

Vývoj zubů rýpadel se zlepšenými vlastnostmi

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

¹Výzkumný ústav pro hnědé uhlí a.s., tř. Budovatelů 2830/3, Most; moni@vuhu.cz

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

Přijato: 7. 1. 2019, recenzováno: 15. a 27. 2. 2019

Abstrakt

Obsahem předmětného článku je nalezení optimálního postupu tepelného nebo chemicko-tepelného zpracování zubů rýpadel s nejvyšší možnou odolností proti opotřebení, realizovaného 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.

Development of the teeth of excavators with improved characteristics

The goal of the article is to find the optimal procedure of thermal or thermo-chemical treatment of the teeth of excavators with the highest resistance to wear, implemented within the framework of the project. The project addresses the optimization research of shapes and especially materials used in the manufacture of cutting elements of mining and ground machinery depending on mining conditions, utilising the most advanced knowledge in the field of material engineering and metallurgy, cryogenics and nanotechnology to improve the efficiency of cutting process and the life of this key node of earth moving and mining machinery.

Die Entwicklung der Zähne von Baggern mit verbesserten Eigenschaften

Der Inhalt dieses Artikels ist die Findung einer optimalen Methode der Wärme- oder Chemisch-Wärmebehandlung der Zähne von Baggern mit der höchstmöglichen Abnutzungsbeständigkeit, welche im Rahmen des Projektes umgesetzt wird, das die Forschung der Optimierung der Form und vornehmlich der Materialien löst, die bei der Erzeugung von Schneidorganen der Erd- und Gewinnungsmaschinen genutzt werden, in Zusammenhang mit den modernsten Erkenntnissen aus dem Gebiet Materialengineering und Metallurgie, der Kryogenik und der Nanotechnologien mit dem Ziel, die Effektivität des Trennvorganges und der Lebensdauer dieses Schwerpunktes der Erd- und Abbaugeräte zu erhöhen.

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

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

1 Úvod

Analýzou materiálu a následným provedením prvotních analýz a zkušebních procesů tepelného a chemicko-tepelného zpracování zubů byla pověřena firma COMTES FHT a.s. Zuby 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 výroby. Povrchová kvalita zubů není příliš vyhovující pro další chemicko-tepelné zpracování, zuby jsou značně zokoujené, pravděpodobně po kalení. Předmětné zuby jsou specifikované následující geometrií: úhel hřbetu 18°, úhel břitu 25°

a úhel čela 47°, přičemž tato geometrie zubu je v rámci řešení projektu označena jako geometrie č. 1 [2]. Zuby jsou umístěny na korečku rýpadla v různých pozicích, celkem je na každém korečku 8 zubů. Článek podává stručnou informaci o provedených úvodních analýzách a experimentech, které jsou zaměřeny na vstupní analýzu materiálu – chemické složení, tahové zkoušky, metalografii a také na provedení několika způsobů tepelného a chemicko-tepelného zpracování – zušlechťování, kryogenní zpracování a boridace. Výsledky jednotlivých analýz jsou dokumentovány pomocí metalografie a měření tvrdosti. Odolnost proti opotřebení po provedeném zpracování je následně vyhodnocena na základě zkoušky opotřebení metodou pin-on-disk [1].



Obr. 1: Tahový vzorek.

2 Tahové zkoušky

Mechanické vlastnosti zubů korečku dobývacích strojů byly testovány pomocí tahových zkoušek (obrázek č. 1), přičemž analyzovány byly dvě oblasti zubu: hrotová část zubu a upínací část zubu. Důvodem testování v těchto oblastech bylo nalezení možných rozdílů v mechanických vlastnostech vlivem rychlosti chlazení po kalení. Z každé části byly vyrobeny 2 zkušební tahové vzorky. Oblast odběru vzorků je vyznačena obdélníky na zubu - viz obrázek č. 2.

Tahové zkoušky byly provedeny dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Každá oblast zkoušení byla otestována na dvou tahových vzorcích při pokojové teplotě (cca 23 °C). Průměr testované části byl 10 mm, délka těla vzorku 60 mm, vyhodnocovací délka vzorku 50 mm, celková délka vzorku 100 mm.

Z výsledků uvedených v tabulce 1 je patrné, že v upínací části jsou mechanické vlastnosti nepatrně vyšší, přesto není rozdíl ve výsledcích natolik markantní, aby se nedalo konstatovat, že mechanické vlastnosti jsou v obou oblastech téměř stejné. Mez kluzu naměřená na hrotu je v průměru 1 130 MPa a na upínací části v průměru 1 235 MPa. Mez pevnosti dosahuje hodnot až 1 417 MPa na hrotu a až 1 495 MPa na upínací části.

3 Analýza vstupního materiálu

Na výřezech (obrázek č. 3) odlitých zubů z dobývacích orgánů kolesových rýpadel byly následně provedeny analýzy makro-

Tab. 1: Výsledky tahových zkoušek při pokojové teplotě.

Vzorek	Teplota	$R_{p0,2}$	R_m	A_5	Z
	[°C]	[MPa]	[MPa]	(%)	(%)
Hrot 1	23	1 138	1 417	4	15,8
Hrot 2	23	1 123	1 416	3,9	17,9
Upínání 1	23	1 245	1 495	4,6	10,3
Upínání 2	23	1 228	1 423	4,3	12,6

struktury, mikrostruktury a profilů tvrdosti. Vzorky byly dále rozřezány na několik částí pro potřeby analýz a pro přehlednost jsou označeny Špička_1, Špička_2, Vzorek_2 a Vzorek_3, viz obrázek č. 4. Na vzorcích byla analyzována makrostruktura a naměřeny profily tvrdosti HV 10 od okraje k okraji. Na vrchní části vzorku, tj. Špička_1 a Špička_2, byla navíc analyzována mikrostruktura u okraje a ve středu vzorků.

