

2 ZVYŠOVANIE ŽIVOTNOSTI ZÁPUSTIEK

Úvod

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

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

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

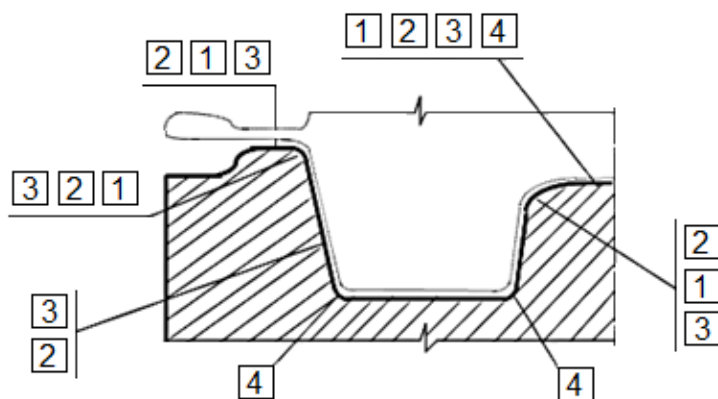
2.1 Príčiny vyradenia zápustiek z prevádzky

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

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

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

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



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

2.2 Základné faktory ovplyvňujúce životnosť zápustiek

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

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

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

- a) vonkajšie – kovaný materiál a teplota kovaného polotovaru, použité technologické zariadenie (napr. kovací lis, buchar), cyklus kovania, druh maziva, spôsob mazania a pod.
- b) vnútorné – tvar výkovku, hmotnosť výkovku, kovací tlak v dutine a pod.

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

2.3 Mechanické spevňovanie povrchovej vrstvy

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

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

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

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

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

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

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



Obr. 2.2. Kovací lis LZK 2 500/4

Postup výroby výkovku je takýto:

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

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



Obr. 2.3. Linka na výrobu výkovku

1 – indukčný ohrev, 2 – kovanie na lise LZK 2 500/4, 3 – ostrihovanie výronku na lise LDO 315

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

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

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

Tabuľka 2.2. Tepelné spracovanie ocele 19 552

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

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

Tabuľka 2.3. Namerané hodnoty pevnosti zápustky

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

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



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

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



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

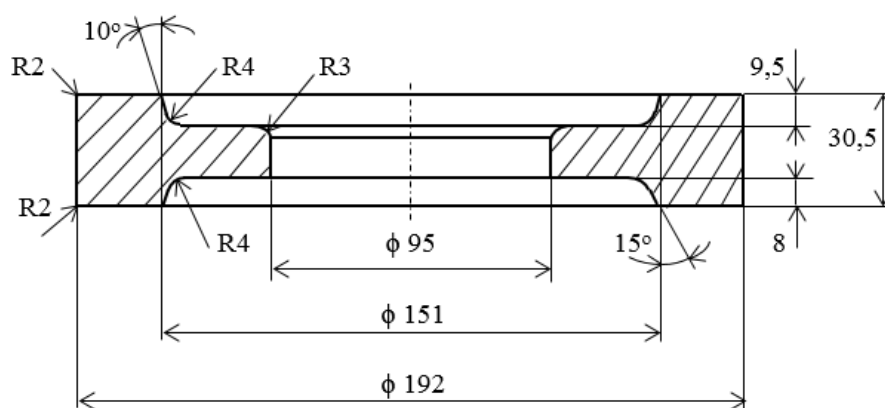
Kovacia zápustka na kovanie v troch operáciách (ubíjanie, predkovanie, dokovanie) bola určená pre výrobu výkovku, ktorý je znázornený na Obr. 2.6. Na Obr. 2.7 sú rozmery daného výkovku. Ide o výkovok kola do diferenciálu osobného automobilu. (Haladová, 2019)

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

Materiál polotovaru: oceľ QS 1916 (1.7131).



