

Zkušební boridace při výrobě zubů dobývacího orgánu rýpadla

Ing. Vlastimil Moni, Ph.D.¹, David Hradil², Ing. Tomáš Miletič¹

¹Výzkumný ústav pro hnědé uhlí a.s., Most, moni@vuhu.cz

²COMTES FHT a.s., Průmyslová 995, Dobřany

Přijato: 24. 7. 2019, recenzováno: 13. 8. a 18. 10. 2019

Abstrakt

Obsahem předmětného článku je popis zkušební boridace vzorků zubů z cílem zajistit nejvyšší možnou odolnost zubu proti opotřebení. Popisovaný vývoj je realizován v rámci projektu, který řeší výzkum optimalizace tvarů, a především materiálů použitých při výrobě řezných orgánů zemních a dobývacích strojů v závislosti na těžebních podmínkách s využitím nejmodernějších poznatků z oblasti materiálového inženýrství a metalurgie, kryogeniky a nanotechnologií za účelem zvýšení efektivity rozpojovacího procesu a životnosti předmětného klíčového uzlu zemních a dobývacích strojů.

Experimental Boridation of teeth of the bucket wheel excavator

The article is dedicated to the experimental boridation of tooth samples to ensure the highest possible resistance of the tooth against wear. The described development is carried out within the framework of the project, which solves the optimisation of shapes, and especially materials used in the production of cutting elements of ground and mining machines in relation to the mining conditions using the most modern knowledge from the area of material engineering and metallurgy, cryogenics and nanotechnologies. The aim of the project is to increase the efficiency of the separation process and the lifetime of the key node of the ground and mining machines.

Das Prüfborieren bei der Erzeugung von Zähnen des Schneidwerkzeuges von Baggern

Der Artikel beschreibt das Versuchsborieren der Zähnemuster mit dem Ziel, die höchst mögliche Verschleißbeständigkeit des Zahnes zu sichern. Die beschriebene Entwicklung wird im Rahmen des Projektes umgesetzt, welches die Untersuchung der Optimierung von Form und vor allem von Werkstoffen, die bei der Herstellung der Schneidwerkzeugen für Erd- und Abbaugeräte genutzt werden, löst, die in Abhängigkeit von Abbaubedingungen und mit der Anwendung der neuesten Erkenntnisse aus dem Bereich Werkstoffingenieurwesen, Metallurgie, Kryogenik sowie Nanotechnologien löst mit dem Ziel, die Effektivität des Löseprozesses und der Lebensdauer dieses gegenständlichen Knotenpunktes zu erhöhen.

Klíčová slova: zušlechťení materiálu, životnost, metalurgie, kryogenika, boridace, dobývací stroje.

Keywords: material improvement, time of life, metallurgy, cryogenics, boridation, mining machines.

1 Úvod

Vstupní analýzou materiálu zubu dobývacího orgánu kolesových rýpadel používaných při povrchovém dobývání hnědého uhlí v Mostecké pánvi a následným provedením prvotních analýz a zkušebních procesů dodatečného tepelného a chemicko-tepelného zpracování byla pověřena firma COMTES FHT a.s. Zuby č. 2673 z materiálu s označením VP-7 byly dodány v rámci řešení projektu TA ČR s názvem „Výzkum optimalizace tvaru a materiálu řezných orgánů zemních a dobývacích strojů“ ve stavu po zušlechťení (kalení a popuštění), které proběhlo ve slévárně výrobce zubů. K určení vlivu povrchové vrstvy rýpadlového zubu na výslednou kvalitu boridace posloužilo zkušební boridování dvou vzorků.

2 Zkušební boridace vzorků

Experiment realizovaný v únoru 2019 spočíval v porovnání různých povrchové kvality zubů. Nejnížší jakost povrchu vykazoval zub dodaný přímo ze slévárny bez odstraněných okují a nečistot, viz obrázky v kapitolách uvedených dále. Další dva zuby byly zaslány na speciální povrchové tryskání. Jako tryskací medium byla použita ocelová drť. Cílem tryskání bylo odstranit především silně zokujenou povrchovou vrstvu

a veškeré povrchové nečistoty, které pokrývají celý povrch testovaného zubu. Pro určení dostačující kvality tryskání byly zvoleny dva postupy.