4 Metalografie

4.1 Makrostruktura

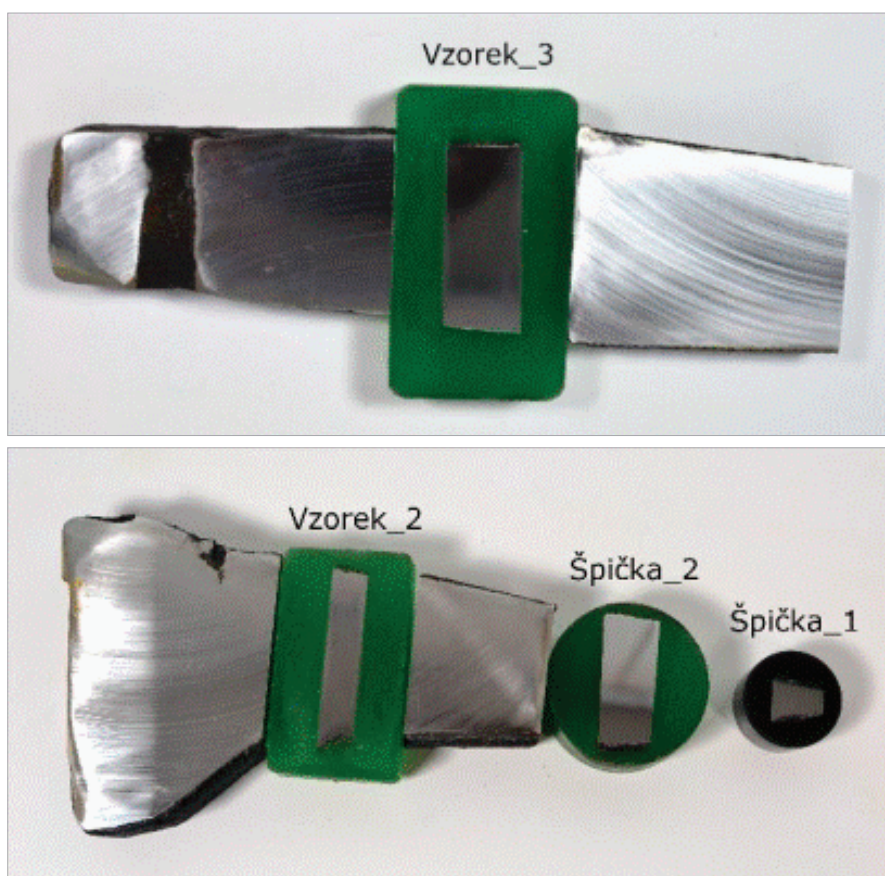
V makrostruktuře je patrné dendritické odmíšení z obrázku č. 5, snímky 2 a 3, tj. materiál nebyl dostatečně austenitizován (špatná kalicí teplota a výdrž na této teplotě) a struktura je stále z části tvořena původními dendrity po odlití. Nejlépe viditelné jsou tyto dendrity na snímku 3.



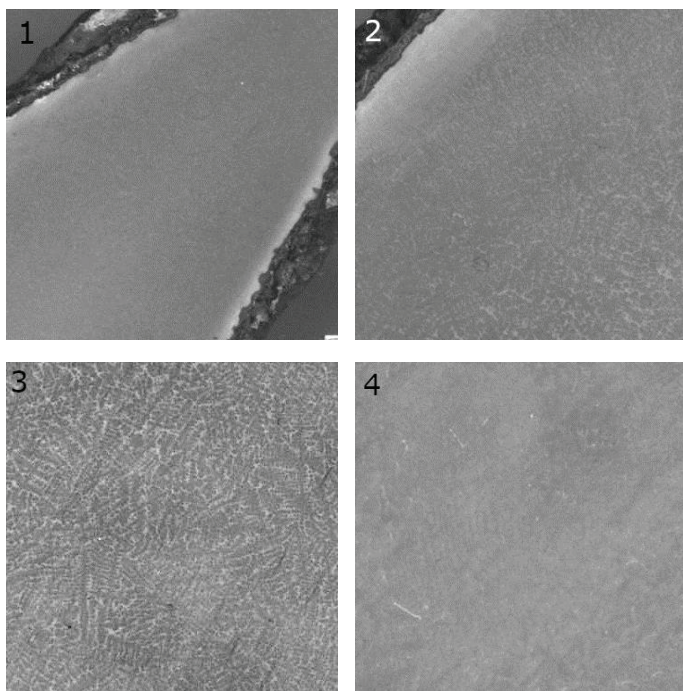
Obr. 2: Místa odběru tahových vzorků.



Obr. 3: Naznačení provedeného řezu (nahore), fotografie výřezu (dole).



Obr. 4: Vyříznuté vzorky na pozorování metalografie, upínací část - vzorek_3, hro-
tová část - vzorek_2, špička_1, špička_2.



Obr. 5: Detaily vybraných ploch - snímky 1 až 4.

4.2 Mikrostruktura

Vzorek prošel standardní metalografickou přípravou, tj. broušením a následným leštěním. Mikrostruktura byla vyvolána lep-

táním v 3% činidle Nital. Mikrostruktura byla analyzována na vzorcích Špička_1 a Špička_2, a to vždy na dvou místech, jednou na okraji vzorku a podruhé v jeho středu. Mikrostruktura byla pozorována pomocí světelného mikroskopu Carl Zeiss – Observer.Z1m jak ve vyleštěném, tak v naleptaném stavu.

Pozorování v nenaleptaném stavu neodhalilo výraznější přítomnost nehomogenit. V naleptaném stavu lze v okrajových částech analyzovaného ocelového zubu pozorovat výrazné stopy oduhličení povrchových vrstev oceli (obrázky č. 6, 7 a obrázky č. 10, 11) projevující se přítomností feritu. Ve středu odpovídá mikrostruktura popuštěnému martenzitu a bainitu (obrázek č. 9 a 13).