Obr. 2.6. Pohľad na výkovok kola diferenciálu



Obr. 2.7. Rozmery výkovku

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

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

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

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

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

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

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

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

2.4 Nitridácia

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

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

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

Tabuľka 2.5. Spracovanie jednotlivých sád predkovacích zápustiek

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

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

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

Označenie vzorky	Tvrdosť povrchu HV _{0,3}	Pevnosť v ťahu v jadre R_m (MPa)	Medza klzu v jadre $R_{p0,2}$ (MPa)
1	-	1 590	1 425
2	763	1 571	1 397
3	1 050	1 595	1 425

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

Tabuľka 2.7. Priebeh tvrdosti HV_{0,3} od povrchu smerom do jadra u vzoriek s aplikáciou nitridácie

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

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

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

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

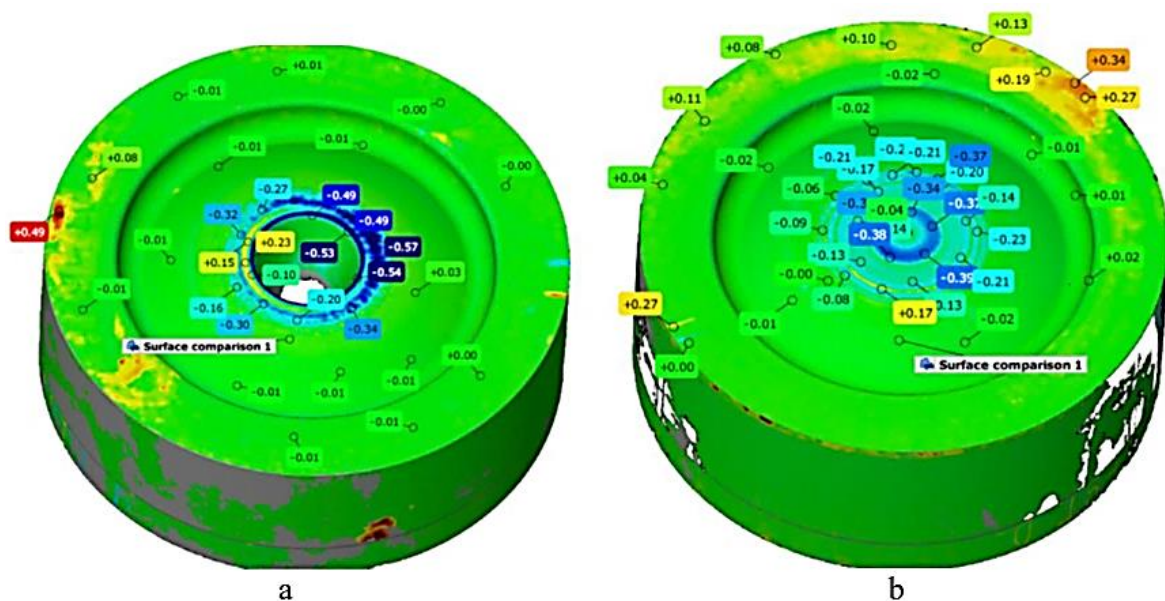
na porovnanie jednotlivých sád zápustiek pri rovnakých podmienkach kovania bola stanovená hranica 600 ks výkovkov, ktoré boli vykované na každej testovanej sade zápustiek.

Podmienky pri kovaní:

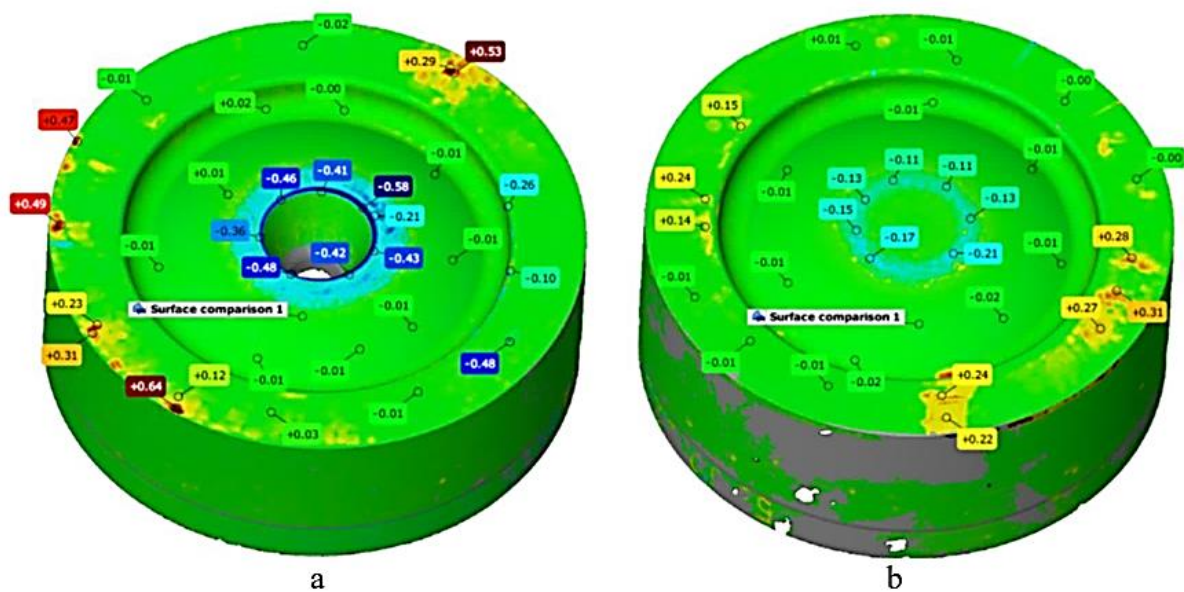
- použitý kovací stroj zvislý kovací lis LZK 2 500/4,
- teplota polotovaru pri kovaní 1 200 °C,
- pracovný takt 16 až 21 sekúnd,
- ručná obsluha kovacieho lisu,
- mazanie zápustky – manuálne mazadlom pri koncentrácii 1 : 10 (1 diel mazadla a 10 dielov vody).

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

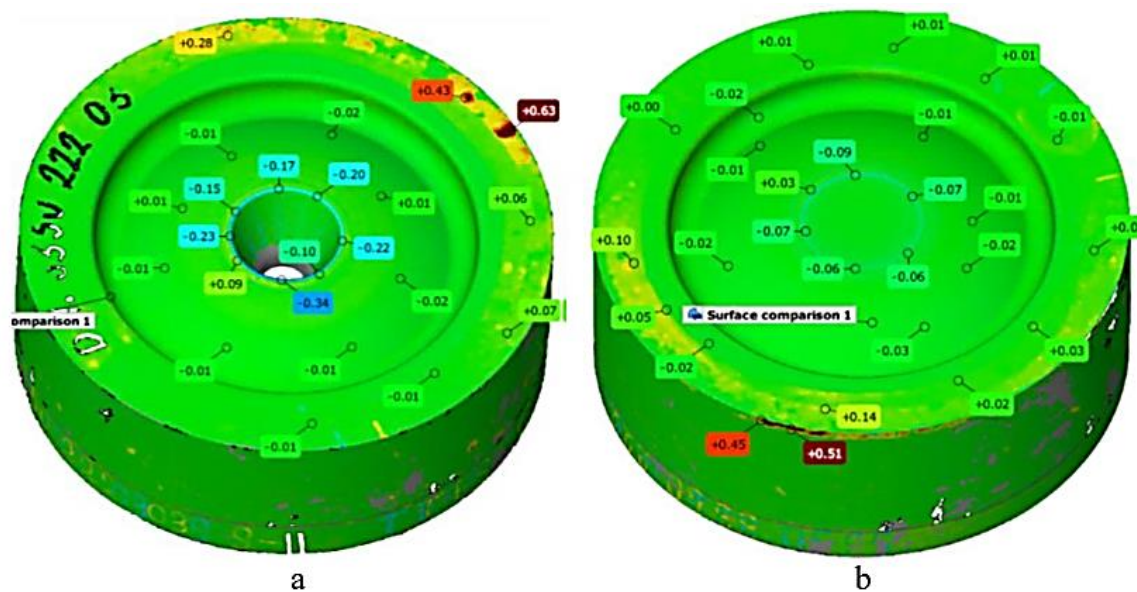
Trvanlivosť (základná životnosť resp. prevádzková životnosť) sa určila prerušením procesu kovania na základe medzioperačnej kontroly. Kovanie bolo zastavené v prípade, že sa opotrebenie zápustky začalo prenášať na predkovok v podobe rôznych vrypov.