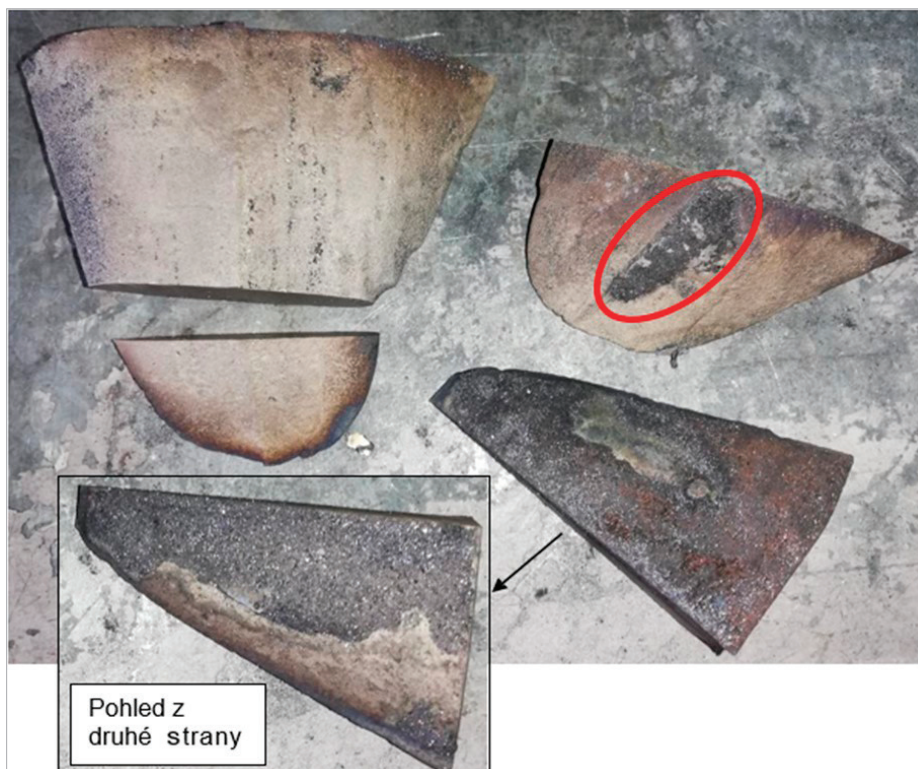
První postup vedl k zcela čistému a stříbrnému povrchu (kvalita SA3), druhý postup měl za cíl odstranit okuje a největší nečistoty (kvalita SA2). Cena za tryskání na nejvyšší povrchovou jakost, tj. SA3, je zhruba 2x vyšší oproti tryskání na povrchovou jakost SA2 [10]. Vizualně lze porovnat výsledky tryskání na obrázku č. 1 [1].

Boridace vzorků proběhla stejným způsobem jako v předchozím případě, tj. výřezy ze zubů byly zasypány v boridovacím prášku. Zpracování proběhlo při teplotě 900 °C, výdrž na této teplotě byla 13 hodin. Poté následovalo zušlechťení.

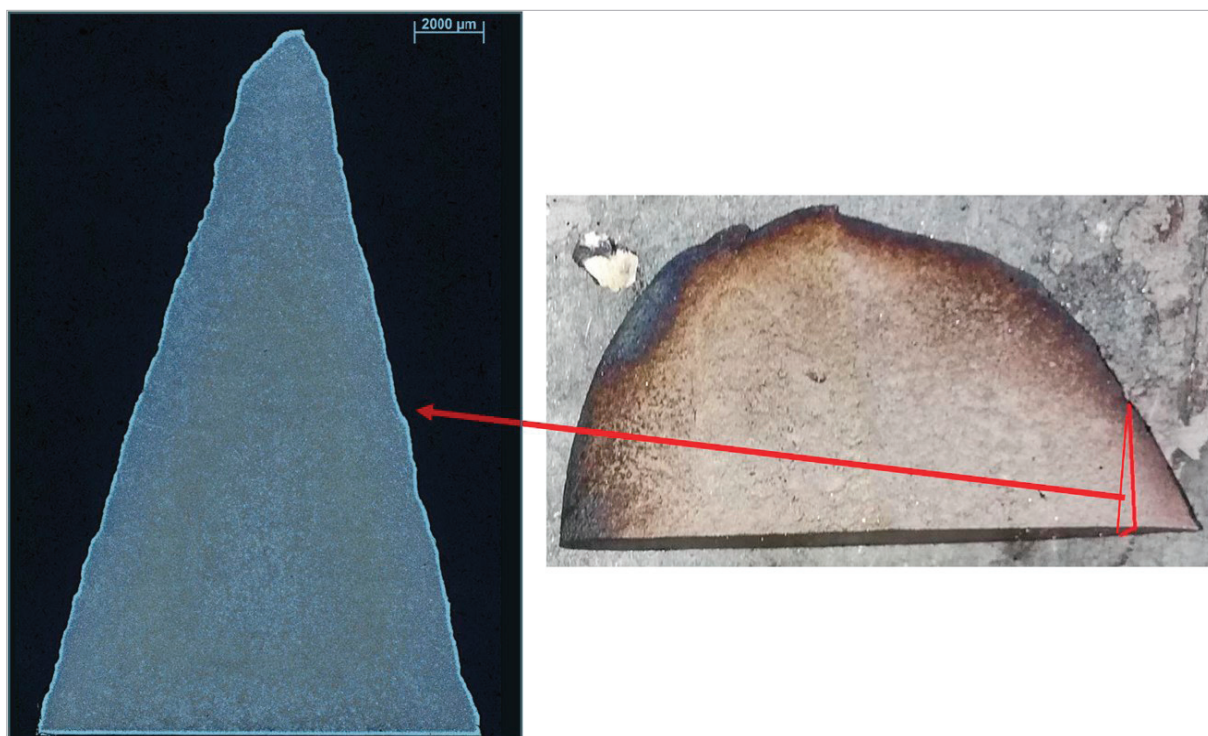
Již z vizuální stránky (obrázek č. 2) lze posoudit vhodnost kvality povrchu pro boridování. Segment zubu, který byl tryskán na nejvyšší kvalitu, vykazoval jednotnou kvalitu povrchu bez vytvořených okují. Na povrchu nebyla přítomná (přípečená) žádná vrstva prášku. Segment zubu tryskaný na kvalitu SA2 měl na hůře otryskaných místech přípečenou vrstvičku boridovacího prášku (v červeném oválu), zbytek povrchu byl podobný povrchové kvalitě vzorku po tryskání na jakost SA3. Netryskaný segment zubu byl z velké části