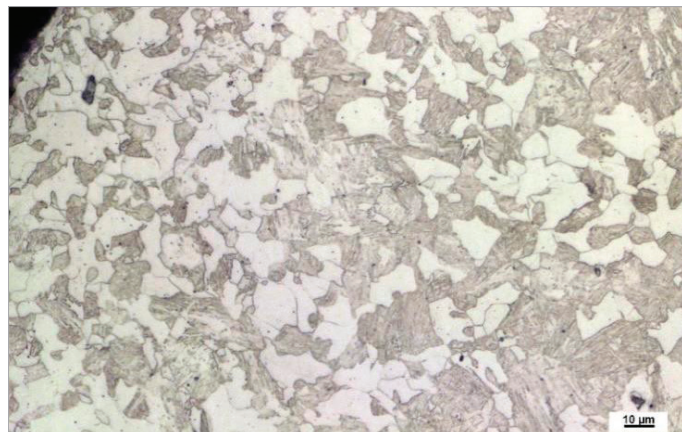
4.3 Profil tvrdosti

Tvrdost byla měřena metodou podle Vickerse při zatížení 10 kg (HV10) se vzdáleností mezi vtisky v linii 1 mm u vzorku Špička_1 a 2 mm u všech dalších vzorků. Průběhy tvrdosti byly měřeny laboratorním tvrdoměrem STRUERS DuraScan.

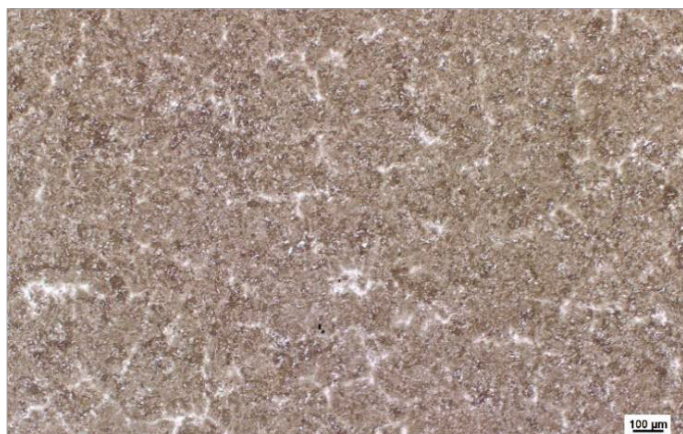
Tvrdost vzorků se pohybuje převážně kolem hodnoty 480 HV10 (odpovídá cca 456 HB a 47,7 HRC). Nižších hodnot tvrdosti dosahují vzorky Vzorek_2 a Vzorek_3 ve svém středu (tvrdost 391 HV10, tj. 372 HB; 39,9 HRC), což je zřejmě dáno nižší prokalitelností materiálu (schopnost dosáhnout požadované tvrdosti v určité hloubce od povrchu). Občasné poklesy tvrdosti na okraji grafu lze vysvětlit přítomností oduhličené vrstvy na povrchu vzorku, viz mikrostruktura výše.



Obr. 6: Špička_1 okraj, mikrostruktura, 50x.



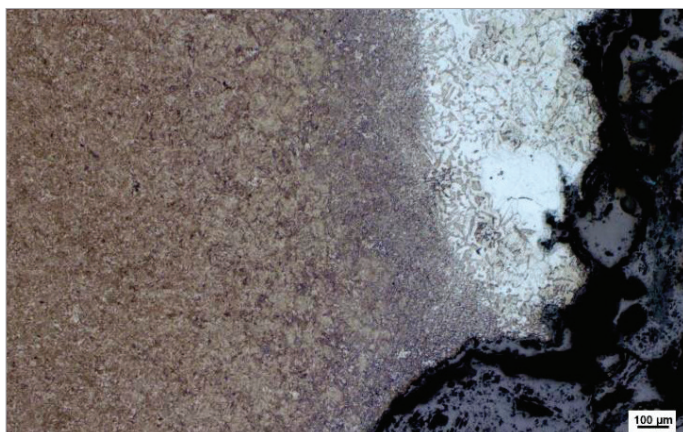
Obr. 7: Špička_1 okraj, mikrostruktura, 500x.



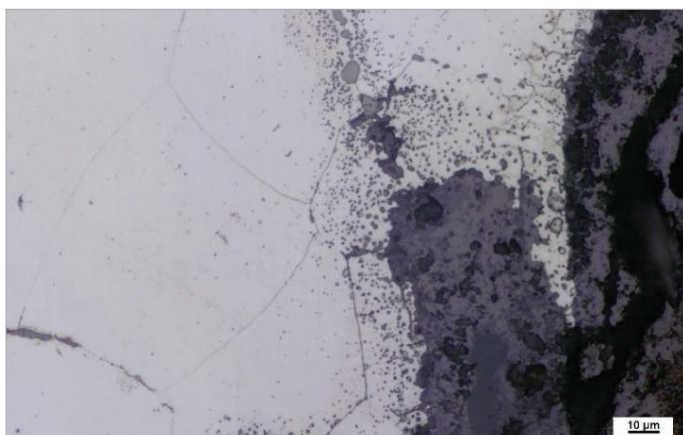
Obr. 8: Špička_1 střed, mikrostruktura, 50x.