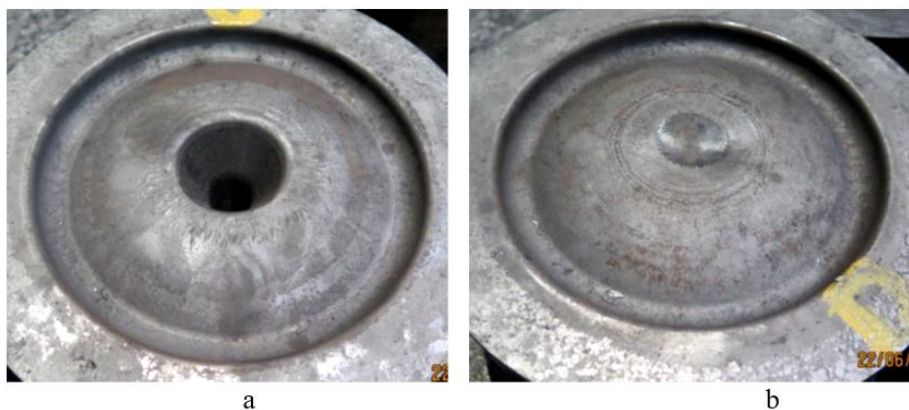
Obr. 2.8. Sken dolnej časti zápustky (vzorka 1) bez nitridácie po vykovaní 600 ks (a), sken hornej časti zápustky (vzorka 1) bez nitridácie po vykovaní 600 ks výkovkov (b)



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



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



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



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



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

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

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

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

Tabuľka 2.8. Počet vykovaných kusov výkovkov do renovácie zápustky

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

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

2.5 Boridovanie

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

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

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

2.5.1 Proces boridovania

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

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

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

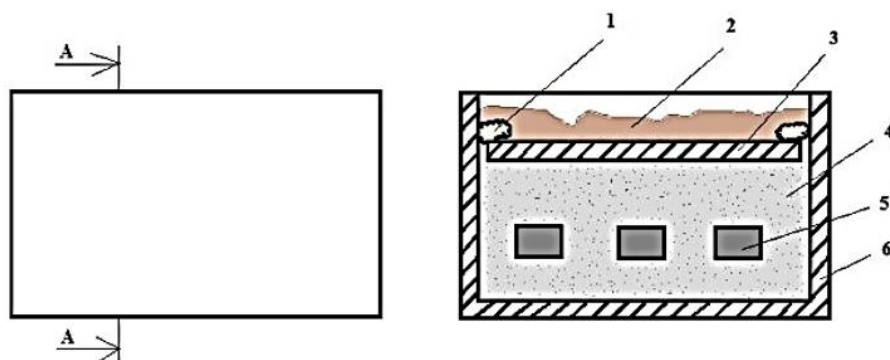
Nakoľko boridovanie prebieha pri vysokých teplotách nad teplotou popúšťania nástrojových ocelí určených na výrobu zápustiek a nástrojov pracujúcich za tepla musí po boridovaní nasledovať ešte kalenie a popúšťanie.