Obr. 1: Tryskané zuby, horní díl: kvalita SA2 (odstranění okují a největších nečistot), dolní díl: kvalita SA3 (zcela čistý a stříbrný povrch).



Obr. 2: Boridované segmenty zubů, největší díl s odříznutou špičkou – tryskán na jakost SA3, díl vpravo nahoře – tryskán na jakost SA2, díl vpravo dole – netryskaný segment zubu.



Obr. 3: Pozorovaný segment zubů, povrch tryskaný na jakost SA3 - nezušlechtěno.

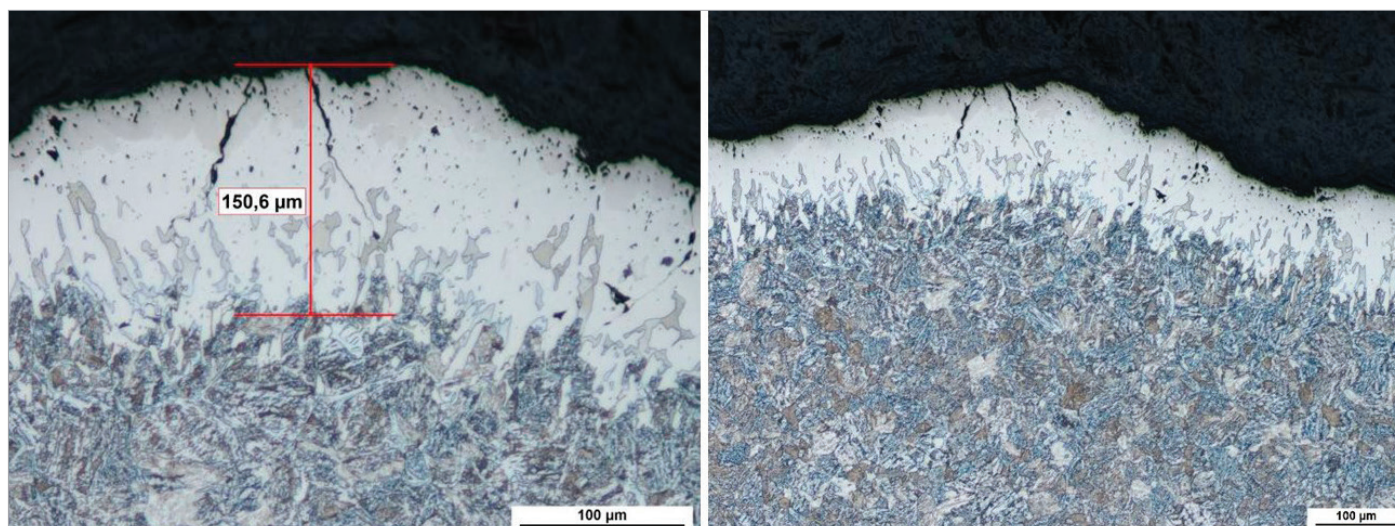
pokryt velmi pevně připečenou vrstvou boridovacího prášku. Výsledná boridace byla testována pomocí metalografické analýzy.