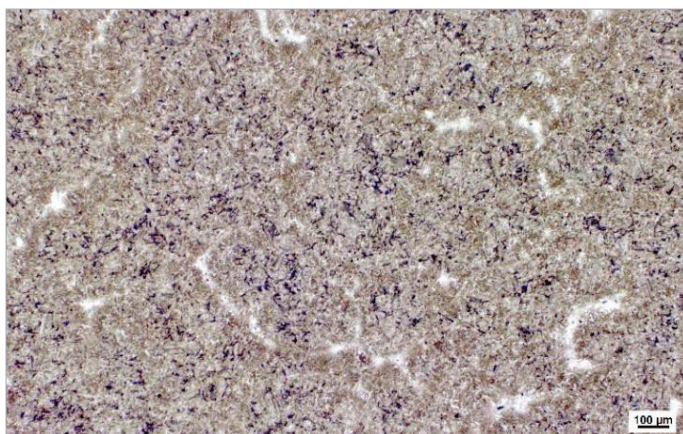
Obr. 9: Špička_1 střed, mikrostruktura, 500x.



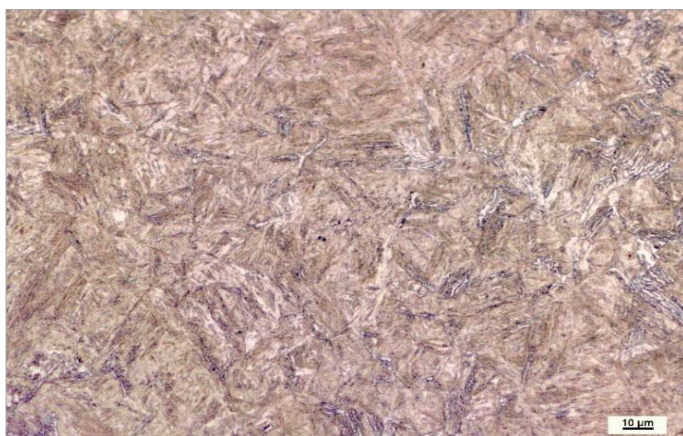
Obr. 10: Špička_2 okraj, mikrostruktura, 50x.



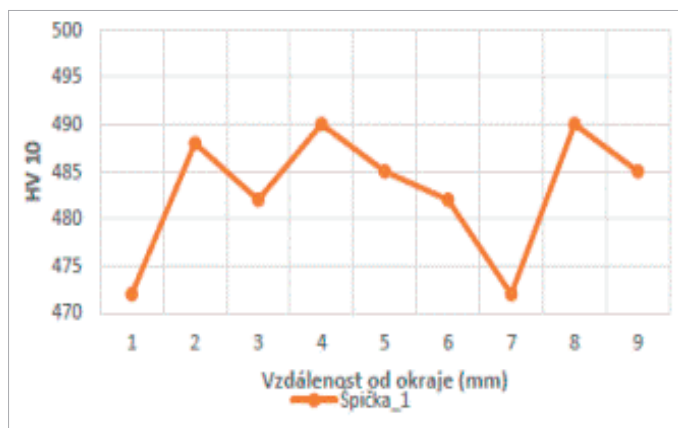
Obr. 11: Špička_2 okraj, mikrostruktura, 500x.



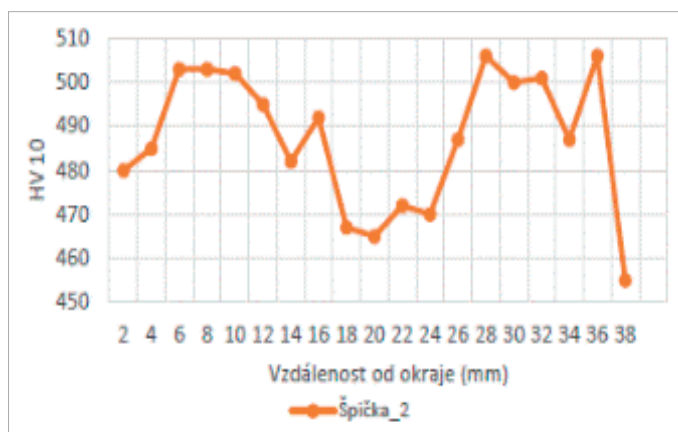
Obr. 12: Špička_2 střed, mikrostruktura, 50x.



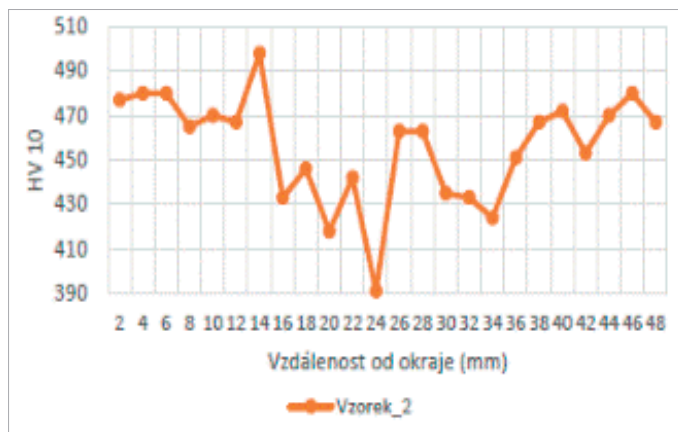
Obr. 13: Špička_2 střed, mikrostruktura, 500x.



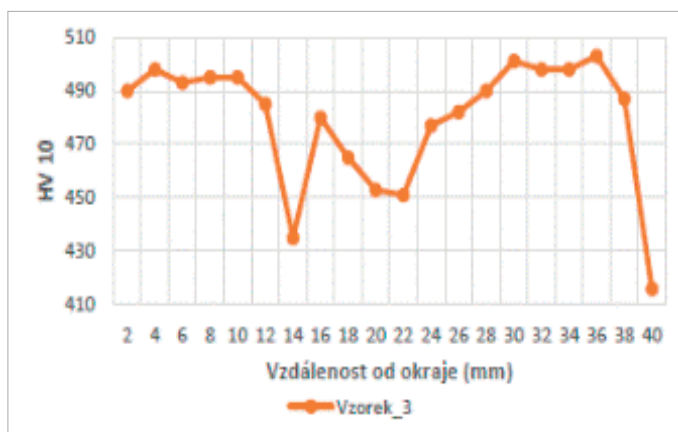
Obr. 14: Špička_1, profil tvrdosti, HV 10.



