

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**ZVYŠOVÁNÍ ŽIVOTNOSTI EXTRÉMNĚ NAMÁHANÝCH DÍLŮ NA DŮLNÍCH
MECHANISMECH**

**INCREASING THE SERVICE LIFE OF THE EXTREMELY STRESSED PARTS ON
MINING MECHANISMS**

Autor: Vojtěch Balcárek
Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství
Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Libor Beneš

PRAHA 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Balcárek** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **420525**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Zvyšování životnosti extrémně namáhaných dílů na důlních mechanismech

Název bakalářské práce anglicky:

Increasing the service life of the extremely stressed parts on mining mechanisms

Pokyny pro vypracování:

- 1) Úvod do řešené problematiky, literární rešerše.
- 2) Základní charakteristika a mechanismy opotřebení (technické aplikace a vhodné materiály).
- 3) Materiálová řešení pro vybrané extrémně namáhané díly důlních mechanismů.
- 4) Experimentální část - materiálové analýzy a jejich porovnání.
- 5) Závěrečné vyhodnocení získaných výsledků.

Seznam doporučené literatury:

- [1] JANOVEC, J., CEJP, J., STEIDL, J. Perspektivní materiály. Učební texty, ČVUT v Praze, 2008, 143 s.
- [2] JANOUŠEK, M. Zařízení pro testování abrazivního opotřebení. [online]. [cit. 2017-2-24]. < <http://stc.fs.cvut.cz/pdf15/5519.pdf> >
- [3] LANCASTER, J.F. Metallurgy of welding. 6th ed. Abington, Cambridge: Abington Pub, 1999, 356 s.
- [4] SUCHÁNEK, J., KUKLÍK, V., ZDRAVECKÁ, E. Abrazivní opotřebení materiálů. ČVUT v Praze, 2007, 162 s.
- [5] KAŠPAROVÁ, M., ZAHÁLKA, F., HOUDKOVÁ, Š. Hodnocení abrazivní a adhezivní odolnosti materiálů. Sborník konference Metal 2009. Tanger. 2009, s. 1-7.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

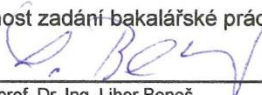
prof. Dr. Ing. Libor Beneš, ústav materiálového inženýrství FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

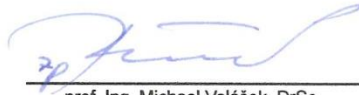
Datum zadání bakalářské práce: **03.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **30.07.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


prof. Dr. Ing. Libor Beneš
podpis vedoucí(ho) práce

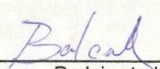

prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

15.4.2018
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

..... Podpis

Poděkování

V první řadě bych rád poděkoval vedoucímu práce, panu prof. Dr. Ing. Liboru Benešovi za odborné vedení, poznatky, čas a trpělivost. Dále bych rád poděkoval prof. Ing. Štefanu Michnovi, PhD., (FSI UJEP) za možnost spolupodílet se na zajímavém výzkumu a za poskytnutí potřebných dokumentů. Na závěr děkuji všem ostatním, kteří se na vypracování práce spolupodíleli.

Anotace

Bakalářská práce se věnuje problematice opotřebení těžební techniky, konkrétně opotřebení zubů korečku velkorypadla KU 800. Práce vznikla ve spolupráci s prof. Štefanem Michnou na základě výzkumu pro firmu Vršanská uhelná a.s.

V první etapě byly zkoumány stávající zuby, které dodala Vršanská uhelná a.s. Zkoumala se rychlost, s jakou se zuby opotřebovávají, jejich ulamování a byla provedena i materiálová analýza. Výsledky ukázaly jisté neshody skutečného chemického složení, oproti deklarovanému. Zkoušky vrubové houževnatosti stávajícího materiálu zubu ukázaly, že materiál není vhodný pro těžbu skrývky z důvodu nízké houževnatosti a neschopnosti odolávat dynamickým rázům při těžbě.

Etapa druhá byla zaměřena na návrh nového, vhodnějšího materiálu pro zhotovení zubů korečku. Jako nový materiál byla zvolena manganová ocel s chemickým složením podobným Hadfieldovy oceli. Tato ocel byla vybrána pro její schopnost přeměny austenitu na martenzit při mechanickém namáhání. Výsledný výrobek zhotovený z navrženého materiálu se však ukázal jako nevyhovující kvůli výrobní vadě.

Klíčová slova

Opotřebení, deformace, Hadfieldova ocel, vrubová houževnatost, koreček

Annotation

The bachelor thesis deals with the issue of mining technology wear, specifically the teeth wear of KU 800 wheel bucket. The work was created in cooperation with prof. Štefan Michna on the basis of research for Vršanská uhelná a.s.

In the first phase the teeth delivered by Vršanská uhelná Inc. were examined. The speed at which the teeth are wearing, their breaking off and even material analysis were examined. The results showed some differences in actual chemical composition against the declared one. The examination of the notched toughness of the teeth proved that the material is not suitable for blasting extraction due to low toughness and inability to withstand the dynamic impact of mining.

The second phase was focused on suggestion of new and more suitable material for bucket teeth. For the new material the manganese steel with a chemical composition, which is similar to Hadfield's steel was chosen. This steel was chosen for its ability to transform austenite into martensitic during the mechanic strain. However, the resulting product made of the proposed material proved as unsatisfactory because of the manufacturing defect.

Keywords

Wear, deformation, Hadfield steel, notch toughness, bucket

Obsah

1. Úvod.....	9
1.1. Obecná problematika	9
2. Modelová lokalita (Lom Vršany)	10
3. Rypadlo (KU 800)	10
4. Problematika.....	11
4.1. Prostředí (uhelný důl)	11
5. Cíl práce	12
6. Opotřebení.....	13
6.1. Abrazivní opotřebení	13
6.2. Adhezivní opotřebení.....	15
6.3. Erozivní opotřebení.....	16
6.4. Kavitační opotřebení.....	17
6.5. Únavové opotřebení	17
6.6. Vibrační opotřebení	19
7. Deformace	20
8. Koroze	20
9. Návrhy řešení.....	22
9.1. Žárové nástřiky.....	22
9.2. HVOF	23
9.3. Navařování plechů	24
9.4. Otěruvzdorné plechy	24
9.5. Hadfieldova ocel	25
10. Problematika v praxi	26

10.1.	Poskytnutá dokumentace a vzorky	28
11.	Analýza současného materiálu zubů	28
11.1.	Zkouška houževnatosti	29
11.2.	Makrostrukturální a mikrostrukturální šetření materiálu	31
11.3.	Závěr analýzy stávajícího materiálu.....	38
12.	Nové materiálové řešení.....	39
12.1.	Problematika nového zubu	40
12.2.	Příprava vzorků nového zubu	42
12.3.	Mikrostrukturální šetření materiálu po mechanickém namáhání	43
12.4.	Závěr k materiálovému řešení nového zubu	48
13.	Závěr	49
14.	Seznamy.....	50
14.1.	Seznam použité literatury.....	50
14.2.	Seznam obrázků.....	53
14.1.	Seznam tabulek.....	54
14.2.	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	55

1. Úvod

Žijeme v době, kdy si život bez některých věcí nedokážeme ani představit. Většina těchto věcí je závislá na elektrické energii, a tudíž je výroba elektřiny klíčová. 40 % elektrické energie ve světě je vyráběno v uhelných elektrárnách a hned po ropě je uhlí druhou nejvyužívanější energetickou surovinou. V České republice se spalováním uhlí vyrábí zhruba polovina elektrické energie. Uhlí se nevyužívá jen jako palivo v elektrárnách nebo teplárnách, ale také v chemickém průmyslu. I když je snaha nahradit fosilní paliva obnovitelnými zdroji, případně energií z jádra, z důvodu ekologie, těžba jako taková je stále potřebná. Ve velkém se těží kámen, soli a další potřebné suroviny, včetně vzácných kovů a nerostů. Těžba je z technického hlediska velice obtížná disciplína. Těžit potřebné suroviny dnes nejde bez výkonných těžebních strojů, na které jsou kladeny stále vyšší nároky. Vedle spolehlivosti a výkonnosti se výrobci těchto strojů zaměřují na zvyšování extrémně namáhaných částí. Díky výzkumu a vývoji nových materiálů a technologií se jim to daří.

1.1. Obecná problematika

Většina strojních zřízení je náchylná na opotřebení jednotlivých součástí a funkčních ploch. Stroje a jejich části musí být navrženy tak, aby odolávaly vlivům, kterým budou vystaveny v pracovním prostředí. Obzvláště pokud budou nasazeny v extrémním prostředí jako jsou lomy a doly, kde musí odolat nečistotám, výkyvům teplot a vlivům počasí.

Pokud se jedná o rypadlo v uhelném dole, konkrétně o korečky rypadla, je zřejmé, že musí být navrženy tak, aby odolaly velkým rázům a otěru.

2. Modelová lokalita (Lom Vršany)

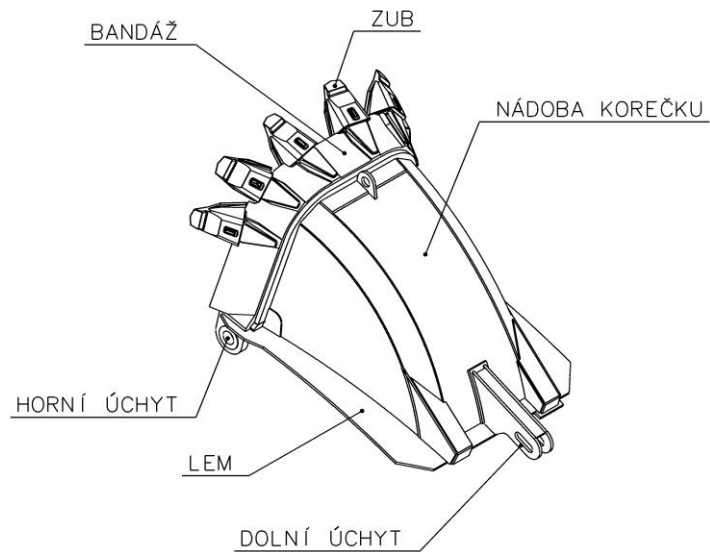
Lom Vršany je hnědouhelný povrchový lom, který se nachází západně od města Mostu v jihovýchodní části mostecko-chomutovské pánve. Jedná se o nejmladší hnědouhelný lom Severočeské hnědouhelné pánve. Rozloha lomu je 30 km². Dle stávajících územních limitů se s těžbou počítá až do roku 2055. Uhlí z lomu se využívá především jako palivo do uhelných elektráren, a to z důvodu jeho nižší výhřevnosti a vyšší popelavosti. Současně s těžbou probíhá proces rekultivace. [1]

3. Rypadlo (KU 800)

Jedná se o kolesové rypadlo určené k povrchové těžbě hnědého uhlí. Konkrétně rypadlo KU 800 těží svrchní a střední část nadložního souvrství. Stroj je vybaven kráčivým hydraulickým podvozkem, a tudíž se dokáže sám pohybovat. Stroj vyrobila firma UNEX a je vybaveno kolesem o průměru 13 m. Koleso je osazené patnácti korečky, přičemž každý koreček má objem 1 m³. Teoretická výkonnost stroje je 5 800 m³·h⁻¹, v praxi se stroj vytěžuje zhruba na polovinu. Důkazem, že jde o velkorypadlo je samotná váha stroje, která činí 4 500 tun. [2]

4. Problematika

Korečky všech druhů a velikostí umístěné po obvodu kola jsou vhodně pevnostně vyztužené. Na zvláště namáhaných místech jsou vyztužené materiály, které odolávají opotřebení. Korečky musí disponovat velkou pevností, tak aby odolaly rázům při těžbě a nedocházelo k trvalé



Obrázek 1: koreček rypadla KU 800

deformaci. Při těžbě, ke které je koreček určen, dochází k velkým dynamickým rázům a k abrazivnímu opotřebení. Náklady spojené s údržbou korečků a výměnou opotřebovaných součástí jsou poměrně vysoké. K ceně samotných dílů je třeba připočítat práci kvalifikovaných techniků a ušlý zisk při odstávce stroje. Současné nároky na výkonnost, zvyšování pracovní rychlosti strojů, snižování spotřeby a zvyšování životnosti se váže na problém odolnosti proti opotřebení součástí, na kterých závisí kvalita vykonaného technologického procesu. V případě korečku rypadla KU 800 je to těžba skrývky. [3]

4.1. Prostředí (uhelný důl)

Rypadlo KU 800 pracuje v hnědouhelném lomu Vršany. V této lokalitě převládá jílovitá půda a spraše.

Toto složení tvoří cca 90 m silnou vrstvu nadloží, kterou je třeba odtěžit, aby se odkryla uhelná sloj o mocnosti 25–30 m.

Spraš je usazená hornina skládající se ze 40–50 % z jemných prachových částic. Dále spraše obsahují jíl a jemný písek. Díky tomuto složení dobře zadržují srážkovou vodu.

Velikost jednotlivých částic bývá v rozmezí 0,03–0,06 mm, proto spraše při těžbě působí hlavně abrazivním účinkem a tvoří vysoce korozivní prostředí.

Dále jsou v lomu zastoupeny proplástky. Proplástek je tenká vložka jalové horniny uvnitř vrstevnatého ložiska. Příkladem může být právě jílovec v uhelné sloji.