3 Vyhodnocení zkušební boridace vzorků

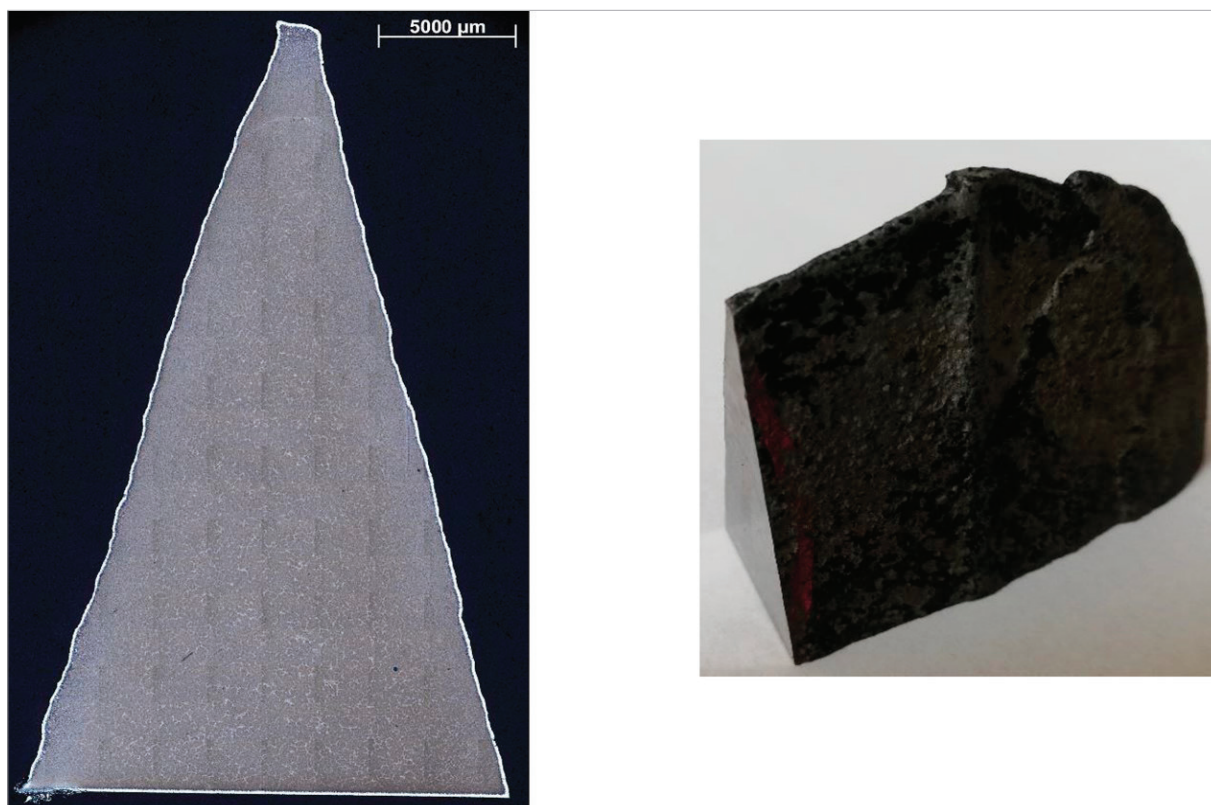
Mikrostrukturní analýza po boridaci byla provedena u tryskaného zubu na kvalitu SA3 před a po zušlechtění, u netryskaného zubu ve stavu bez zušlechtění. Tryskané zuby, jejichž analyzované výřezy vidíme na obrázku č. 3 a 5, byly po obvodové části výřezů tvořeny boridovanou vrstvou téměř konstantní tloušťky. Detailní analýzu zubů vidíme na obrázku č. 4 a 6. Tloušťka boridované vrstvy je před zušlechtěním cca 150 µm, po zušlechtění nepatrně klesá na cca 130 µm. Rozdíl v tloušťce může být způsoben rozdílným výběrem

pozorovaného místa. Z měření tvrdosti boridované vrstvy byla určena průměrná tvrdost cca 1 590 HV_{0,1}, která je nezávislá na následném zušlechtění jádra součásti. Tvrdost jádra po zušlechtění je cca 360 HV₁, mikrostruktura odpovídá feriticko-perlitické matici. Po zušlechtění vzrostla tvrdost jádra na cca 525 HV₁, tj. mikrostruktura odpovídá martenzitické matici.