2.5.2 Experimentálne skúšky

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

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

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



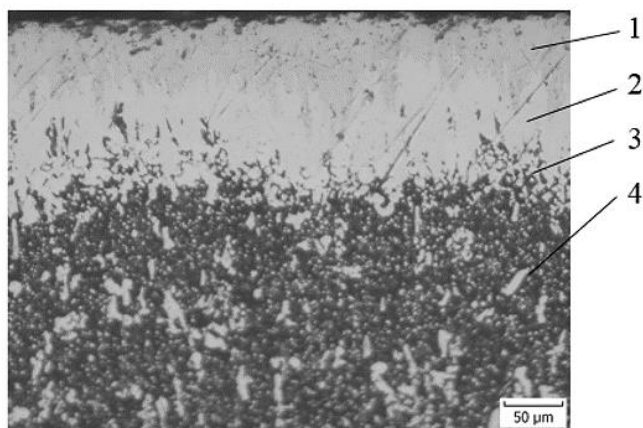
Obr. 2.14. Rez kontajnera na boridovanie

1 – termovit, 2 – tavitelný uzáver, 3 – kovová platňa, 4 – boridovacia zmes, 5 – vzorka, 6 – kontajner

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

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

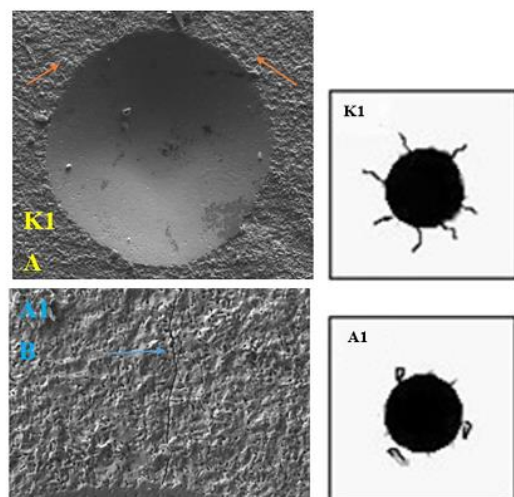
Pri kratšej dobe boridovania pri teplote boridovania 1 000 °C sa priemerná dosahovaná hrúbka boridickej vrstvy pohybovala od 35 do 62 µm. Pri nástrojových oceliach doby boridovania musia byť dlhšie nakoľko vyšší obsah legujúcich prvkov najmä chrómu spomaľuje proces difúzie bóru do povrchovej vrstvy.



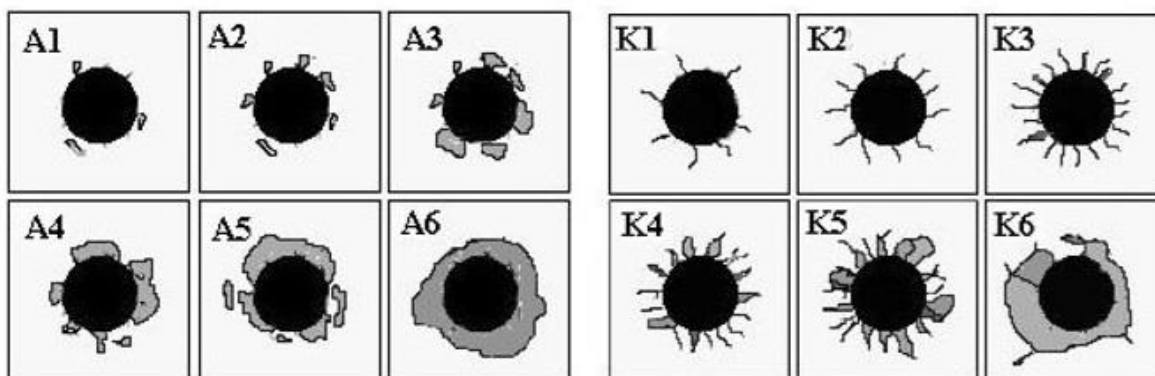
Obr. 2.15. Mikroštruktúra boridovanej vrstvy (1 000°C/10 hodín)