Jíly a jílovce, které se v lomu vyskytují, mají ještě jemnější strukturu než spraše. Nicméně charakter opotřebení je velice podobný. Jedná se o jemnozrnné, sedimentární horniny, obsahující převážně jílové minerály. Velikost zrn je maximálně 0,004 mm. [5], [6]

5. Cíl práce

Cílem bakalářské práce je návrh nového materiálového řešení na výrobu zubů korečku pro velkorypadlo KU 800 provozovaného firmou Vršanská uhelná a.s.

Pro splnění cíle jsou důležité následující kroky:

- Obeznamení se s problematikou opotřebení.
- Příprava vzorků ze stávajícího zubu, které dodal provozovatel rypadla.
- Analýza a zhodnocení stávajícího materiálu zubu. Analýza spočívá v provedení chemického rozboru, zkoušky houževnatosti, makrostrukturálního a mikrostrukturálního šetření. Závěrečné zhodnocení provedeme na základě výsledků analýzy.
- Návrh nového materiálu na základě informací o vlivech působící na zub korečku při provozu, případně návrh tepelného zpracování zubu.
- Příprava vzorků z nově navrženého materiálu.
- Analýza a zhodnocení nově navrženého materiálu. Analýza spočívá v provedení chemického rozboru nového materiálu, mikrostrukturálního šetření po simulaci působení provozních vlivů. Závěrečné zhodnocení provedeme na základě výsledků analýzy.

6. Opotřebení

Opotřebení je nežádoucí proces, při kterém se mění struktura povrchu nebo dokonce rozměry součásti. K opotřebení dochází při vzájemném tření dvou povrchů nebo funkčního tělesa a jiného média. V důsledku této interakce se z funkčních ploch mechanicky odstraňují částice a dochází k degradaci povrchů. Tyto degradace často bývají podpořeny chemickými vlivy. Opotřebení má neblahý vliv na funkčnost součásti, potažmo stroje jako celku.

Existuje šest základních druhů opotřebení: abrazivní, adhezivní, erozivní, kavitační, únavové a vibrační.

V reálném prostředí, kde dochází k opotřebení, se kombinuje více druhů dohromady. Samostatně se vyskytují snad jen v laboratorních podmínkách. [7], [8], [9]

Při konstrukčním návrhu a výběru vhodného základního materiálu, ze kterého je součást zhotovena, je klíčové určit, co bude vyrobeno, k čemu bude daná součást sloužit a v jakém prostředí bude provozována. Dále je potřeba počítat s mechanismem degradace součásti. Mechanismus degradace je souhrn vlivů a degradačních procesů, které negativně působí na součást během jejího provozu a zároveň tak mění její vlastnosti. Při návrhu musíme zohledňovat i technologickou, ekonomickou a ekologickou stránku věci. [10]

6.1. Abrazivní opotřebení

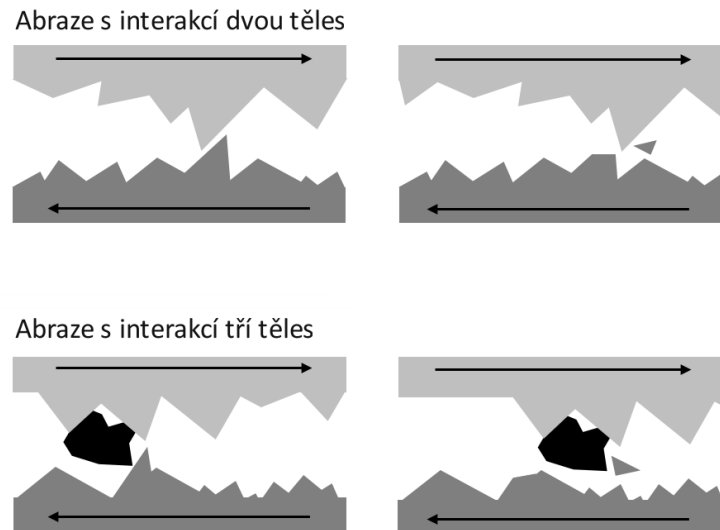
Jedná se o poměrně intenzivní degradační proces, ke kterému dochází při vzájemném působení tvrdých těles. Jde převážně o minerální částice. K abrazivnímu opotřebení dochází při vzájemném silovém působení několika těles. Podle počtu těles, které spolu interagují lze rozdělit abrazi na:

- Abraze s interakcí dvou těles:

Dva povrchy se po sobě smýkají. Povrch z tvrdšího materiálu proniká do povrchu z materiálu měkčího a jeho částice unáší pryč. Příkladem je například úprava tvaru obráběného materiálu pomocí pilníku.

- Abraze s interakcí tří těles:

Když se mezi dvěma funkčními povrchy vyskytnou částice, které oddělují materiál z jednoho nebo obou funkčních povrchů. Příkladem může být brusný papír, ze kterého se při broušení oddělí jednotlivá zrna.



Obrázek 2: abrazivní opotřebení

Částice způsobující abrazi se nejčastěji označují za nečistoty. Za nečistoty lze považovat přímo úlomky z povrchu součásti, které vznikly právě při interakci dvou těles. A stejně tak jsou nečistoty částice, které se dostaly mezi dva funkční povrchy z okolí. Tudiž jsou nečistoty třetím tělesem a dochází k interakci tří těles.

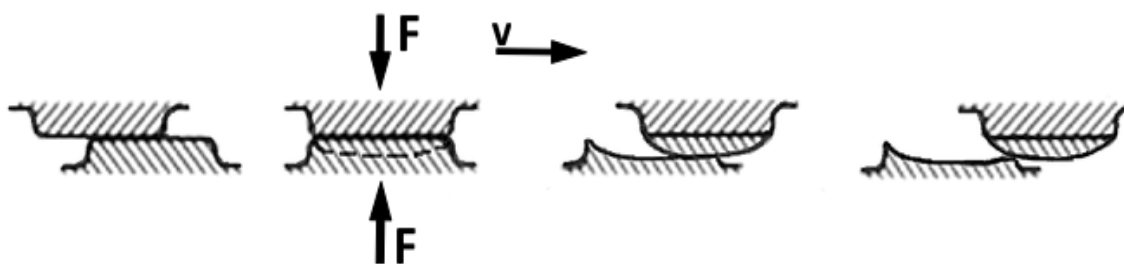
Udává se, že 50 % případů opotřebení je způsobeno právě abrazivním opotřebením. Schopnost odolávat abrazi je dána například drsností povrchu. Obecně platí, že menší drsnost povrchu omezuje abrazi při interakci dvou těles. Tudiž, čím hladší povrchy spolu budou interagovat, tím bude docházet k menšímu opotřebení.

Tvrdomost použitých materiálů je také důležitá. Například se nedoporučuje používat materiály se stejnou tvrdostí. Měkčí materiál je schopen zachytit nečistoty a tím zamezit abrazi s interakcí tří těles. [8], [10], [12]

6.2. Adhezivní opotřebení

Adhezivní opotřebení vzniká při vzájemném tření dvou funkčních ploch, na které působí velké síly. Pro adhezivní opotřebení je charakteristický součinitel tření. Při tření dvou funkčních ploch dochází k vylamování a následnému přenosu částic z ploch pryč. K vylamování jednotlivých částic dochází, protože mezi funkčními plochami existují meziatomové síly, které se snaží vytvářet pevnou vazbu a pevně spojit obě styčné plochy. Tímto způsobem neustále vznikají a následně zanikají spojení, takzvané mikrospoje, což má za následek rýhování a snižování kvality povrchu.

V krajních případech, takto vzniklé adhezivní spoje, mohou vést až k zadření nebo dokonce ke svaření dílů zastudena. Platí, že materiály, které přicházejí do vzájemného kontaktu by se neměly rozpouštět jeden ve druhém, neměly by v daném prostředí a za daných podmínek vytvářet slitinu.



Obrázek 3: adhezivní opotřebení

Na vznik adhezivního opotřebení mají vliv tyto faktory:

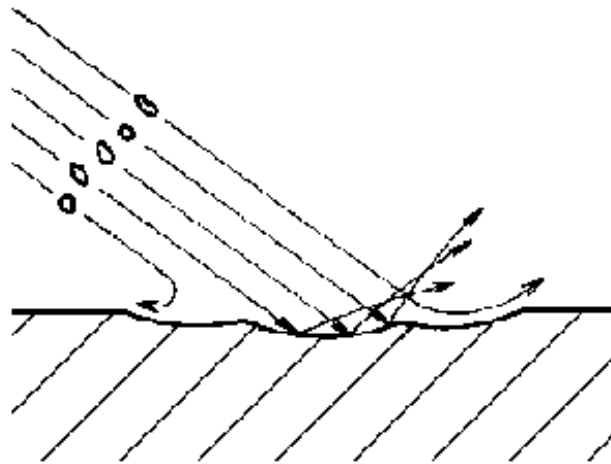
- Hloubka vnikání a poloměr zakřivení nerovností na funkčních površích.
- Rychlost vzájemného pohybu ploch a jejich zatížení.
- Schopnost materiálu vytvářet adhezivní spoje.

V závislosti na těchto faktorech dochází k různým stupňům opotřebení.

Pro zmírnění účinků adhezivního opotřebení lze aplikovat mezi funkční plochy mazivo. Někdy dochází při adhezivnímu opotřebení k postupnému vylamování částic ve velké míře. Tyto částice se stávají volnými částicemi mezi funkčními plochami a z adhezivního opotřebení se stává opotřebení abrazivní. [12]

6.3. Erozivní opotřebení

Erozivní opotřebení je trvalá změna povrchu a rozměrů součásti způsobená narážením tvrdších částic do součásti. Kinetická energie částic dopadajících na součást se mění na deformační práci a způsobuje plastickou deformaci. Opakované nárazy mohou mít charakter únavového



Obrázek 4: erozivní opotřebení

zatěžování. Hlavně pokud částice dopadají pod úhlem okolo 90° .

Médium, které tyto nečistoty (částice) dopravuje k povrchu součásti může být: proud plynu, proud kapaliny nebo jednotlivé kapky.

Velikost plastické deformace po dopadu částice závisí na tvrdosti povrchu, tvrdosti částice, dopadové rychlosti, úhlu dopadu, tvaru a velikosti částice. V závislosti na těchto faktorech může dojít k situacím:

- Roztříštění částice, pokud je povrch dostatečně tvrdý
- Vytvoření rýhy, pokud je úhel dopadu malý a částice ostrohranná.
- Vytvoření trhliny, pokud částice vnikne do povrchové vrstvy součásti.
- Vytvoření dopadového kráteru, pokud částice dopadne kolmo na povrch

[8], [12]

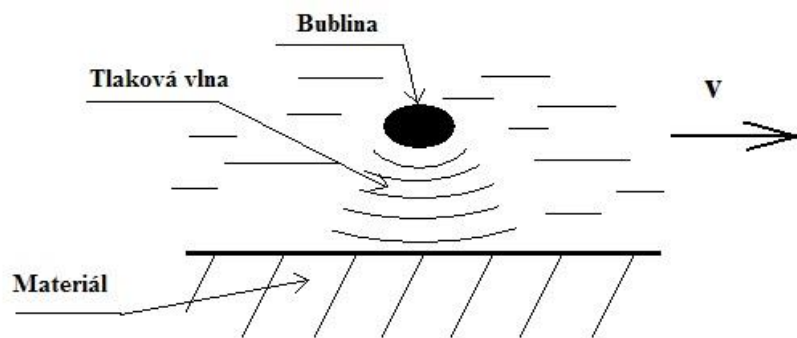
6.4. Kavitační opotřebení

Kavitační opotřebení je negativní jev, který zhoršuje kvalitu povrchu vlivem kavitace.

Kavitace je fyzikální jev v kapalině, při kterém vznikají a zanikají

kavitační bubliny a následně implodují a vytvářejí rázové vlny s destruktivním účinkem. Tyto hydrodynamické rázy působí na povrch materiálu jako kontaktní tlaky u opotřebení povrchovou únavou.

Ke kavitačnímu opotřebení dochází pouze v kapalinách. Bývá často chybně zaměňováno za důsledky koroze. Nejčastěji se vyskytuje u rychle rotujících těles ve vodě. Například u lodních šroubů nebo vodních turbínách. [15]



Obrázek 5: kavitační opotřebení



Obrázek 6: kavitace na lopatkách lodního šroubu

6.5. Únavové opotřebení

Únavové opotřebení se vyznačuje tím, že postupně kumuluje poruchy ve svrchní vrstvě materiálu při opakovaném kontaktním zatěžování. Bude-li součást zatěžována tak, že napětí přesáhne mez kluzu, jedná se o nízkocyklovou únavu. V případě, že napětí mez kluzu nepřesáhne, jedná se o vysokocyklovou únavu.

K únavovému opotřebení dochází, pokud na sebe silově působí dvě tělesa a jejich vzájemné působení se cyklicky opakuje. Typickým příkladem jsou valivá ložiska a ozubená kola. Oba zmíněné mechanismy mají zakřivené styčné plochy, tudíž síla, kterou přenáší je koncentrována do jednotlivých bodů. Kromě vysokých kontaktních tlaků na

obě tělesa působí skluz a tření, což má za následek tahové a smykové namáhání. Přičemž výsledkem je opotřebení součásti.