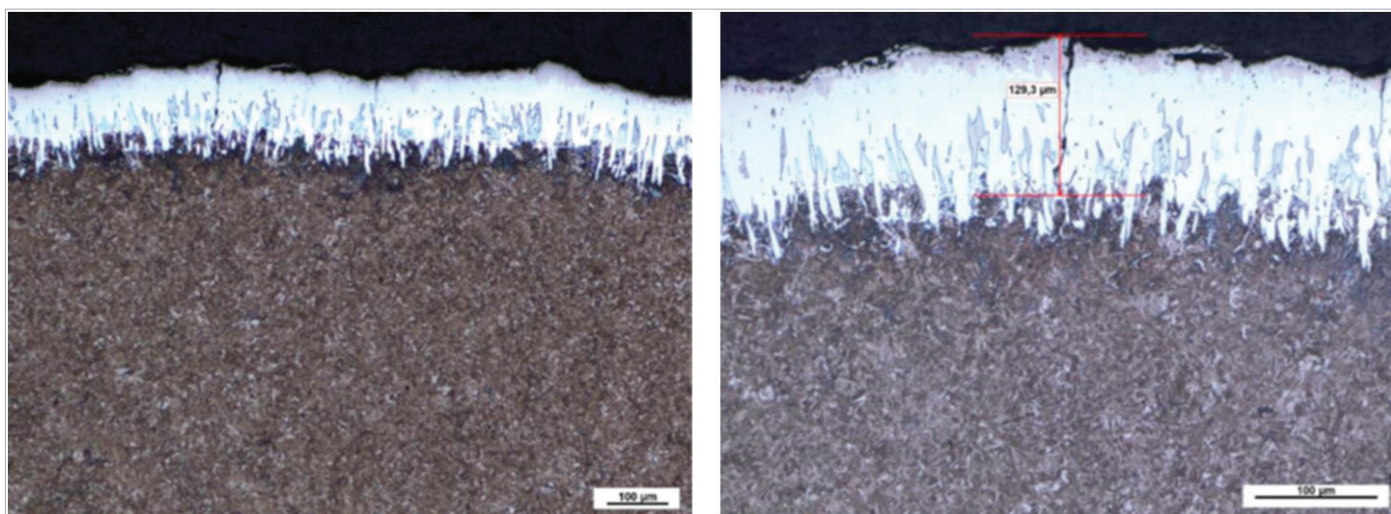
Na obrázku č. 7 vidíme snímky netryskaného vzorku zubu po boridaci. Velká část povrchu předmětného zubu je tvořena připečenou vrstvou boridovacího prášku. Cílem této analýzy bylo především zjistit, jestli se pod připečenou vrstvou nenachází požadovaná boridovaná (bílá) vrstva. Po rozřezání netryskaného segmentu zubu byla pod připečenou vrstvou přítomna rozsáhlá pórovitá struktura – viz černé



Obr. 4: Detail na boridovanou vrstvu, povrch tryskaný na jakost SA3 - nezušlechtěno.



Obr. 5: Pozorovaný segment zubů, povrch tryskaný na jakost SA3 – zušlechtěný stav.



Obr. 6: Detail na boridovanou vrstvu, povrch tryskán na jakost SA3 – zušlechtěný stav.

oblasti vyznačené elipsou na obrázku č. 7 vpravo nahoře. Již z makrosnímku na obrázku č. 7 vlevo nahoře je patrné, že boridovaná vrstva není pod připečeným boridovacím práškem přítomna. Povrch je naboridovaný pouze v hrotové části zubu, kde nebyly přítomny okuje a v části kde byl segment zubu odřezán (povrch řezu). Detailní snímek připečeného boridovacího prášku vidíme na obrázku č. 7 vpravo uprostřed, v připečeném boridovacím prášku jsou rozdrobeny částice okujů a dohromady tvoří nehomogenní křehkou vrstvu. Povrch pod touto vrstvou není naboridovaný a je stejný jako mikrostruktura jádra součásti. Naboridovaná hrotová část zubu vykazuje tloušťku boridované vrstvy cca 140 µm, v místě

řezu je tloušťka boridované vrstvy cca 150 µm. Z těchto poznatků lze konstatovat, že je možné boridovat lehce zoxidovaný povrch (hrotová část zubu), avšak přítomnost okujů a nečistot na povrchu součásti neumožňují boridaci substrátu a proto je nutné je zcela odstranit - viz tryskání na jakost povrchu SA3. Tvrdost boridované vrstvy byla v tomto případě opět cca 1 590 HV_{0,1}, tvrdost jádra byla naměřena na hodnotě cca 330 HV_{0,1}.

4 Boridování sady zubů

Na základě výsledků testování vzorků popsaných v předchozí

kapitole byly zuby určené k boridování otrýskány na kvalitu SA3 - viz obrázek č. 1. Z důvodu složitosti tvaru a specifických rozměrů byly vytvořeny speciální nádoby, které zvýšily

efektivnost boridace a zároveň snížily množství spotřebovaného prášku, což vedlo k výrazné úspoře nákladů - viz obrázek č. 8. Nádoby byly navrženy s cílem naboridování hrotu zubů

Tab. 1: Naměřená tvrdost boridované vrstvy – před zušlechtním.