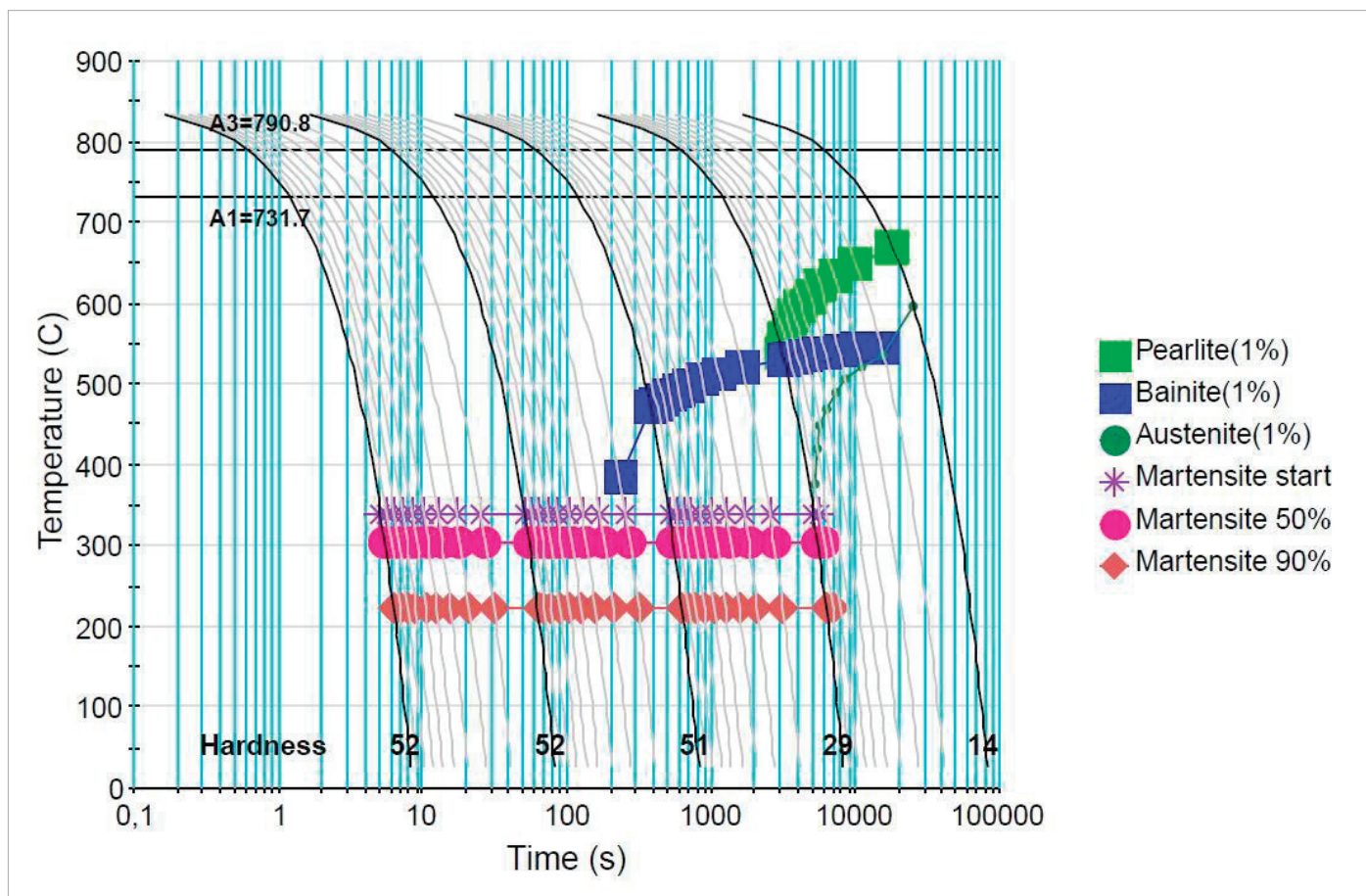
Obr. 15: Špička_2, profil tvrdosti, HV 10.



Obr. 16: Vzorek_2, profil tvrdosti, HV 10.



Obr. 17: Vzorek_3, profil tvrdosti, HV 10.



Obr. 18: ARA diagram oceli VP7, vypočtený programem JMatPro.

4.4 Dílčí závěr analýzy vstupního materiálu

Na dodaném zubu dobývacího orgánu kolesových rýpadel byly dále provedeny analýzy makrostruktury, mikrostruktury a naměřeny profily tvrdosti. Analýza mikrostruktury odhalila na okrajových částech analyzovaného zubu výrazné známky oduhličení povrchových vrstev oceli. Nekonzistence naměřených hodnot tvrdosti a jejich občasné propady jsou dány přítomností měkčích oblastí (špatná prokalitelnost) ve vzorku díky nižší míře protváření, popřípadě jsou způsobeny oduhličením vzorku v okrajových částech.