- Pitting

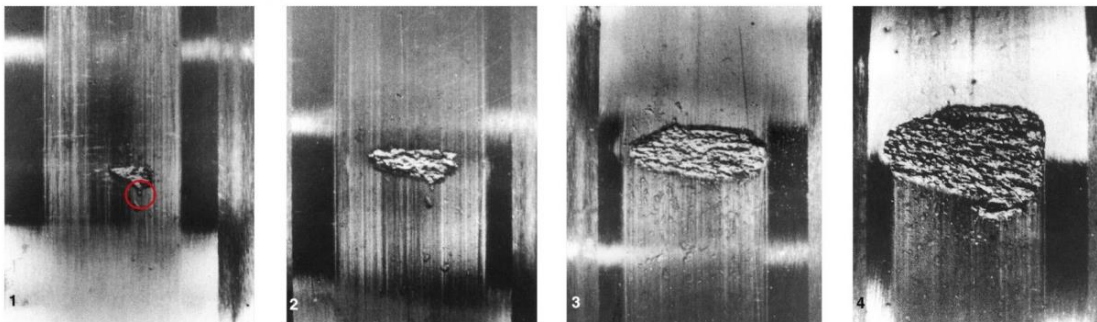
Častý typ únavového poškození tvořený důlky. Nejčastěji jsou důlky kruhového tvaru, nicméně existují i důlky hranaté nebo protáhlého tvaru. Záleží na tvrdosti povrchu součásti.

Na vzniku těchto důlků se podílí mazivo, které díky tlaku mezi dvěma součástmi zatéká do drobných trhlin v povrchu. V těchto trhlinách je následně uzavřeno důsledkem smykového namáhání. V uzavřených trhlinách se mazivo vlivem namáhání rozpíná a z trhliny časem vytvoří důlek.

- Spalling

Jedná se o kontaktní únavové opotřebení, způsobující odlupování částí povrchu. Opakované kontaktní tlaky, působící na součást s tvrdým povrchem, vyvolávají podpovrchová smyková napětí. Vlivem těchto smykových napětí vznikají podpovrchové trhliny, které ve výsledku vedou až k odlupování povrchové vrstvy. Vedle provozních podmínek má na únavové opotřebení vliv drsnost povrchu, tvrdost povrchu a nečistoty. Zmírnit účinky únavového opotřebení lze například vhodným mazáním.

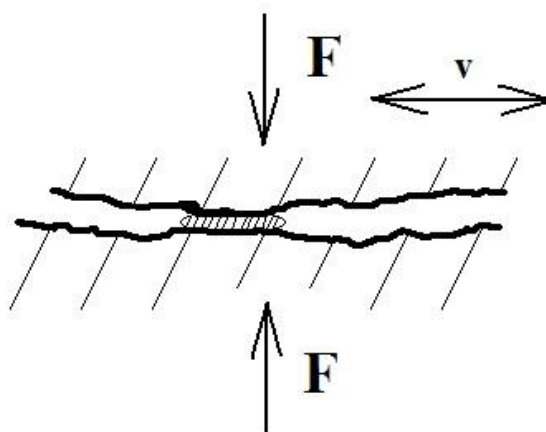
[12]



Obrázek 7: únavové opotřebení valivých ložisek

6.6. Vibrační opotřebení

Vibrační opotřebení je způsobeno drobným kmitáním funkčních ploch a jejich zatěžování silami. Tyto pohyby jsou způsobeny vibracemi a pružnými deformacemi v uložení namáhaných součástí. Při těchto drobných kmitavých pohybech, které mají amplitudu kmitu 10^{-4} – 10^{-1} mm, nedochází k odstraňování otěrových částic, a



Obrázek 8: vibrační opotřebení

tudíž jsou dále namáhány. To způsobuje, že částice oxidují a opotřebovaná místa se zbarvují do hnědočervené barvy. Nazývá se to „krvácení materiálu“. Jako u většiny opotřebeních tomu lze zabránit použitím vhodného maziva. Vrstva maziva zabraňuje přístupu kyslíku a nedochází k oxidaci povrchové vrstvy. Vedle oxidace je vibrační opotřebení zdrojem drobných trhlin a únavových lomů.

Toto opotřebení se často vyskytuje u ložisek, čepů, hřídelí nebo nalisovaných spojích. Na součásti tohoto typu se přenáší kmity vlastní nebo buzené cizím zdrojem.

Míru vibračního opotřebení nejvíce ovlivňují faktory:

- Amplituda kmitu
- Frekvence kmitu
- Intenzita tlaku v místě styku součástí
- Vlastní materiál

Pro správnou funkčnost, například čepu, je v uložení zapotřebí drobná vůle. Tato vůle logicky umožňuje jemné kmitání. Otázkou však je, zda bude amplituda pohybu větší, než může být vyrovnáno pružnými deformacemi povrchu. Pokud bude amplituda větší, než může být velikost pružné deformace čepu, pak bude k vibračnímu opotřebení docházet. Vliv frekvence kmitání je nepřímo úměrný opotřebení, tudíž s nižší frekvencí se bude součást opotřebovávat více. Důvodem je to, že při nižší frekvenci se více projeví korozní opotřebení.

O tlaku se nedá říct, že by byla jeho velikost úměrná k velikosti vibračního opotřebení. S rostoucím tlakem se sice zvyšuje nežádoucí tření, ale zároveň se zmenšuje amplituda kmitání. Tudiž zaleží na jednotlivých případech. [12]

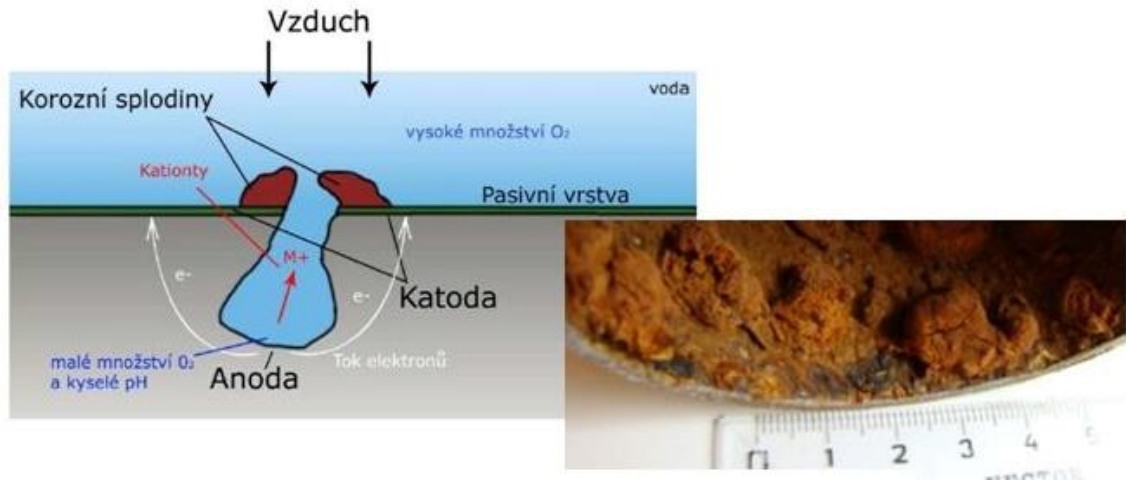
7. Deformace

Deformace je definovaná jako změna geometrického tvaru součásti. Za nežádoucí jev se považuje, pokud je deformace trvalá. Například ohnutí hřídele nebo ovalita ozubeného kola. Naopak pružná deformace se za poškození nepovažuje. K deformaci dochází, když napětí překročí mez kluzu materiálu, ze kterého je součást zhotovena. Zdrojem onoho napětí jsou vnitřní nebo vnější síly. Mezi vnitřní síly řadíme: zbytkové napětí z výroby, změna teploty a podobně. Vnější síly způsobující deformaci mohou být: ohybové a torzní momenty. [12]

8. Koroze

Koroze je nežádoucí rozrušování materiálu důsledkem chemické a elektrochemické aktivity. Proto je rozdělována na chemickou a elektrochemickou.

- Chemická koroze se nevyskytuje tak často jako koroze elektrochemická. Vyskytuje se pouze v prostředí, které není elektricky vodivé. Příkladem je tvorba okují při tváření za tepla.
- Elektrochemická koroze se v praxi vyskytuje daleko častěji. Jedná se o degradaci materiálu, během které vzniká elektrický proud. Podmínkou je elektricky vodivé prostředí. Tudiž stačí přítomnost kovu a vlhké prostředí. Jako vlhké prostředí je brána i kondenzační nebo vzdušná vlhkost.



Obrázek 9: koroze

Dále lze korozi dělit na rovnoměrnou, nerovnoměrnou, bodovou a mnoho dalších druhů.

- Výhodou rovnoměrné koroze je, že lze předvídat její postup, šíří se rovnoměrně.
- Nerovnoměrná koroze napadá například jen některé části povrchu.
- Bodová koroze zabírá malou plochu povrchu, ale působí do hloubky materiálu. Někdy může materiál prokorodovat skrz na skrz.

Nejčastěji při konstruování a výběru vhodného materiálu řešíme takzvanou atmosférickou korozi. Atmosférická koroze je podporována přítomností: vlhkosti, minerálních solí, slunečního záření, vzduchu, kyslíku a jiných plynů.

Nekorozivní vlastnosti mají takzvané ušlechtilé materiály. Například zlato, které se používá jako ochranný povlak v elektronice. Tyto ušlechtilé materiály jsou poměrně drahé.

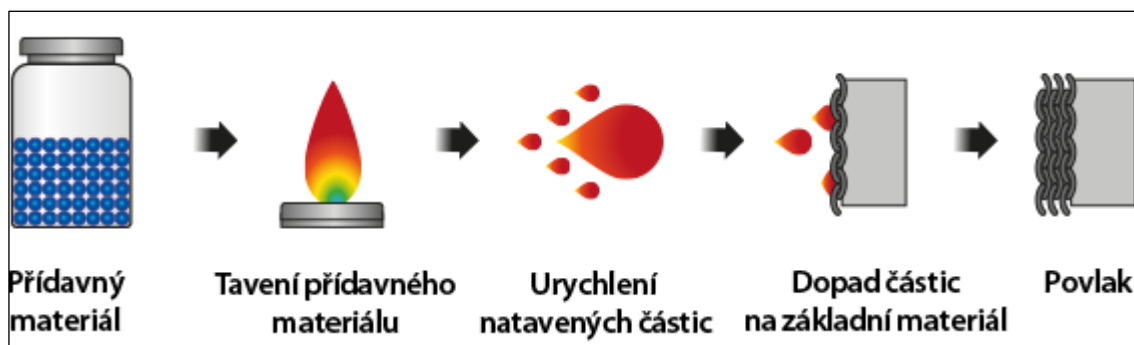
Hliník je známý tím, že reaguje s kyslíkem a vytváří vrstvu oxidu hliníku, která zabraňuje další oxidaci.

Železné materiály jsou náchylné k oxidaci a následnému odlupování zoxidovaných vrstev, tím se obnaží další vrstva. [8], [18]

9. Návrhy řešení

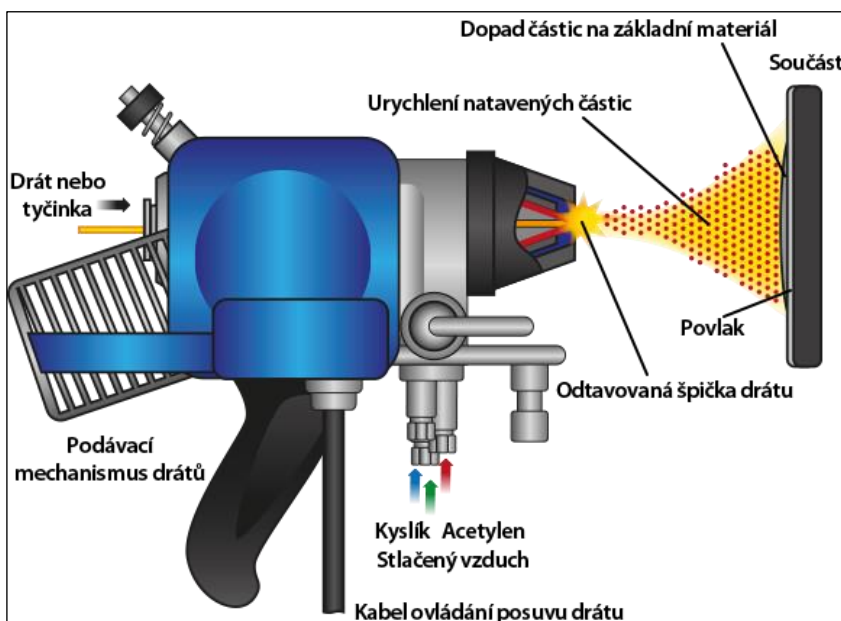
9.1. Žárové nástřiky

Jedná se o povrchovou úpravu postupným nanášením roztavených, nebo natavených částic materiálu na povrch součásti. Cílem nástřiku je vytvořit na povrchu souvislou vrstvu, která zlepšuje odolnost, funkčnost a životnost součásti.