1 – FeB, 2 – Fe₂B, 3 – difúzna zóna, 4 – základný materiál

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



Obr. 2.16. Výsledok Mercedes testu



Obr. 2.17. Etalón na vyhodnocovanie adhezívno-kohezívnych vlastností

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

Záver

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

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

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

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

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

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

Zoznam bibliografických odkazov

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

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

BÖHLER. 2016. *Prevodník ocelí Böhler* [online] 2020 [cit. 2020-10-12]. Dostupné na internete:

<https://www.bohler.sk/app/uploads/sites/110/2019/09/B%C3%B6hler-katal%C3%B3g-2016.pdf>.

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

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

- HAZLINGER, M. a MORAVČÍK, R. 2013.** *Chemicko-tepelné spracovanie materiálov*. Nakladateľstvo STU Bratislava, 171s. ISBN 978-80-227-3924-5.
- HUDÁKOVÁ, M., PINKE, P. a KUSÝ, M. 2008.** Vplyv parametrov boridovania a prípravy povrchu na nástrojovú oceľ X210Cr12. In *Vedecké práce MTF STU v Bratislave so sídlom v Trnave. Research papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology in Trnava*. Č. 25 (2008), s. 63-68. ISSN 1336-1589.
- JÍLEK, L. 2012.** Zvyšovanie životnosti nástrojů pro kování. *Hutnické listy*. ISSN 0018-8069.
- JÍLEK, L. 2018.** Současný stav ve zvyšování životnosti zápuštěk. *Kovárenství*, 63, s. 15-23. ISSN 1213-9289.
- JKZ. 2020.** *Nástrojové oceli* [online] 2020 [cit. 2020-10-12]. Dostupné na internete: <https://www.jkz.cz/cs/produkty/nastrojove-oceli/na-vyrobu-forem/w-nr-12343-esu/>.
- KURACINA, V., MORAVČÍK, R., HAZLINGER, M., BÍLIK, J. a KAPUSTOVÁ, M. 2020.** Zvyšovanie životnosti zápuštěk. *Kovárenství*, 72, s. 20 – 25. ISSN 1213-9289.
- MORAVČÍK, R., HAZLINGER, M., HUDÁKOVÁ, M., MARTINKOVIČ, M. a ČÍČKA, R. 2010.** *Náuka o materiáloch I*. Trnava: AlumniPress. ISBN 978-80-8096123-7.
- MORAVČÍK, R. a HAZLINGER, M. 2017.** *Degradation Processes and Life - Time Prediction*. Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk, s. r. o., Plzeň, pp. 310. ISBN 978-80-7380-670-5.
- PETRMICHL, R. 2017.** Termo-mechanická analýza pro stanovení životnosti nástrojů zápuštěkového kování. *Kovárenství*, 63, s. 24 – 27. ISSN: 12132-9289.
- POKORNÝ, Z., KADLEC, J., HRUBÝ, V., POSPÍCHAL, M., TRAN, D. Q., MRÁZKOVÁ, T. a FECSO, L. 2011.** Hardness of plasma nitrided layers created at different conditions. *Chemické Listy* 105, s.717.
- SEDLICKÁ, V., HUDÁKOVÁ, M. a GRGAČ, P. 2005.** Vplyv boridovacieho prášku na tvorbu boridickej vrstvy na oceli Böhler K 190 Isomatrix PM. The influence of borozing powder on boronized layer of Böhler K 190 Isomatrix PM steel. In *Materials Science and Technology [elektronický zdroj]*. Roč. 5, č. 5 [cit. 2005-12-29 (2005)]. ISSN 1335-9053.