5 Tepelné zpracování

Na základě naměřených tvrdostí zubů, které dosahovaly průměrných hodnot v intervalu cca 480 – 490 HV10 (odpovídá 47,7 až 48,4 HRC), byly navrženy postupy zušlechťování. Kalicí teplota byla na základě numerického výpočtu pomocí programu JMatPro stanovena na teplotu 850 °C (kalicí teplota musí být alespoň 50 °C nad A3) – viz obrázek č. 18. Celkově byly provedeny 4 postupy zpracování tohoto materiálu. První postup byl klasické zušlechťování na stejnou tvrdost jako v případě dodaného zubu, druhý postup spočíval v aplikaci kryogenního zpracování s výdrží 2 hodin, třetí postup byl s kryogenním zpracováním po dobu 8 hodin, poslední postup spočíval v boridaci materiálu. Výsledky byly vyhodnocovány na základě měření tvrdosti, metalografické analýzy a zkoušek opotřebení metodou pin-on-disk. Porovnání proběhlo současně i s dodaným materiálem, který byl zušlechťován u výrobce odlitku – stav označen

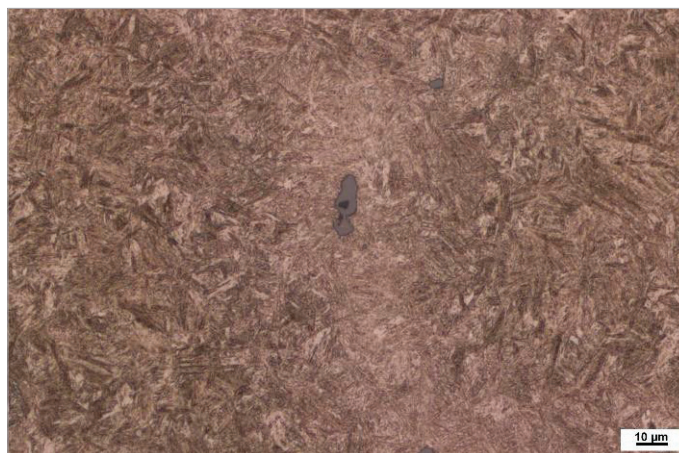
jako 1. Kusy, které byly zpracovávány, byly vyřezány z upínací části; tloušťka testovaných vzorků byla 10 mm.

5.1 Zušlechťování materiálu – režim s označením 2

Kus vyrobený z části zubu byl zakalen z teploty 850 °C. Na této teplotě kus setrval 30 minut; kalení proběhlo do oleje. Následovalo popouštění při teplotě 250 °C s výdrží 2 hodiny, ochlazení proběhlo na vzduchu viz obrázek č. 19. Výsledná tvrdost po popouštění dosáhla hodnoty 500 HV10. Materiál byl tvořen martenzitickou maticí s velmi malým počtem karbidů. V matici byly pozorovány vměstky.



Obr. 19: Metalografický snímek po zušlech-



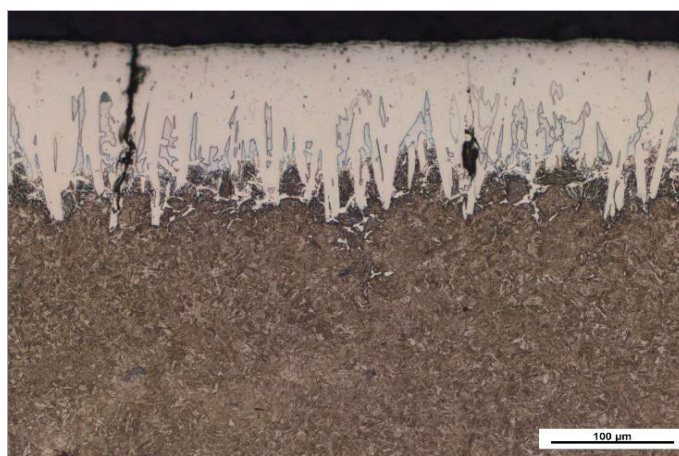
Obr. 20: Metalografický snímek po kryogenním zpracování, režim 3 (vlevo) a režim 4

5.2 Zušlechtnění materiálu s kryogenním zpracováním – režim 3 a 4

Kryogenní zpracování je proces, při kterém je materiál zmrazován na teploty blízké až teplotě kapalného dusíku, tj. $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tento proces následuje zpravidla po procesu kalení. Výdrže na kryogenní teplotě jsou v řádu jednotek hodin až dnů. Hlavní výhodou tohoto procesu je eliminace zbytkového austenitu, zjemnění martenzitu, precipitace velmi jemných karbidů zajišťujících vyšší odolnost proti opotřebení. Použité kryogenní zpracování v tomto experimentu bylo použito při teplotě $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ s výdrží 2 hodiny (režim 3) a s výdrží 8 hodin (režim 4). Postup kalení a popouštění byl totožný jako v případě režimu 2. Mikrostruktura je opět tvořena martenzitickou maticí s velmi jemnými karbidy a přítomnými vměstky (šedý útvar na snímcích). Rozdíly v mikrostruktuře nejsou patrné. Tvrdost povrchu po kryogenním zpracování byla naměřena na hodnotě 518 HV₁₀ (režim 3) a 506 HV₁₀ (režim 4).

5.3 Boridace – režim 5

Boridace je proces založený na difuzi atomů boru do krystalové mřížky základního kovu. Tento proces lze zařadit mezi postupy chemicko-tepelného zpracování. Vznikají vrstvy v řádu desetin mm. Výsledkem boridace je homogenní tvrdá vrstva v celé hloubce difuzního profilu (tloušťka vrstvy). Dosažená tvrdost je mnohonásobně vyšší než u jiných procesů povrchového vytvrzování, další výhodou je velmi nízký koeficient tření zlepšující odolnost proti opotřebení a abrazi; boridovaná vrstva si zachovává svoji tvrdost i při vyšších teplotách, což je samozřejmě výhodou. Boridace proběhla ve speciálním boridovacím prášku před procesem kalení. Boridovací teplota je $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, výdrž na této teplotě byla 13 hodin. Poté boridovaný vzorek chladnul na vzduchu. Následovalo zušlechtnění viz režim zpracování č. 2. Po boridaci dosahovala povrchová vrstva tvrdosti až 1 750 HV_{0,1}, což je zhruba 3x více než po předchozích režimech zpracování. Metalografickou analýzou byla zjištěna hloubka boridované vrstvy, která byla cca 100-150 μm. Na po-



Obr. 21: Metalografický snímek po boridaci – různá zvětšení.