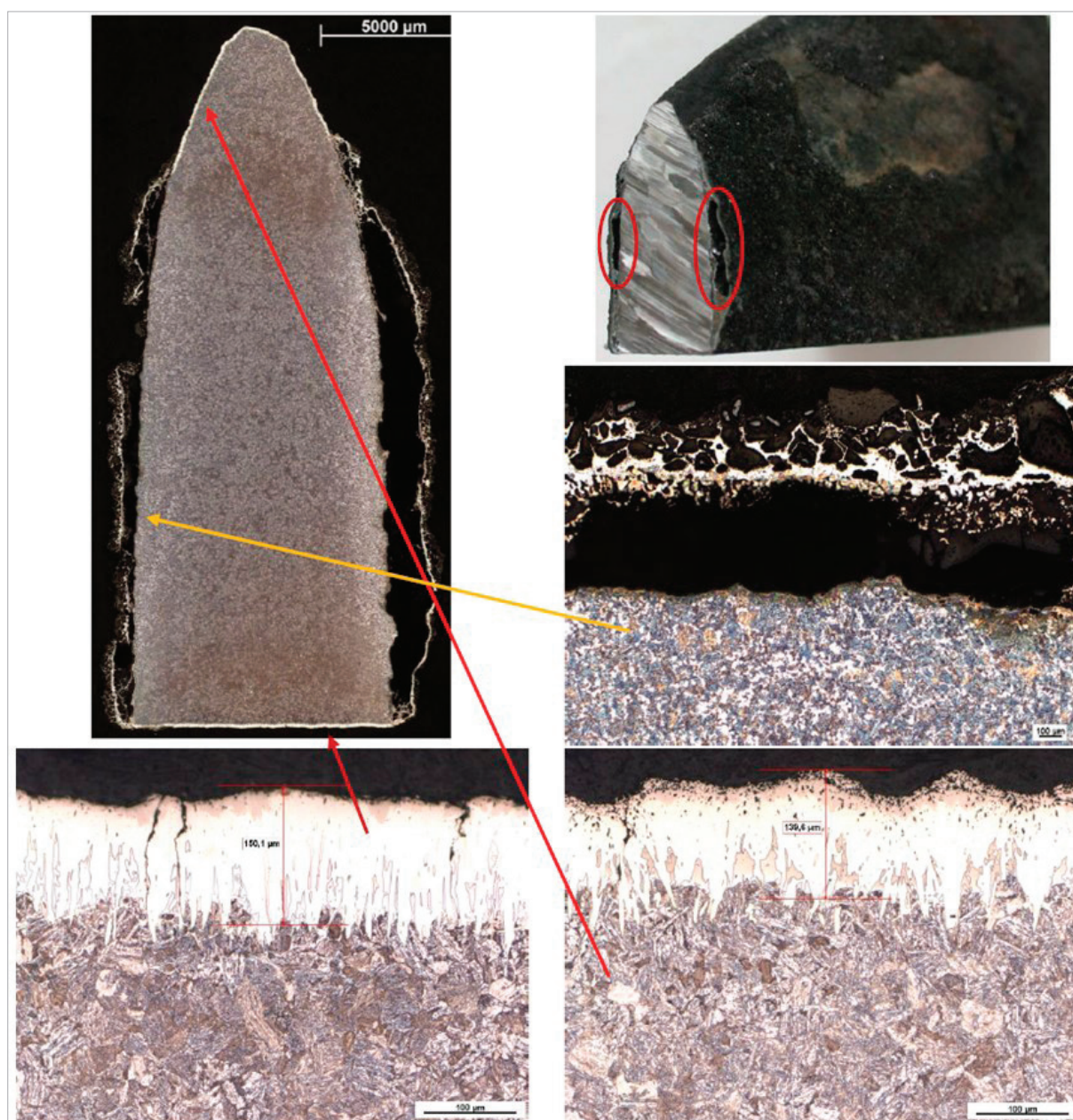
Tvrdost HV0,1					Průměr HV0,1
1 571	1 540	1 586	1 736	1 555	1 598

