mechanisms in strip drawing tests of commercially coated forming tools (© 2021), ISSN 0043-1648 , [cit. 20.11.2023] , dostupné na internete z : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164821001228>

TRZEPIECINSKI, T., LEMU, H., Recent Developments and Trends in the Friction Testing for Conventional Sheet Metal Forming and Incremental Sheet Forming (© 2019) [cit. 28.3.2024] , dostupné na internete z : https://www.researchgate.net/publication/338166344_Recent_Developments_and_Trends

[in the Friction Testing for Conventional Sheet Metal Forming and Incremental Sheet Forming](#)

VOESTALPINE high performance metals cz s.r.o. - CVD povlakovanie [cit. 4.12.2023] , dostupné na internete z : <https://www.voestalpine.com/highperformancemetals/cs/cs/sluzeb/povlakovani/pozadavky-k-cvd-povlakovani-kovovych-dilu/>

WANG,Y., a kol., in Journal of Materials Research and Technology , Advanced manufacturing of high-speed steels: A critical review of the process design, microstructural evolution, and engineering performance (© 2023) , ISSN 2238-7854 , [cit. 23.10.2023] Dostupné na internete z : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S223878542300964X>

WINTER,K.-M., KALUCKI,J., KOSHEL, D., in Thermomechanical surface engineering of steels, chapter 3 – Process technologies for thermochemical surface engineering Pages 141-206 , ISBN 9780857095923, (© 2015) , [cit. 4.12.2023] , dostupné na internete z : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857095923500033#s0225>

YAO,J., a kol. in Optics & Laser Technology - Wear and corrosion performance of laser-clad low-carbon high-molybdenum Stellite alloys (© 2018) , ISSN 0030-3992, [cit. 30.10.2023] Dostupné na internete z : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399218302251#b0005>

YARASU,V. a kol., in Wear - Sliding wear behaviour of conventional and cryotreated PM Cr-V (Vanadis 6) ledeburitic tool steel (© 2023) , ISSN : 0043-1648, [cit. 9.10.2023] , dostupné na internete z : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164823004908>

YUAN,Q., a kol., in Metal - Civil Engineering Materials (© 2021) , ISBN 9780128228654, [cit. 16.10.2023] Dostupné na internete z : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128228654000040#f0010>

ZAMBRANO,O.A., JIANG,J., in WEAR - The effect of VC content on the scouring erosion resistance of tool steels (© 2023) , ISSN : 0043-1648 , [cit. 9.10.2023] dostupné na internete z : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164823000522#bib1>

ZDRAVECKÁ, E., ONDÁČ, M , Technická Univerzita v Košiciach, strojnícka fakulta – Tribológia povrchových vrstiev (© 2012) , ISBN : 978-80-553-0885-2 , [cit. 28.3.2024]

ZDRAVECKÁ,E., TKÁČOVÁ,J., TKÁČ,J., - Tribologické povlaky pre tvárniace stroje [cit. 20.11.2023] , dostupné na interente z : <https://www.engineering.sk/strojarstvo-extra/2162-tribologicke-povlaky-pre-tvarniace-stroje>

ČESTNÉ VYHLÁSENIE

Čestne vyhlasujem, že som diplomovú prácu vypracoval samostatne a s použitím literatúry ktorú som uviedol v zozname bibliografických odkazov a s odborným vedením a pomocou vedúceho diplomovej práce, Doc. Ing. Janou Šugárovou, PhD.

V Trnave, 21.4.2024

.....

Bc. Alexander Gula