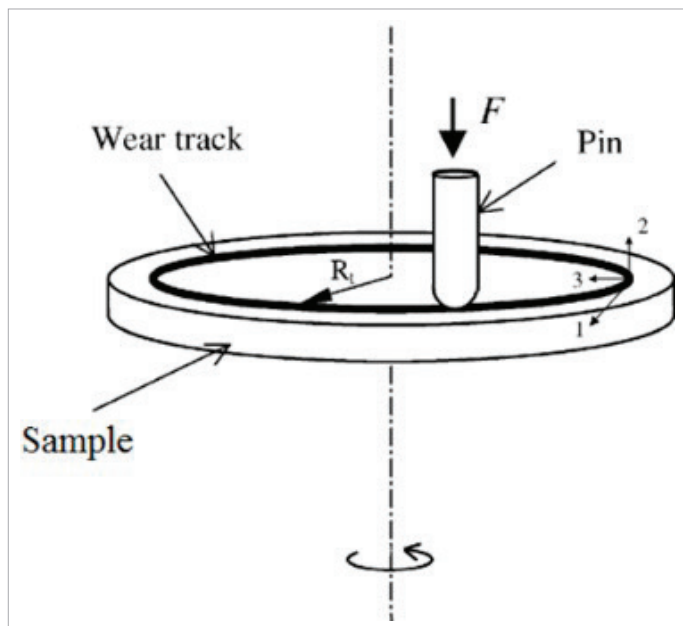
vrchové vrstvě zkušební vzorku zubu byly přítomné trhliny, vzniklé pravděpodobně během procesu kalení do oleje. Difuzní vrstva boridů vytváří ostré špičky jdoucí do matrice materiálu, tzv. „zuby“. V difuzní (bílé) vrstvě jsou vytvořeny různé složeniny železa a boru, nejčastěji FeB a Fe₂B. Vytvoření takto celistvé vrstvy vyžaduje značnou kvalitu povrchu, tj. není možné boridovat zokoujený povrch, ani povrch s vysokou drsností.

6 Odolnost proti opotřebení

Odolnost proti opotřebení byla testována metodou Pin-on-disc. Jedná se o velmi jednoduchou laboratorní zkoušku, při které je indentor (kulička) vtlačována do zkoušeného povrchu předem definovanou silou. Zkoušený vzorek koná rotační pohyb nadefinovanou rychlostí otáčení. Zkoušky lze provádět jak za pokojové, tak za zvýšené teploty. Princip zkoušky je zobrazen na obrázku č. 22. Vzniklá stopa je měřena pomocí profilometru v příčném směru, celkový objem opotřebení je spočten na základě poloměru stopy zkoušení. Zkoušky odolnosti proti opotřebení proběhly na všech režimech zpracování za pokojové teploty. Tato teplota je nejbližší skutečné provozní teplotě rýpadlových zubů. Jako indentor posloužila kulička s $\varnothing$ 6 mm (Al₂O₃), poloměr vytvořené stopy byl 3 mm. Použité zatížení pro zkoušku bylo zvoleno na 12 N. Celková trasa kuličky 276,75 m odpovídala 15 000 cyklů s rychlostí otáčení 130 otáček za minutu. Každý režim zpracování byl testován na 2 vzorcích (vždy označeno jako „a“ a „b“) k vytvoření určitého statistického souboru naměřených dat. Výslednou hodnotou, kterou porovnáujeme, je míra opotřebení W – viz rovnice níže.

Z naměřených výsledků je patrné, že nejvyšší odolnost vykazuje boridovaný povrch, kdy vytvořená stopa byla několikanásobně menší než pro ostatní režimy zpracování. Výsledná odolnost boridované vrstvy je dána především vysokou tvrdostí povrchu, sníženým třením povrchu a zejména typem namáhání.

$$W = \frac{\text{Objem stopy opotřebení } [\mu\text{m}^3]}{\text{Zatížení [N]} \cdot \text{Celková trasa kuličky [m]}}$$



Obr. 22: Princip zkoušky pin-on-disc (wear track – stopa opotřebení, Sample – vzorek, Pin – indentor).

V reálných podmínkách při osazení rýpadlového korečku může být odolnost výrazně odlišná. Nejhorší výsledek vykazoval dodaný stav materiálu, výsledek je způsobem pravděpodobně horší kvalitou zušlechťení v jádru součásti. Kryogenní zpracování s výdrží 2 hodiny a 8 hodin vychází velmi podobně. Odolnost vzrostla oproti původně zušlechťenému stavu zhruba 4x. Nepatrně lepší výsledky jsou pozorovány dle očekávání u kryogenního zpracování s výdrží 8 hodin.

7 Závěr

V rámci výzkumného 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 a následné tepelné a chemicko-tepelné zpracování zubů, které byly podrobeny tribologické zkoušce metodou Pin on-disk [1].

Chemické složení u měřených vzorků ukázalo v jednom případě nižší obsah vanadu a v druhém případě nižší obsah vanadu a chromu oproti předepsaným hodnotám. Tato skutečnost má vliv na maximální dosažitelné mechanické vlastnosti materiálu.

Zkouška tahem byla provedena na hrotu a upínací části. Mez kluzu naměřená na hrotu vykazovala v průměru 1 130 MPa a na upínací části v průměru 1 235 MPa. Mez pevnosti dosahuje hodnot až 1 417 MPa na hrotu a až 1 495 MPa na upínací části.