Obrázek 10: proces žárového stříkání

Materiál určený k nanášení je ve formě prášku nebo drátu přiveden do trysky, kde je nataven a následně tryskán na součást. Materiál můžeme natavovat plamenem nebo pomocí



Obrázek 11: žárové stříkání plamenem

elektrického oblouku.

Po nanesení materiálu v dostatečném množství, vytvoří souvislou vrstvu o určité tloušťce (obvykle větší než 50 mikrometrů), která rychle ztuhne.

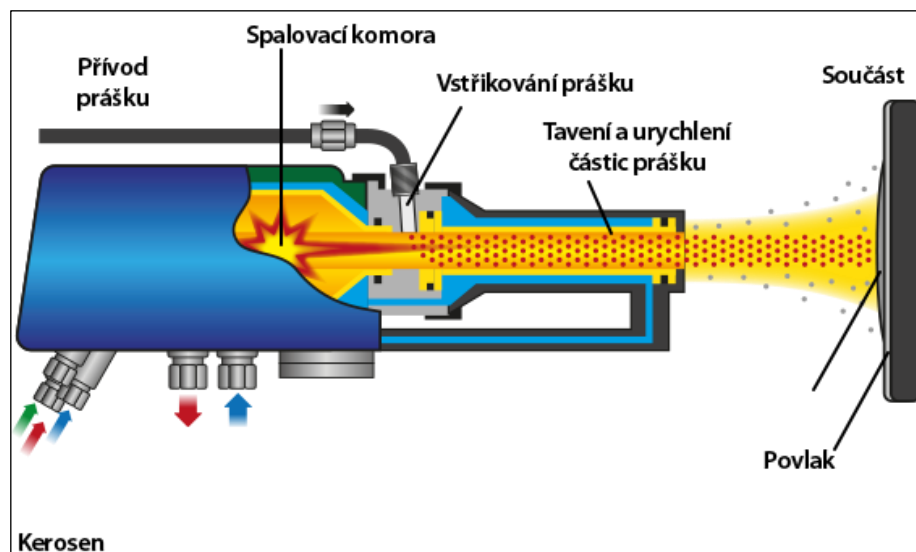
Materiály, které lze tímto způsobem nanášet jsou kovy, keramiky a jejich slitiny. U těchto materiálů nesmí docházet k rozpadu pod bodem tání. Povlakovaná součást je vlivem procesu ohřívána na teplotu cca 100 °C, což je teplota při které nedochází k deformacím. Výhodou metody žárových nástřiků je, že ji můžeme aplikovat na tvarově složité výrobky, případně na jejich části. [19], [20]

9.2. HVOF

Metoda s názvem High Velocity Oxygen Fuel, zkráceně HVOF je metoda vysokorychlostního nanášení plamenem.

Plnění spalovací komory kyslíkem a palivem probíhá kontinuálně s hořením těchto složek. Palivem většinou bývá kerosin, propan, acetylen, vodík apod. Hořící složky jsou urychlovány ve speciální trysce, která má konvergentně-divergentní tvar. Tryska je dlouhá 8–30 cm. Spaliny dosahují supersonických hodnot. Materiál, který chceme nanést na povrch výrobku je pomocí nosného plynu dodáván přímo do supersonického plamene, kde částice materiálu získají vysokou rychlost a zároveň dojde k jejich natavení. Plamen nedosahuje tak vysokých teplot, abychom mohli použít například keramiku, jako přídavný materiál. Na druhou stranu díky nízké teplotě nedochází k oxidaci a fázovým přeměnám nanášeného materiálu během procesu. Teplota plamene je zhruba 2800 °C a rychlost spalin je 1525–1825 m · s⁻¹. Vysoká rychlost částic přídavného materiálu při dopadu způsobí výborné rozprostření a uchycení částic k povrchu součásti. Zároveň díky nadzvukové rychlosti nedochází po cestě k nauhličení částic nanášeného materiálu.

[21], [22], [23]



Obrázek 12: žárové stříkání – vysokorychlostní stříkání plamenem

9.3. Navařování plechů

Jedná se o navařování jednotlivých segmentů na výrobek za účelem zvýšení odolnosti proti otěru. Je to specifické opatření, aplikovatelné na úzkou skupinu výrobků. Typickým příkladem jsou podkopové lžice bagrů, lžice nakladačů nebo korečky. Jednotlivé



Obrázek 13: nakladač – ochrana pomocí pinů a VIDA prvků Renomag

segmenty se vyznačují dobrou svařitelností. Ta je potřebná pro jejich navaření na základní materiál, ze kterého je například podkopová lžice vyrobena. Segmenty se aplikují pouze na část povrchu lžice, zpravidla na místa nejnáchylnější k otěru. Tou nejdůležitějších vlastností těchto přídavných dílů je vysoká otěruvzdornost a tvrdost, přesahující 700 HB. Konkrétně firma Renomag, vyrábějící tyto bloky, dosáhla takto vysoké tvrdosti díky tvrdému karbidu chromu vázaného v matrici naneseného na svařitelnou základovou desku. Bloky se vyrábějí v různých velikostech a tvarech, aby byly dobře aplikovatelné na tvarově složitější těžební nástroje. [24]

9.4. Otěruvzdorné plechy

Problémy spojené s opotřebením a mechanickým namáháním nemusíme řešit jen přidáním další vrstvy, ale můžeme změnit samotný základní materiál. Jednou z možností je použití otěruvzdorného materiálu HARDOX od švédské firmy SSAB. Ta tento materiál dodává většinou ve formě plechů a je určen k dělení laserem a další montáži.



Obrázek 14: plech HARDOX 450

Plechý HARDOX jsou vyráběny v řadách 400, 450, 500, 550, 600. Přičemž každá řada má jiné mechanické vlastnosti.

Pokud vezmeme v potaz podmínky, za kterých se dají jednotlivé plechy bez problémů svařovat, tedy $C_{ekv} \leq 0,35$ hm. %, $C \leq 0,2$ hm. % a zároveň nesmí být plech tlustší než 25 mm, pak tyto podmínky nespĺňuje žádná řada. Nicméně řady 400 a 450 se považují za dobře svařitelné s použitím předehřevu materiálu. Proto jsou tyto plechy vhodné například k výrobě korb nákladních automobilů a lžic bagrů. Tvrdost řady 400 se pohybuje v rozmezí 370–430 HB a tvrdost řady 450 v rozmezí 425–475 HB. HARDOX 500 má uhlíkový ekvivalent do 0,45 hm. % a obsah uhlíku 0,3 hm. %, nicméně ho lze za určitých podmínek svařovat. Nejdolnější proti opotřebení jsou plechy řady 600. Dosahují tvrdosti až 570–640 HB, ale výrobce je nedoporučuje ke svařování, ani dalšímu tepelnému zpracování. Proto jsou vhodné například pro zpracování abrazivních materiálů v průmyslu. [26], [27]

9.5. Hadfieldova ocel

Hadfieldova ocel je manganová austenitická ocel disponující speciálními vlastnostmi, která nachází uplatnění v mnoha odvětvích. Hlavní výhodou tohoto materiálu je postupné zpevňování při působení velkých rázů. Finální tvrdost povrchové vrstvy může dosahovat hodnoty až 500 HV. Vysoká tvrdost povrchu následně zvyšuje odolnost proti abrazivnímu opotřebení a zároveň si ocel zachovává dobrou houževnatost jádra. Díky těmto vlastnostem je schopna odolávat vysokému rázovému namáhání. Výsledné výrobky se hojně využívají jako části strojů pracujících v důlním průmyslu, těžebním průmyslu nebo jako části železničních tratí. Například zuby lžic bagrů, vrtáky hloubkových vrtů, železniční srdcovky a další výrobky. Navíc austenitická manganová ocel dobře odolává opotřebení při styku kov na kov, proto ji lze použít při výrobě ozubených soukolí a podobně. Chemické složení Hadfieldovy oceli prošlo od doby jejího patentování roku 1883 jen nepatrnými změnami. C 1–1,5 %, Mn 11,5–14,5 %, Cr 0,7–1,2 %, Si 1 %. Kvůli vysokému obsahu uhlíku, manganu a nízké teplotní vodivosti je Hadfieldova ocel velmi obtížně svařitelná. Stejně tak se velice špatně obrábí. Proto se většina výrobků z této manganové austenitické oceli odlévá a následně je možné odlitek

dobrousit do konečného tvaru. Dobrou odolnost Hadfieldovy oceli vůči tlaku a dynamickým rázům dokazují její mechanické vlastnosti. Mez kluzu se pohybuje v rozmezí 345–414 MPa, mez pevnosti mezi 800–900 MPa a tažnost mezi 35–50 %. [28], [29], [30]

10. Problematika v praxi

Provozovatel velkorypadla rypadla KU 800, firma Vršanská uhelná a.s. požádala o řešení problematiky týkající se opotřebením korečků. V první etapě by se řešila rychlost, s jakou se zuby korečku opotřebovávají, jejich ulamování a analýza materiálu ze kterého jsou zhotoveny. Cílem druhé etapy by byl návrh nového materiálu, ze kterého lze vyrobit zuby odolávající prostředí a dynamickým rázům při těžbě.

Firma Vršanská uhelná a.s. poskytla podrobný popis problematiky v písemné podobě, dále poskytla výkresovou dokumentaci, podklady chemického složení dodávaného materiálu, snímky korečků s opotřebením a návarem.

Rypadlo je osazeno dvěma typy korečků. První s označením č.v. 0-02-1969 vybaveno zuby č.v. 2673, které jsou vyráběny z materiálu VP7. Druhý typ nese označení č.v. 81-1-5038, na které jsou přivařeny břity č.v. 1-0-00849 zhotovené z materiálu 42CrMo4. Břity č.v. 1-0-00849 jsou navařeny tvrdokovem. Pro navařování se používají návarové elektrody tohoto typu:

- SK 255-O – dodavatel Böhler Uddeholm (používá KSK při výrobě)
- OK 86.08 – dodavatel ESAB (používáno při opravách)

Byly odzkoušeny i návarové elektrody:

- WELCOWARE 1738 – dodavatel WELCO (použito 1x – vysoká cena vůči životnosti oproti ostatním návarům)
- Cothal 78 OA – dodavatel CORODUR (1x použito – výsledek neznámý)

Opotřebením, ke kterému dochází při těžbě vede k nutným odstávkám stroje, opravám a výměnám opotřebovaných dílů. Pro provozovatele je to značná finanční zátěž, kterou se snaží eliminovat. Jedním způsobem je právě aplikace nových materiálů.

Stávající zub korečku 2673, který je vyráběný z materiálu VP7 má činnou délku 100 mm. Zub je na špičce zušlechtěný na minimální pevnost 1520 MPa a v části dříku, ve které dochází k lomu, na minimální pevnost 930–1180 MPa. Díky tvaru zubu dochází k jeho rovnoměrnému opotřebení. Je potřeba se zaměřit na otěruvzdornost špičky a houževnatost přechodové části (dříku) zubu. Nedostatečná houževnatost přechodové části vede k lámání zubů.

Břity 1-0-00849 jsou dosud vyráběny z materiálu 42CrMo4. Stávající břit přivařený ke korečku, je vhodný pro odtěžení jílovité zeminy bez písku a proplástek o objemu cca 3,5–4 mil. m³. Poté co je jeho životnost u konce, následuje oprava špiček návarem, se kterým je schopen břit těžít stejný objem. Po těchto dvou cyklech je nutná výměna celého zubu. Z časového hlediska dochází k výměně zubů přibližně jednou ročně.

Pokud se těží materiál s daleko větším abrazivním účinkem, dochází k intenzivnějšímu obušování návaru a následnému rychlému ubývání základního materiálu. Pokud se v obsahu těžného materiálu nachází i větší a tvrdší kusy (proplátky), dochází k dynamickým rázům a následnému ulamování špiček břitů v délce cca 50 mm. Na základě této destrukce je úbytek základního materiálu ještě rychlejší. Z praxe je vyzorováno, že koreček těžící písek, je nutno servisovat po odtěžení 1,8–2,2 mil. m³. Při těžbě písku s proplátky se životnost sníží na cca 0,6 mil. m³.

Pro zvýšení životnosti korečků s břity je nutno řešit:

- Vhodnější materiál špiček břitů (otěruvzdorný, houževnatý, pevný)
- Vhodnější návarové elektrody
- Lepší tvar špičky
- Způsob uchycení břitů

Dosavadní navařování břitů je finančně náročné. Nutno řešit výměnné břity a jejich způsob uchycení.

Spojení šroubo-klínové se v minulosti ukázalo pro KU 800 jako nevyhovující z důvodu praskání v místě dříku. Jako možné řešení se zdá uchycení břitů pouze šrouby. Toto řešení nebylo na rypadle doposud odzkoušeno.

[31]

10.1. Poskytnutá dokumentace a vzorky

Vršanská uhelná a.s. poskytla následující podklady:

- 1x nový nepoužitý zub
- 1x použitý opotřeбенý zub
- 1x zuby se zbytkem náváru
- fotodokumentaci korečků a zubů
- výkresovou dokumentaci
- materiálové listy chemického složení dodávaného materiálů

[31]

11. Analýza současného materiálu zubů

Chemické složení:

Výsledky chemického rozboru vzorků označených písmeny A, B a C. Analyzovány byly odříznuté části dodaných vzorků, a to spektrální chemickou analýzou na spektrometru Q4 TASMAN. Hodnoty v níže uvedené tabulce 1 jsou aritmetickým průměrem ze tří naměřených hodnot na každém ze vzorků.