Tvrdost jádra před zušlechtním 360 HV1

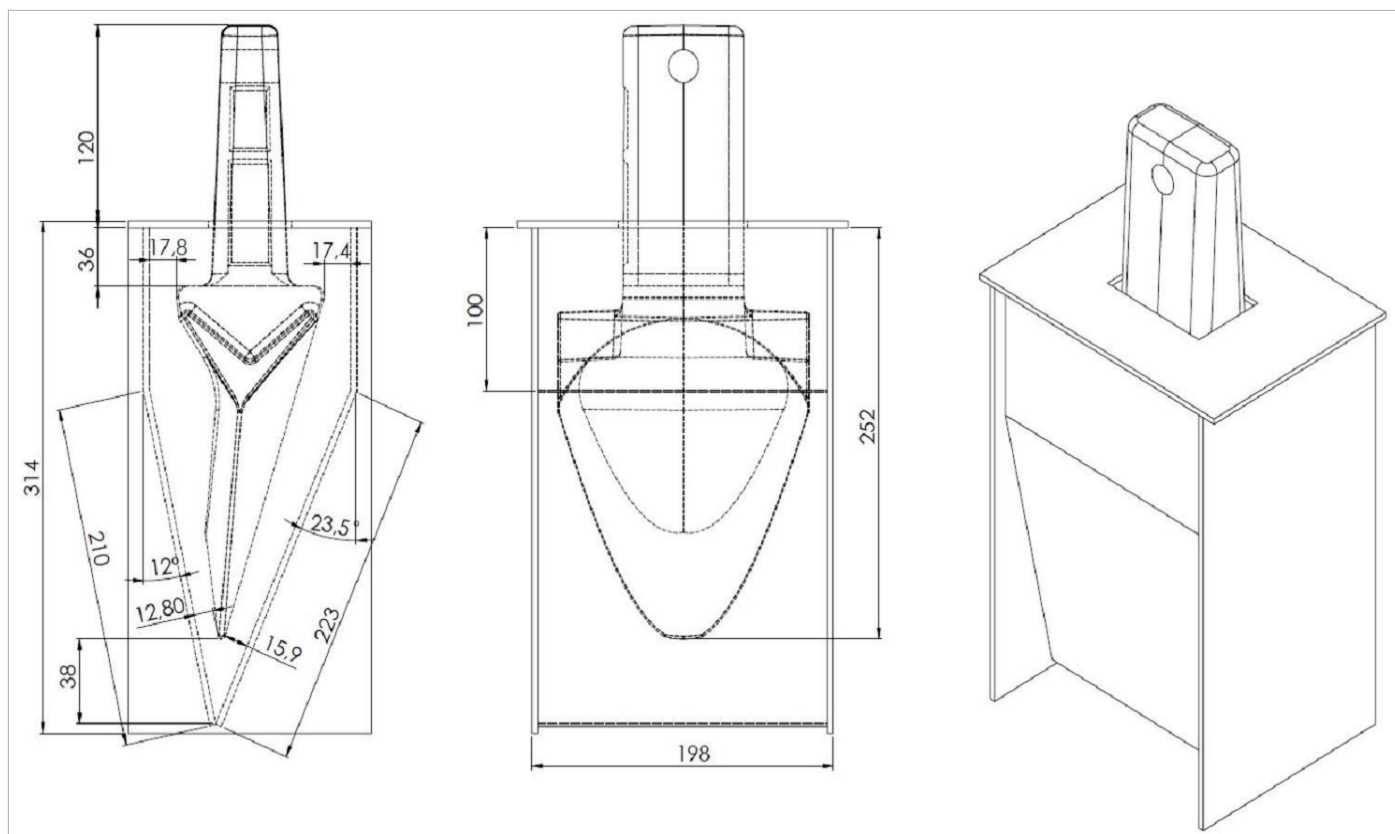
Tab. 2: Naměřená tvrdost boridované vrstvy – po zušlechtní.

Tvrdost HV0,1					Průměr HV0,1
1 701	1 540	1 526	1 571	1 602	1 588

Tvrdost jádra po zušlechtní 525 HV1



Obr. 7: Pozorovaný segment zubu (nahore), povrch bez tryskání – nezušlechtný stav, detail na připečenou vrstvu (vpravo uprostřed), detail na boridovanou vrstvu – povrch vytvořený řezem (vlevo dole) a horní hrana zubu bez okují (vpravo dole).



Obr. 8: Výkres navržené nádoby pro boridování zubů.



Obr. 9: Uložení zubu v nádobě a uložení vsázky / nádob v šachtové peci.

Tab. 3: Ekonomické zhodnocení navrhovaných úprav materiálu zubů [5]

Navržená úprava	Cena [Kč]	Zvýšení životnosti	Zvýšení pořizovacích nákladů
původní zub	cca 800 (2019)	1x	1x
zušlechťení	800+1000	4x	2,25x
kryogenika č. 1	800+2000	4x	3,5x
kryogenika č. 2	800+2000	4x	3,5x
boridace	800+8500	40x	12x

Pozn. 800 Kč. je cena za pořízení nového zubu + cena za dodatečnou kusovou úpravu

se současnou minimalizací místa v pecním zařízení. Nádobou bylo ušetřeno cca 4 kg boridovacího prášku, v nákladech to představuje úsporu cca 2 400,- Kč na každou nádobu. Těchto nádob bylo vyrobeno 8. Zuby byly zasypány až po začátek upínací části - viz obrázek č. 9. Boridování proběhlo v šachtové peci v jedné vsázce, všechny zuby jsou tedy z hlediska boridace zpracovány totožně. Teplota boridace byla 900 °C s výdrží 13 hodin. Po vychladnutí zubů následovalo kalení při teplotě 830 °C s výdrží 50 minut, s ochlazením v oleji. Popouštění proběhlo při teplotě 250 °C s výdrží 3 hodiny. Povrchové vlastnosti boridovaného zubu odpovídaly stavu zobrazeném na obrázcích č. 5 a 6.