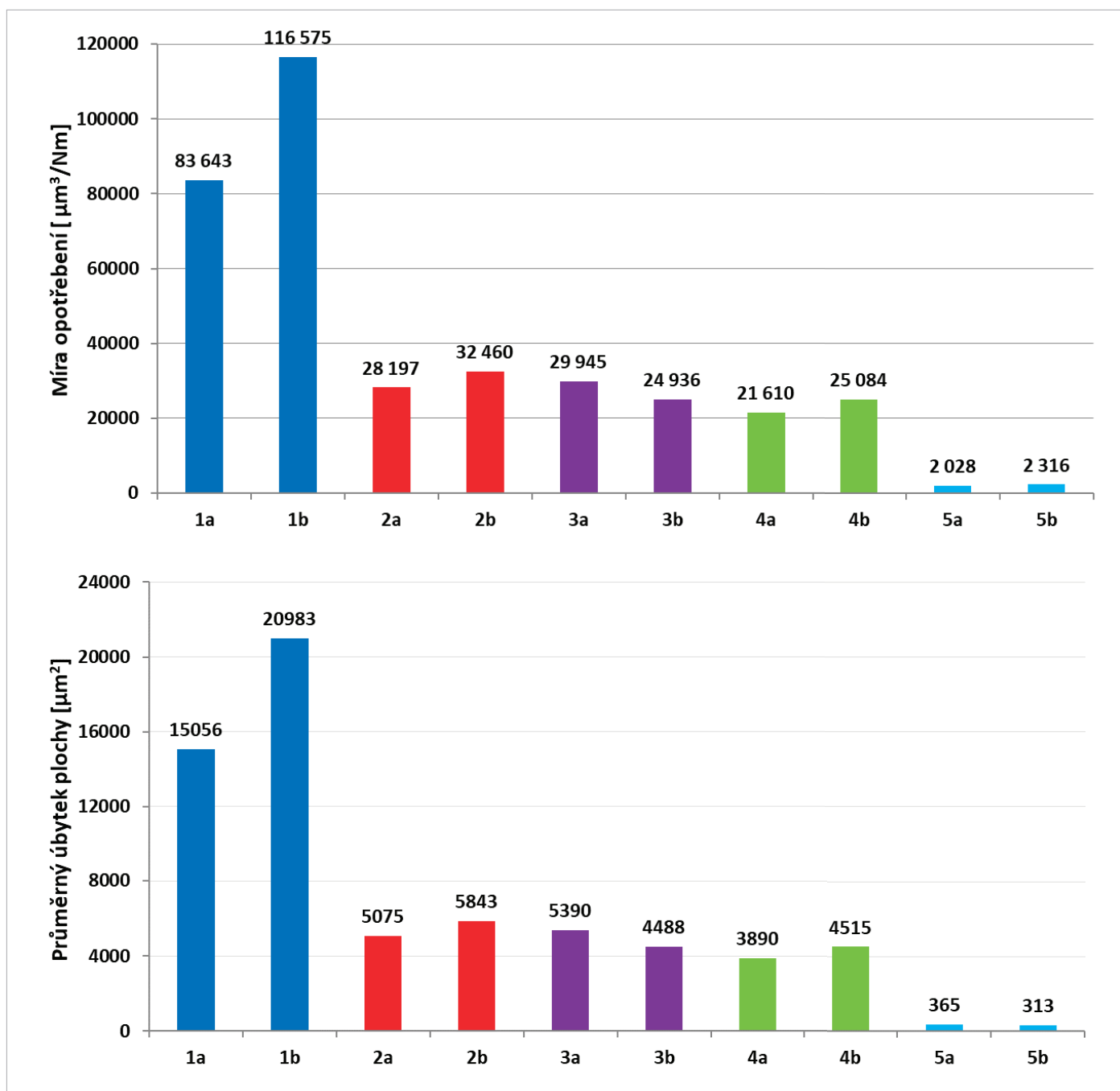
Analýza mikrostruktury odhalila na okrajových částech analyzovaného zubu výrazné známky oduhličení povrchových vrstev oceli. Mikrostruktura zubu odpovídá popuštěnému martenzitu a bainitu.

K zušlechťení zubů bylo vybráno klasické tepelné zpracování, kryogenní tepelné zpracování a boridování. Nejvyšší odolnost proti opotřebení metodou Pin-on-disk v porovnání k původnímu stavu vykazoval boridovaný zub, a to více než 40x. Nejhorší výsledek vykazoval původní stav materiálu, výsledek je způsobem pravděpodobně horší kvalitou zušlechťení v jádru součásti. Kryogenní zpracování s výdrží 2 hodiny a 8 hodin vychází velmi podobně. 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 jinému charakteru opotřebení.

Výše uvedené laboratorní výsledky poslouží k následné tepelné a chemicko-tepelné úpravě připravených sad zubů, které budou v další etapě řešení projektu spolu s dalšími nově odlitými (pro účely testování nových materiálů) 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.



Obr. 23: Výsledky odolnosti proti opotřebení na testovaných režimech zpracování, míra opotřebení (horní graf), průměrný úbytek plochy (dolní graf).

Literatura

- [1] HRADIL, D., KOTOUS, J., VOMÁČKA, P., GREGOR, T.: Vývoj zubů rypadel se zlepšenými vlastnostmi. COMTES FHT a.s., 2018.
- [2] MONI, V.: Vliv teplotního obrazu zubu korečku kola na jeho životnost. VŠB – TU Ostrava, Fakulta strojní 2011, Disertační práce, 120 s, + 67 s. příloh
- [3] MONI, V., TÄUBER, J., MILETIČ, T.: Výzkum optimalizace materiálu a tvaru řezných orgánů pracovních strojů. Zpravodaj hnědé uhlí, no. 1, str. 40-43, ISSN 1213-1660.
- [4] MONI, V., ŘEHOŘ, M., MILETIČ, T., TÄUBER, J.: Research of the new materials and these materials adjustment for cutting bodies of excavators. Scientific Geoconference SGEM 2018, Albena, 6-7/2018, s. 647 – 654, ISSN 1314-2704.