Označení vzorků: Vzorek A – vyměnitelný zub, nový nepoužitý
 Vzorek B – vyměnitelný zub, starý opotřeбенý
 Vzorek C – odříznutý zub s návarem
 Vzorek B1 – vyměnitelný zub, starý opotřeбенý, jiné místo
 Vzorek C1 – odříznutý zub s návarem, jiné místo

Tabulka 1: podíl jednotlivých prvků v hmot. %

Prvek	Vzorek A	Vzorek B	Vzorek B1	Vzorek C	Vzorek C1
C	0,353	0,317	0,322	0,449	0,481
Si	0,501	0,604	0,594	0,484	0,495
Mn	1,494	1,634	1,674	0,734	0,767
P	0,061	0,063	0,103	0,022	0,043
S	0,022	0,029	0,029	0,021	0,028
Cr	0,543	0,639	0,631	1,133	1,125

Mo	0,445	0,415	0,413	0,272	0,279
Ni	0,377	0,171	0,186	0,098	0,111
Cu	0,156	0,143	0,151	0,107	0,117
Al	0,055	0,022	0,027	0,036	0,042
N	0,029	0,028	0,025	0,027	0,026
Ti	<0,001	<0,001	0,0012	0,0013	0,0016
V	<0,005	<0,005	<0,005	0,0051	0,0058
W	0,035	0,030	0,023	0,019	0,018
Zn	0,0059	0,0061	0,0046	0,0053	0,0038
Zr	0,0028	0,028	0,0035	0,0021	0,0038
Fe	95,75	95,73	95,63	96,45	96.29

Na základě výsledků provedené analýzy chemického složení, lze konstatovat, že zkoumaný materiál je podobný oceli třídy 14 220 nebo 15 223 dle ČSN EN 10027-1 (420011). Materiál je dodáván pod označením VP7 s požadovaným chemickým složením (viz tabulka 2). Co se týče požadavku na chemické složení, je možné konstatovat, že materiál z hlediska obsahu legujících prvků danému složení odpovídá. Jen u vzorků C a C1 je vyšší obsah uhlíku a nižší obsah manganu. U vzorků není deklarován obsah některých důležitých prvků, které byli při analýze zjištěny. Například Al, Ni, P, S, Ti, W, Zn.

Tabulka 2: chemické složení oceli VP7

Název	Al	C	Mn	Si	Cr	Cu	Ni	Mo	W	B	Ti	Zr	V
VP 7	-	0,32	1,6	0,8	1,0	-	-	0,6	-	0,006	-	-	0,2

11.1. Zkouška houževnatosti

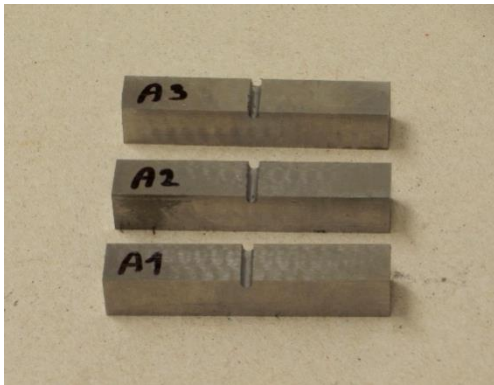
Zkouška vrubové houževnatosti kovových a plastových materiálů. Samotná zkouška spočívá v přeražení zkušební vzorku s vrubem jedním rázem kyvadlového kladiva dle Charpyho za podmínek definovaných normou. Rozměry standardního zkušební tělesa v polovině opatřeného vrubem ve tvaru písmene U nebo V. Těleso je umístěno na dvou podpěrách tak, že kladivo udeří na opačné straně než je vrub. Zkouška rázem v ohybu se provádí na kyvadlových kladivech s nárazovou energií až 300 J a nárazovou rychlostí 5–5,5 m.s⁻¹. Vrbová houževnatost (KC) je dána poměrem energie spotřebované

k přeražení vzorku a plochy průřezu vzorku pod vrubem. V praxi bývá nárazová práce často přepočítávána na vrubovou houževnatost vztahem:

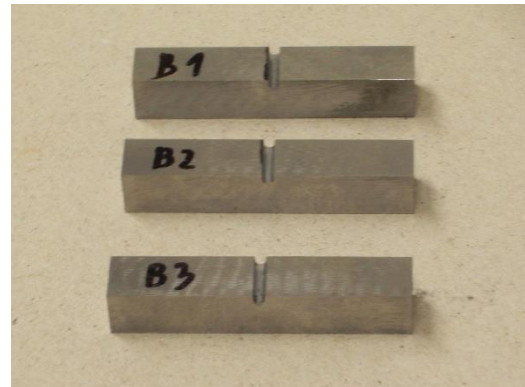
$$KC = K / S_0 \text{ [J/cm}^2\text{]} \quad K = G \cdot (H - h) \text{ [J]}$$

kde K je absorbovaná energie, S_0 je plocha příčného průřezu v místě vrubu, G je hmotnost kladiva, H počáteční výška kladiva, h je maximální dosažená výška kladiva po přeražení vzorku. V závislosti na použitém tvaru vrubu značíme vrubovou houževnatost KCV nebo KCU. Pokud není stanoveno jinak, tak se zkouška provádí při teplotách 23 ± 5 °C. [32]

Co se týče zkoušky vrubové houževnatosti zubů korečku, tak byly připraveny vzorky z obou zubů (A, B). Z každého ze vzorků byly zhotoveny tři zkušební tyče s vrubem ve tvaru písmene U.



Obrázek 15: vzorek A – vyměnitelný zub, nový
nepoužitý



Obrázek 16: vzorek B – vyměnitelný zub, starý
opotřebený

Výsledné hodnoty vrubové houževnatosti KCU jsou zaznamenány v tabulce 3. Z výsledků je patrné, že u vzorku A jsou hodnoty KCU poměrně nízké (očekávané 50–60 J/cm²). Následujícím zkoumáním se zjistilo, že příčinou byly slévárenské vady. [31]

Tabulka 3: hodnoty vrubové houževnatosti vzorků A, B

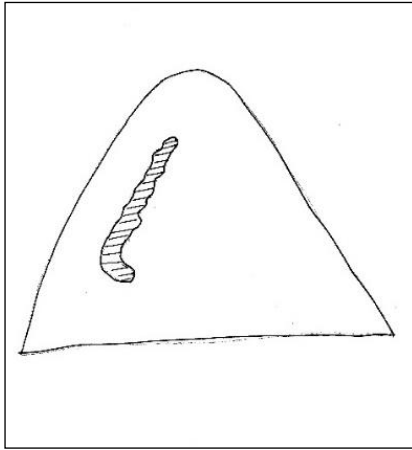
vzorek	KCU2 ₃₀₀ [J/cm ²]
A1	37,50
A2	37,50
A3	39,75
B1	56,63
B2	47,09
B3	26,15

11.2. Makrostrukturální a mikrostrukturální šetření materiálu

Pro zkoušku vrubové houževnatosti a hodnocení struktury vzorku byl nepoužitý zub (vzorek A) rozdělen na několik částí. Po rozřezání vzorku byla zjištěna velká vnitřní metalurgická vada ve formě dutiny. Tato dutina měla rozměry cca 70 x 3–5 mm (viz obrázek 18) a ve vzorku se vyskytovala, tak jak je znázorněno na obrázku 19.



Obrázek 17: vnitřní vada u vzorku A

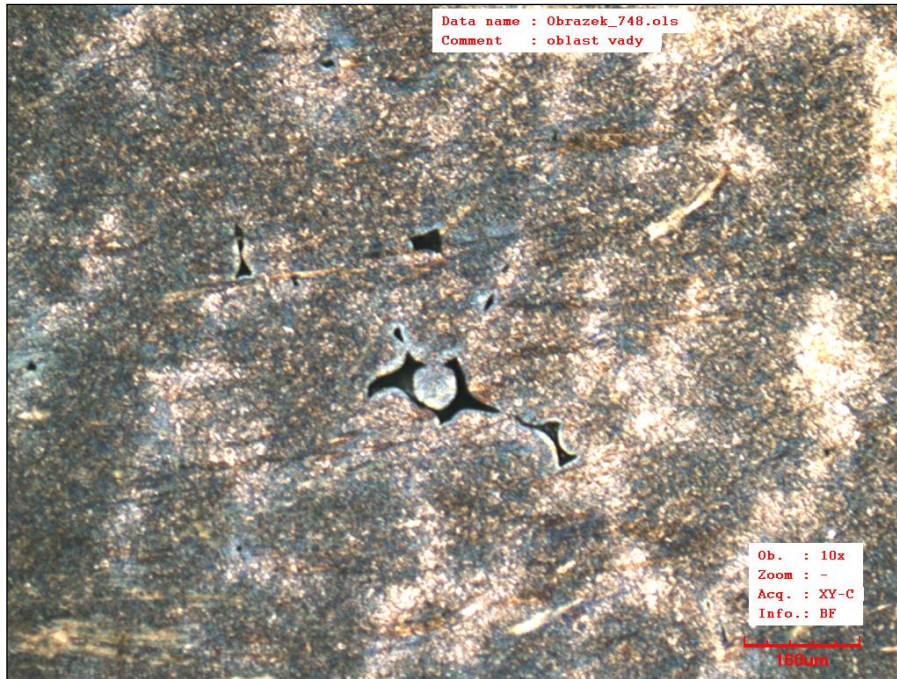


Obrázek 18: umístění vady u vzorku A

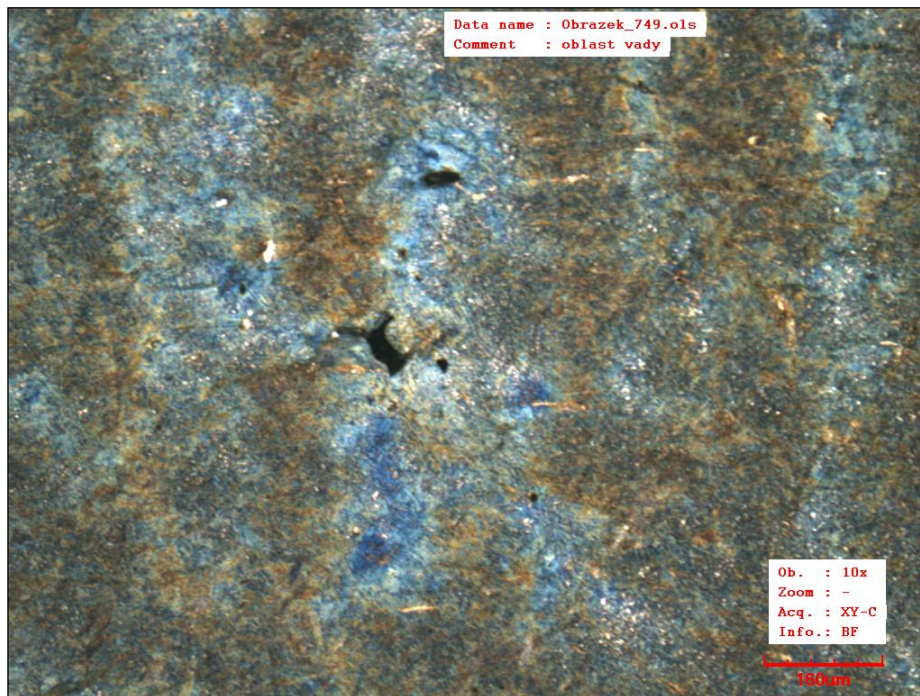


Obrázek 19: makrostruktura vzorku A s vadou

Mikrostruktura vzorku A vykazuje v oblasti výskytu vady zvýšenou porezitu (obrázky 20 a 21). V okolí velké uzavřené dutiny je patrný větší počet modře zbarvených plastických silikátů typu MnS (obrázky 22 a 23). Dále byly ve dvou místech nalezeny tmavé vměstky o velikosti 15–40 mm (obrázky 24 a 25, označeno šipkou A) s blízkým výskytem plastického silikátu typu MnS (obrázek 24, označeno šipkou B).