5 Závěr

V rámci vývojového projektu TA ČR s názvem „Výzkum optimalizace tvaru a materiálu řezných orgánů zemních a dobývacích strojů“, jehož cílem je zvýšení životnosti zubů dobývacích orgánů kolesových rýpadel a zemních strojů obecně, byla provedena analýza dodaných zubů č. 2673 z materiálu s označením VP-7 a následné dodatečné tepelné a chemicko-tepelné zpracování zubů, které byly podrobeny tribometrické zkoušce metodou Pin on-disk [2] a abrazivní zkoušce proti opotřebení na zkušebním stroji SVÚM.

K zušlechťení zubů bylo vybráno klasické tepelné zpracování [2], kryogenní tepelné zpracování [2] a boridování. Nejvyšší odolnost proti opotřebení vzhledem k původnímu stavu metodou Pin-on-disk a následnou abrazivní zkouškou proti opotřebení na zkušebním stroji SVÚM v porovnání k původnímu stavu vykazoval boridovaný zub, a to více než 40x. Vyhodnocovaný koeficient Ψ_{abr} byl v případě boridovaného povrchu 4,31, což je u této zkoušky extrémně dobrý výsledek. Odolnost proti abrazivnímu opotřebení je tak u těchto vzorků na výborné úrovni. Nejhorší výsledek vykazoval původní stav materiálu, koeficient Ψ_{abr} byl pouze 1,28. Výsledek je způsobem pravděpodobně horší kvalitou zušlechťení v jádru součásti. Kryogenní zpracování s výdrží 2 hodiny a 8 hodin vychází velmi podobně, tj. koeficient opotřebení 1,42, resp. 1,44. Odolnost vzrostla oproti původně zušlechťenému stavu zhruba 4x. Nepatrně lepší výsledky jsou pozorovány dle očekávání u kryogenního zpracování s výdrží 8 hodin. V reálných podmínkách při osazení rýpadlového korečku může být odolnost výrazně odlišná vzhledem k jinému charakteru opotřebení.

Teoretická úspora finančních nákladů vyplývajících z výsledků laboratorních testů dodatečných materiálových

úprav zubů, jejichž výsledky byly publikovány v předchozím čísle časopisu, jsou spolu s výsledky realizované boridace přehledně shrnuty v tabulce č. 3. Z uvedených tabulek je patrné, že po odečtení dalších finančních nákladů na realizaci dodatečné úpravy a po započítání teoretického zvýšení životnosti vychází s nulovou bilancí obojí kryogenního zpracování. Naopak pozitivní bilanci má dodatečné tepelné zpracování s finanční úsporou až 50 %, což představuje částku finančních úspor přibližně 1,5 mil. Kč na jeden stroj za rok a boridace s teoretickou finanční úsporou až 280 %.

Na základě uvedených laboratorních výsledků byly chemicko-tepelně upraveny připravené sady zubů, které budou v další etapě řešení projektu spolu s dalšími, z nových materiálů odlitými sadami zubů [3,4] nasazeny na reálný stroj a testovány in situ v provozu.

Poděkování

Príspevek vznikl za finanční podpory projektu TA ČR s názvem „Výzkum optimalizace tvaru a materiálu řezných orgánů zemních a dobývacích strojů“ a značné spolupráce partnerů z COMTES FHT a.s., jejichž výsledků výzkumu bylo v článku použito.

Literatura

- [1] HRADIL, D., KOTOUS, J., VOMÁČKA, P., GREGOR, T.: Vývoj zubů rýpadel se zlepšenými vlastnostmi. COMTES FHT a.s., 2018.
- [2] MONI, V., HRADIL, D., MILETIČ, T.: Vývoj zubů rýpadel se zlepšenými vlastnostmi. Zpravodaj Hnědé uhlí, 2/2019, str. 24-32, ISSN 1213-1660.
- [3] MONI, V.: Vliv teplotního obrazu zubu korečku kola na jeho životnost. VŠB – TU Ostrava, Fakulta strojní 2011, Disertační práce, 120 s, + 67 s. příloh.
- [4] MONI V., TÄUBER J., MILETIČ T.: Výzkum optimalizace materiálu a tvaru řezných orgánů pracovních strojů, Zpravodaj Hnědé uhlí, č. 1, str. 40-43, ISSN 1213-1660.
- [5] MONI, L.: Výzkum optimalizace materiálu a tvaru řezných orgánů kolesových rýpadel. Univerzity J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, Fakulta výrobních technologií a managementu, Bakalářská práce, 78 s.