Obrázek 20: zvýšená porezita v okolí dutiny



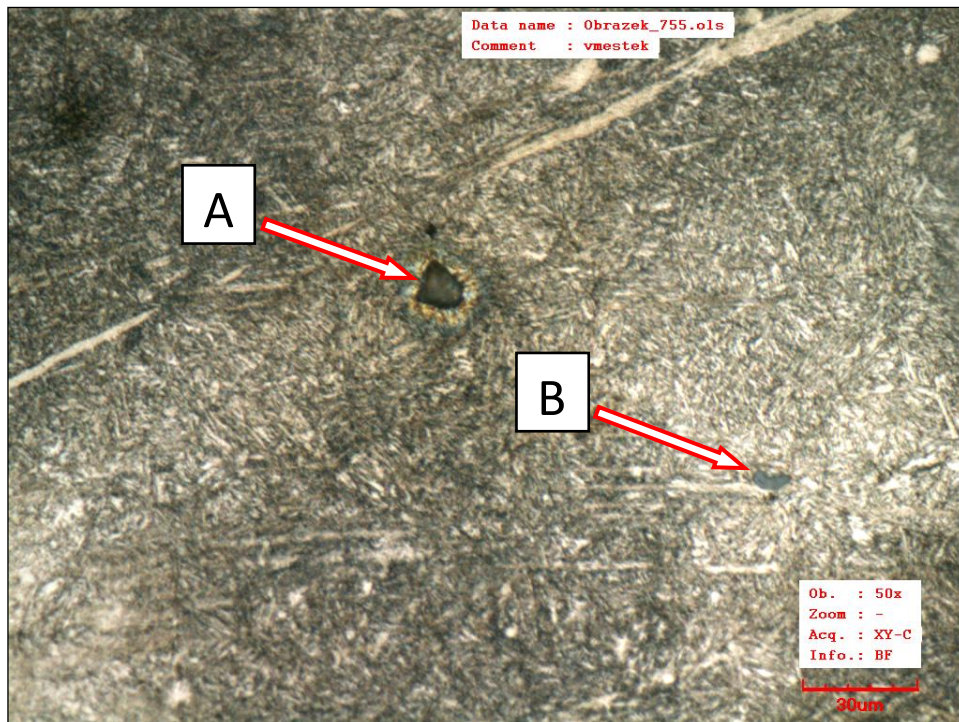
Obrázek 21: zvýšená porezita v okolí dutiny



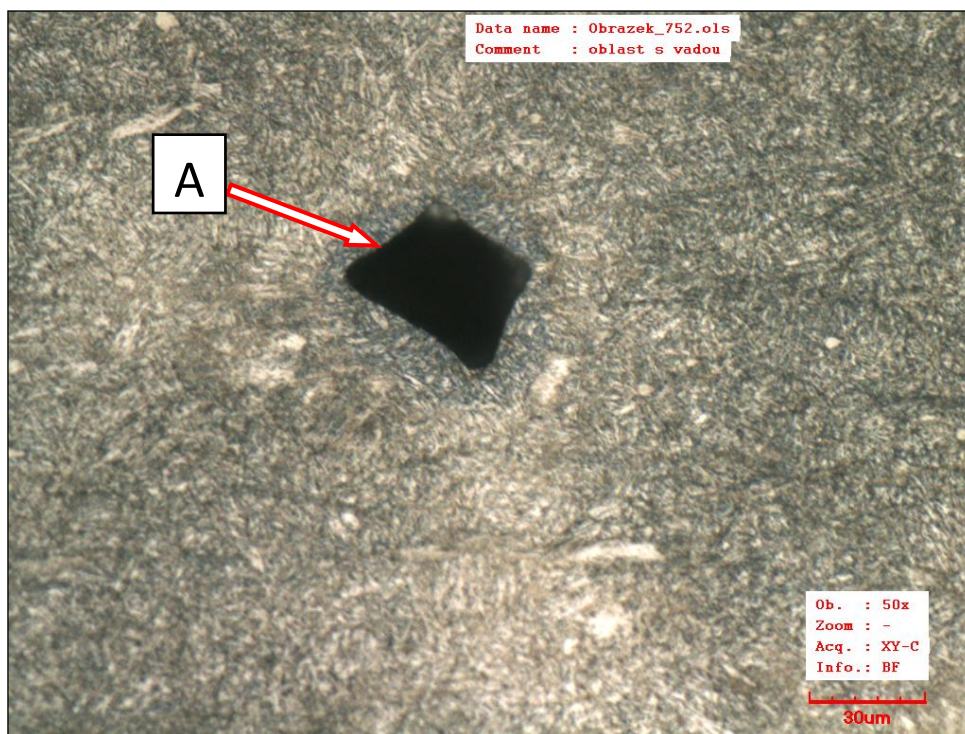
Obrázek 22: výskyt většího počtu vměstků v okolí dutiny (označeno šipkou)



Obrázek 23: výskyt většího počtu vměstků v okolí dutiny (označeno šipkou)



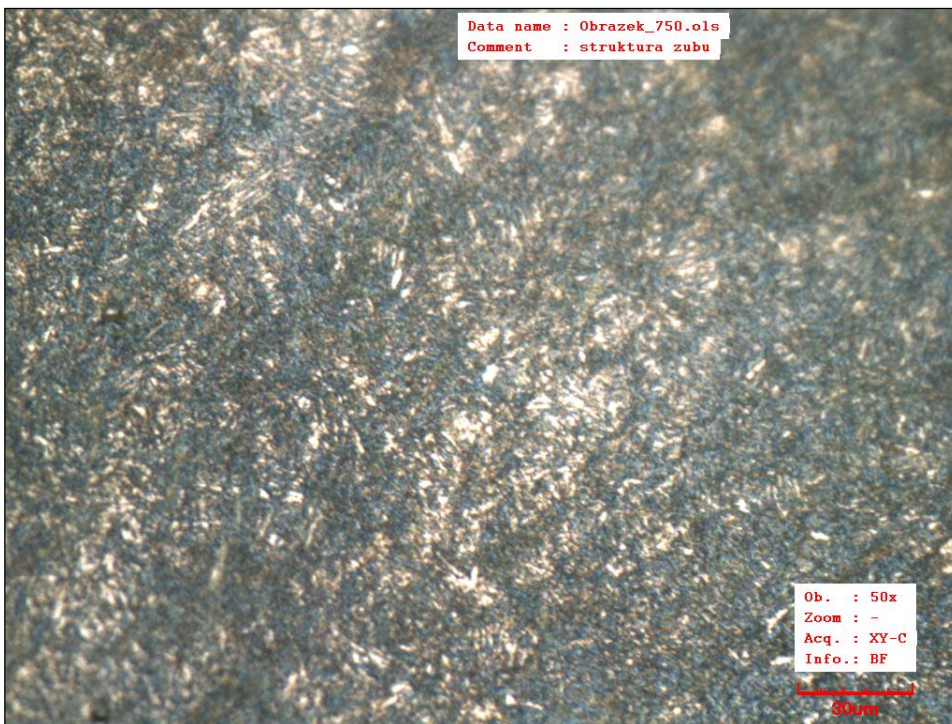
Obrázek 24: výskyt vměstků v okolí dutiny (označeno šipkami)



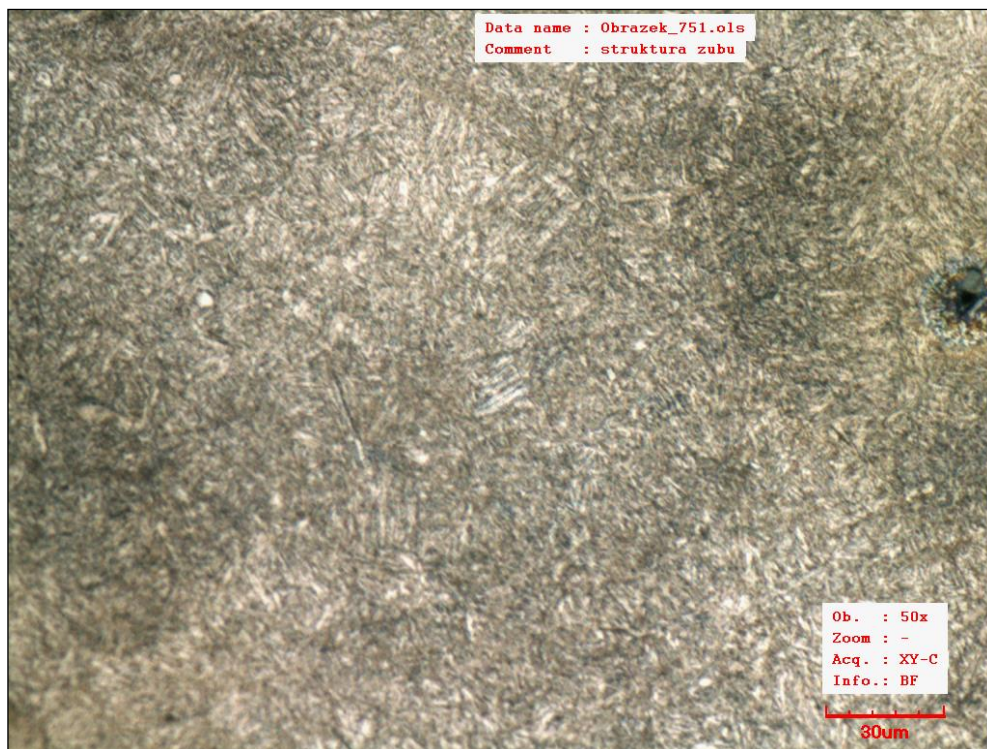
Obrázek 25: výskyt vměstků v okolí dutiny (označeno šipkou)



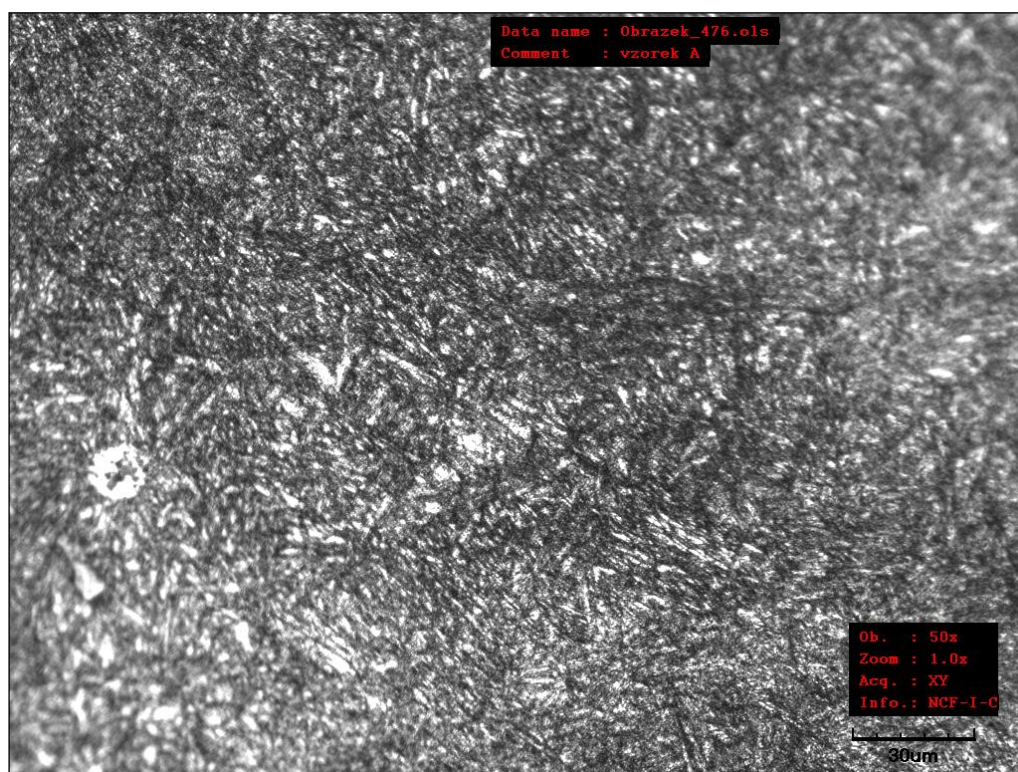
Obrázek 26: mikrostruktura vzorku A



Obrázek 27: mikrostruktura vzorku B



Obrázek 28: mikrostruktura vzorku A



Obrázek 29: mikrostruktura vzorku A

Mikrostruktura vzorků vykazuje bainitický charakter oceli po kalení s výskytem menšího podílu středně jemného martenzitu. Struktura, až do obsahu uhlíku 0,4 %, má navíc středně jemný martenzit a dobré plastické vlastnosti. [31]

11.3. Závěr analýzy stávajícího materiálu

Na základě zkoumání můžeme konstatovat, že zkoumaný materiál je podobný třídě oceli 14 220 nebo 15 223 dle ČSN EN 10027-1 (420011). Materiál je dodáván pod označením VP7 s požadovaným chemickým složením. Po porovnání dodaných informací a informací zjištěných analýzou, lze konstatovat, že materiál z hlediska legujících prvků odpovídá danému chemickému složení. Jisté neshody jsou u vzorků C a C1, kde bylo zjištěn větší obsah uhlíku a absence některých důležitých prvků. Například: Al, Ni, P, S, Ti, W, Zn.

Vyhodnocení analýzy po provedení zkoušky vrubové houževnatosti přineslo negativní výsledky. Za negativní lze považovat velký rozptyl hodnot vzorků A a B, kde dosahovala vrubová houževnatost nízkých hodnot. Konkrétně u vzorku B jde o rozpětí 37–39 J/cm², přičemž by se běžné hodnoty u podobného materiálu měly pohybovat v rozmezí 50–60 J/cm². Proto bude tento materiál křehký a jeho životnost v daných podmínkách bude nižší o cca 40–60 %. Bude docházet k lámání vlivem dynamických rázů při těžbě.

U vzorku A, tedy nového nepoužitého zubu, byla identifikována vnitřní metalurgická vada. Tato vada, ve formě dutiny podlouhlého tvaru a rozměrů cca 70 x 3–5 mm dělá ze zkoumaného zubu zmetek. V našem případě se na vnitřní vadu přišlo až po rozdělení zubu, tudíž až po jeho znehodnocení. Kontrolu po vyrobení nového zubu lze provést i nedestruktivně, například ultrazvukem nebo rentgenem. Tyto metody by bylo dobré zavést pro kontrolu vyrobených zubů, aby se vyloučilo, že se kazový výrobek dostane do provozu.

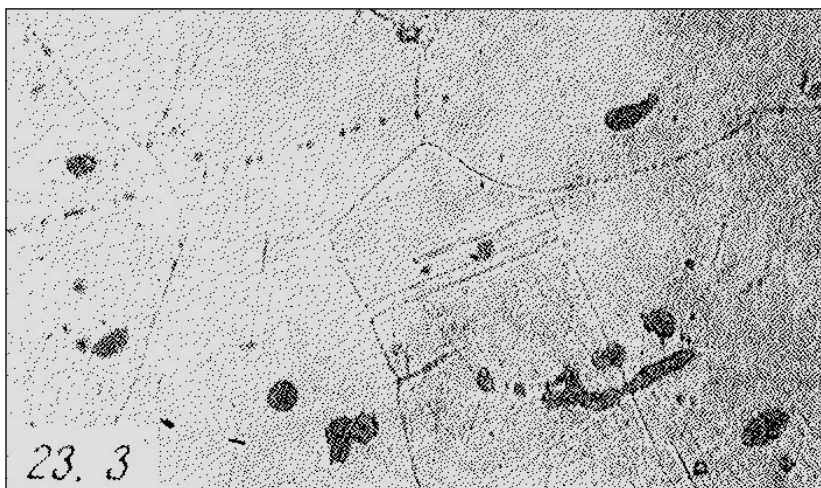
Ze zjištěných údajů, lze konstatovat, že daný typ oceli není příliš vhodným materiálem na výrobu zubů korečku, které jsou osazeny na velkorypadle KU 800. Materiál je vhodnější pro strojní součásti, které vyžadují pevnost jádra. Typickým příkladem můžou být ozubená kola nebo hřídele. Tyto oceli mají díky vysokému obsahu uhlíku vysokou tranzitní teplotu. To znamená, že při teplotě pod -15 °C přecházejí do křehkého stavu, což je pro naše použití nedostačující. [31]

12. Nové materiálové řešení

Jako nejvhodnější řešení se jeví použít pro výrobu zubů korečkových rypadel ocel třídy 17 618. Jedná se o Hadfieldovu ocel. Vlastnosti této oceli jsou následující:

Mez kluzu se pohybuje v rozmezí 345–414 MPa, mez pevnosti 800–900 MPa, tažnost 35–50 % a vrubová houževnatost 80–100 J/cm². Tranzitní teplota je -210 °C. Jedná se o manganovou austenitickou ocel, přičemž ochlazením hluboko pod bod mrazu dojde k přeměně austenitu na martenzit. Díky rozpouštěcímu žíhání lze získat čistě austenitickou strukturu (viz obrázek 30).

Zuby zhotovené z Hadfieldovy oceli následně tepelně zpracujeme.



Obrázek 30: struktura manganové austenitické oceli 17 618 (zvětšení 200x)

Parametry rozpouštěcího žíhání:

T = 1030 °C (max. 1050 °C) po dobu 80 minut. Následné ochlazení v 10% vodním roztoku NaCl. Kování do konečného tvaru lze realizovat při teplotě 950 °C.

Chemické složení:

C 1–1,5 %, Mn 11,5–14,5 %, Cr 0,7–1,2 %, Si 1 %

Výsledná austenitická struktura po tepelném zpracování se při namáháním tlakem, otěrem nebo rázy mění na martenzit. Tento děj probíhá na svrchní části výrobku a zvyšuje jeho odolnost vůči opotřebení. Je udáváno, že výrobky z Hadfieldovy oceli se často vyskytují jako části strojů pracujících v důlním průmyslu, těžebním průmyslu nebo

jako části železničních tratí. Příkladem jsou zuby lžic bagrů, vrtáky hloubkových vrtů, železniční srdcovky a další výrobky, které využívají specifické vlastnosti Hadfieldovy oceli.



Obrázek 31: struktura manganové austenitické oceli 17 618 vystavena tlaku, kde je patrná částečná přeměna austenitu na martenzit (zvětšení 200x)

Jako alternativa k oceli 17 618 může být ocel 17 027, která musí být tepelně zpracována. Vlastnosti této alternativní oceli jsou:

Minimální mez kluzu 700 MPa, minimální mez pevnosti 1000 MPa, minimální tažnost 12 % a tranzitní teplota $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Parametry rozpouštěcího žíhání:

$T = 1030\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 80 minut. Následné ochlazení v oleji o teplotě $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 240 minut. Kování do konečného tvaru lze realizovat při teplotě $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$. [31]

12.1. Problematika nového zubu

Pro dodání Hadfieldovy oceli bylo vytipováno několik dodavatelů. Ve výsledku se jako nejvhodnější dodavatel ukázala firma UNEX a.s. Vybraný dodavatel přímo Hadfieldovu ocel nevyrábí, ale v nabídce má alternativní ocel s označením EN DIN 12513: G-X 120 MnCr 13 2 (422921.4).

Složení oceli EN DIN 12513: G-X 120 MnCr 13 2 (422921.4):

C = 1,331 %, Mn= 13,02 %, Si = 0,495 %, Cr = 0,765 %, Mo = 0,146 %, P = 0,045 %, S = 0,051 %

Ocel s tímto složením má oproti Hadfieldovy oceli vyšší obsah Cr a Mo.

Společnost UNEX a.s. dodala nový zub pro účely mechanického a strukturního testování (viz obrázky 32 a 33). [31]



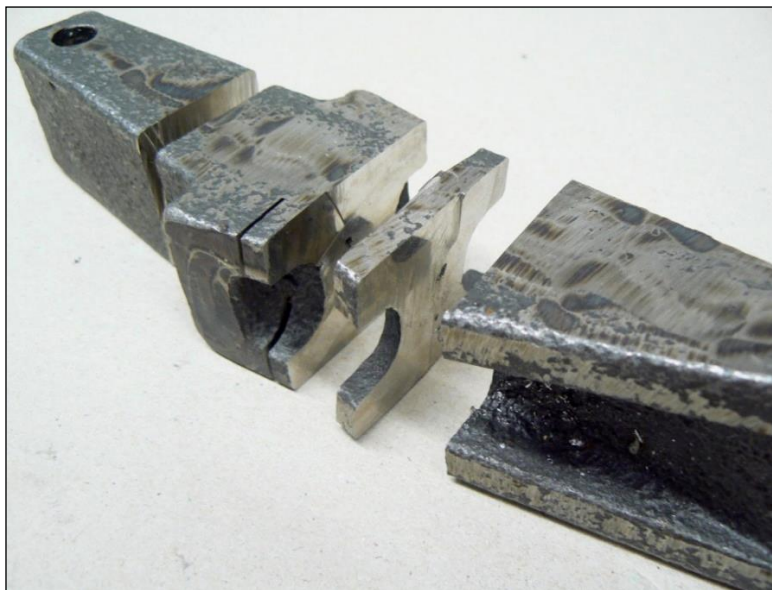
Obrázek 32: nový zub od společnosti UNEX a.s.



Obrázek 33: nový zub od společnosti UNEX a.s.

12.2. Příprava vzorků nového zubu

Dodaný zub byl příčně rozřezán pro účely testování (viz obrázek 34). Jednotlivé segmenty byly zkoumány, zda došlo k martenzické transformaci austenitu na martenzit při mechanickém namáhání. Vzorky byly podrobeny dvou simulačním procesům: údery kladiva na plochu vzorku a řezání vzorku tupou pilou za sucha. Při zkoumání struktury byla zjištěna metalurgická vada ve formě staženiny (viz obrázek 35).



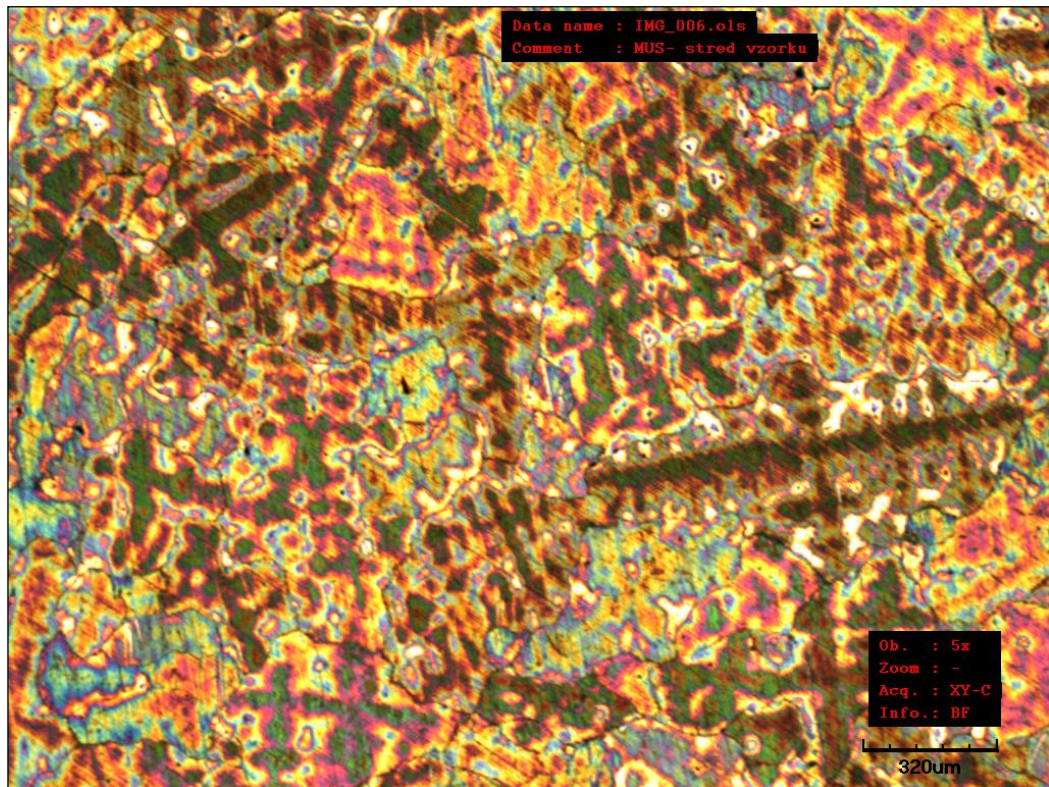
Obrázek 34: dělení zubu na jednotlivé segmenty



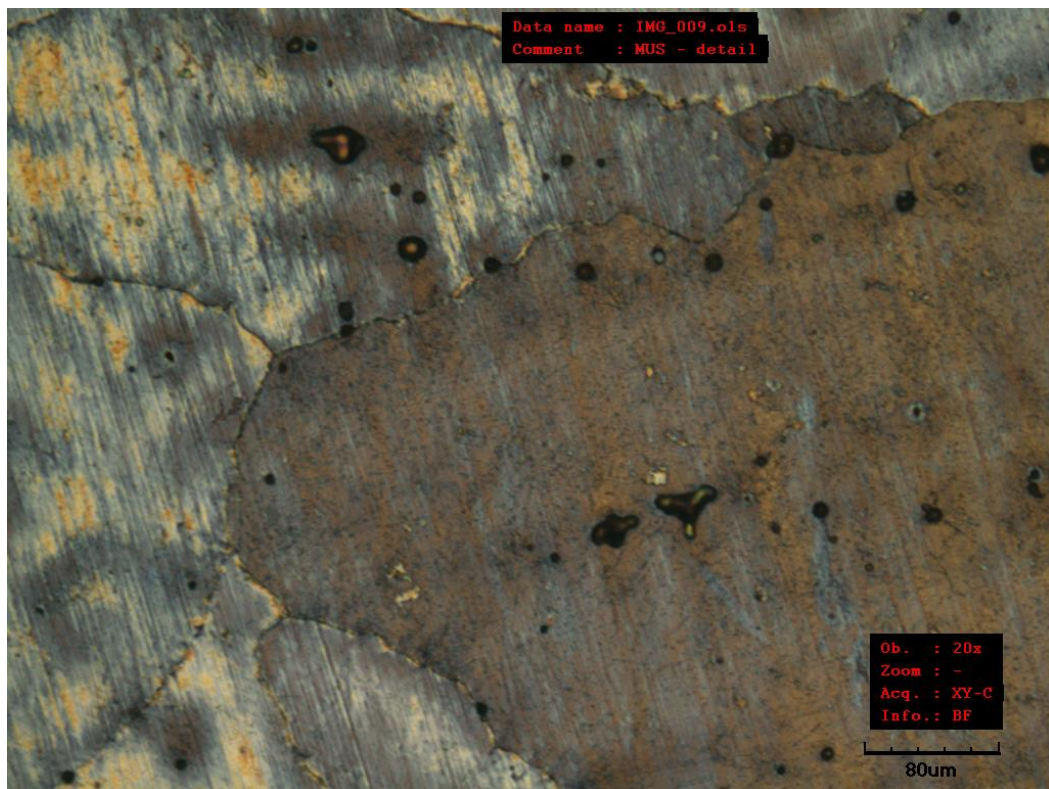
Obrázek 35: metalurgická vada ve středové části zubu

12.3. Mikrostrukturální šetření materiálu po mechanickém namáhání

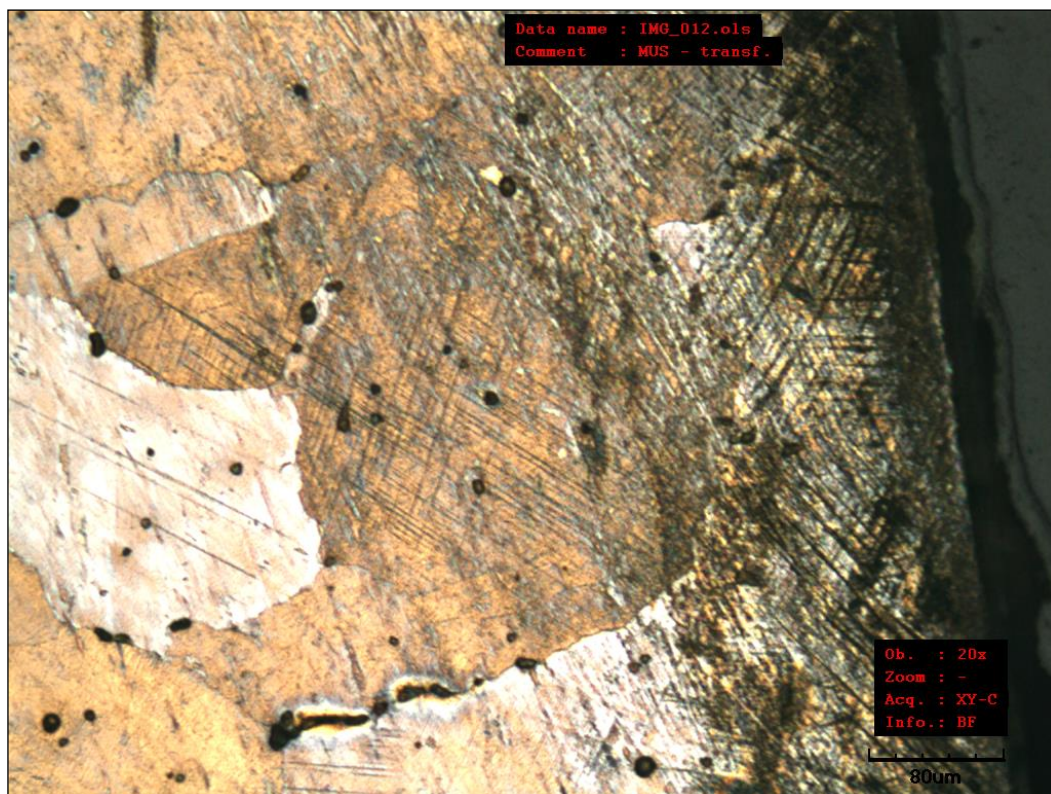
1) Údery kladiva na plochu vzorku



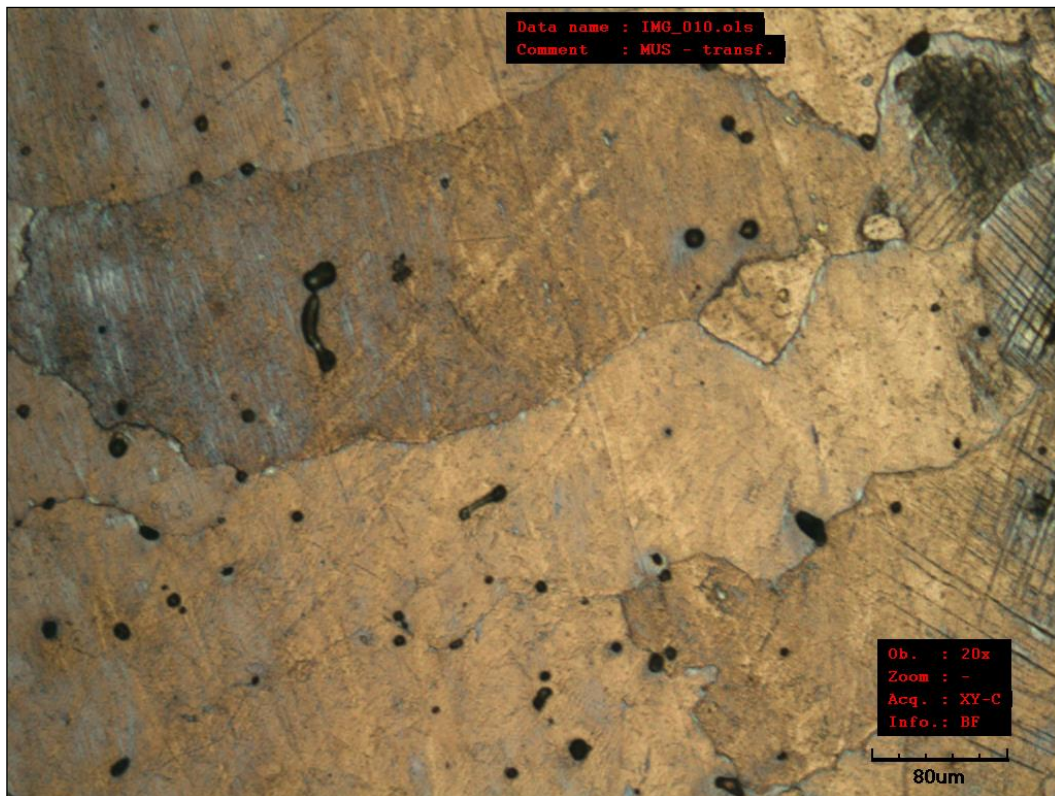
Obrázek 36: mikrostruktura mimo oblast mechanického namáhání



Obrázek 37: mikrostruktura mimo oblast mechanického namáhání – detail



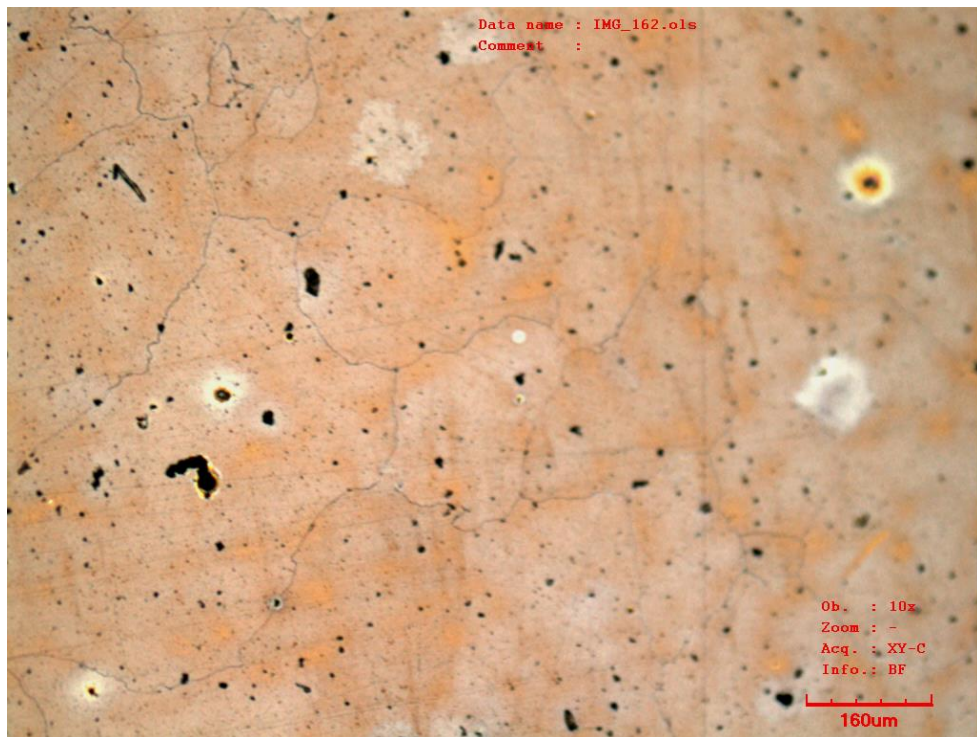
Obrázek 38: mikrostruktura v oblasti mechanického namáhání na povrchu



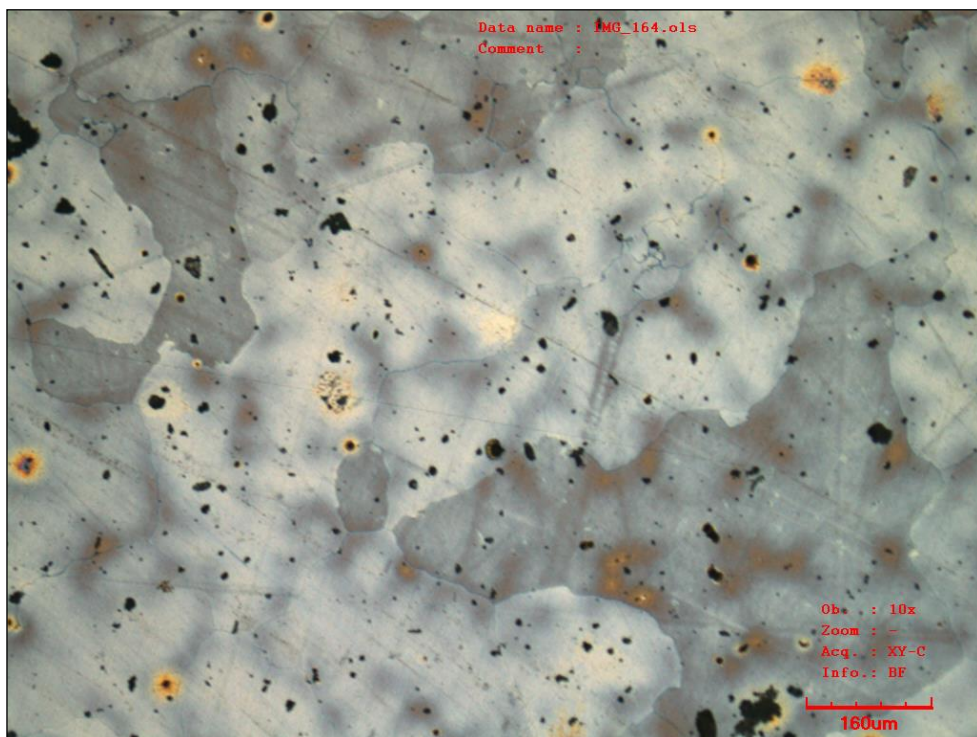
Obrázek 39: mikrostruktura v oblasti mechanického namáhání na povrchu

Mikrostruktura testovaného vzorku po úderech kladiva vykazuje uvnitř odlitku strukturu původního austenitického zrna (viz obrázek 36 a 37). Zrno je v celém obsahu průřezu hrubší, což odpovídá použité technologii odlévání. Na obrázcích 38 a 39 je patrné, že u okrajů v místech mechanického namáhání proběhla transformace z austenitu na martenzit. Tato transformace zasahuje do hloubky 90–110 μm od povrchu.

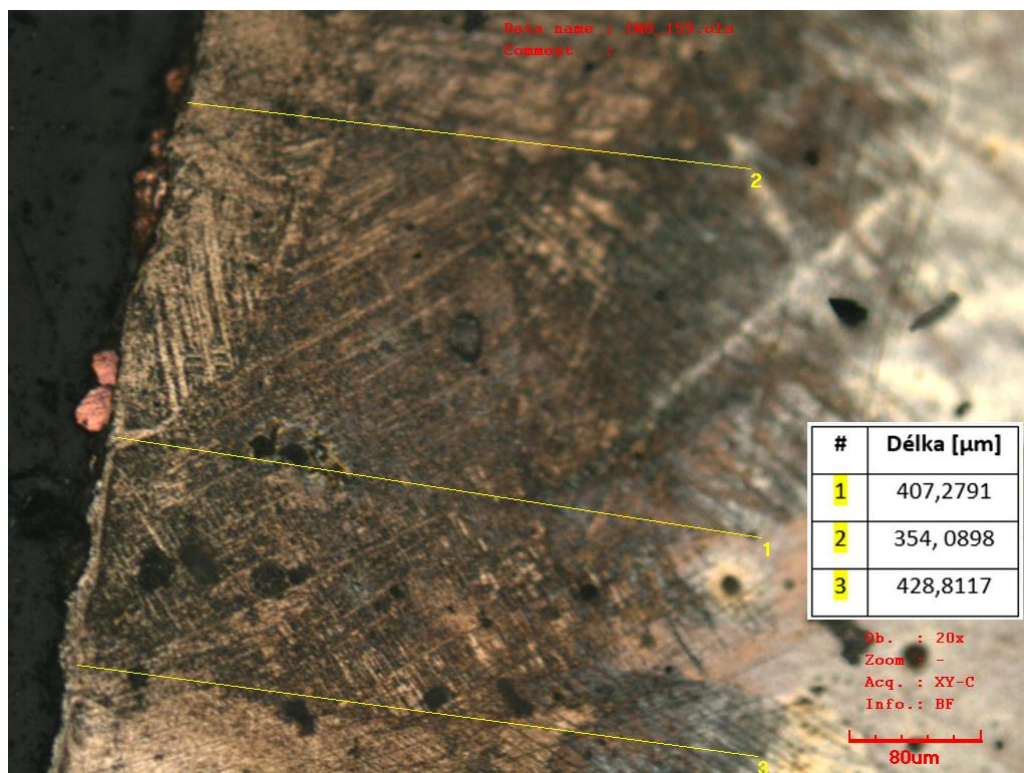
2) Řezání vzorku tupou pilou za sucha



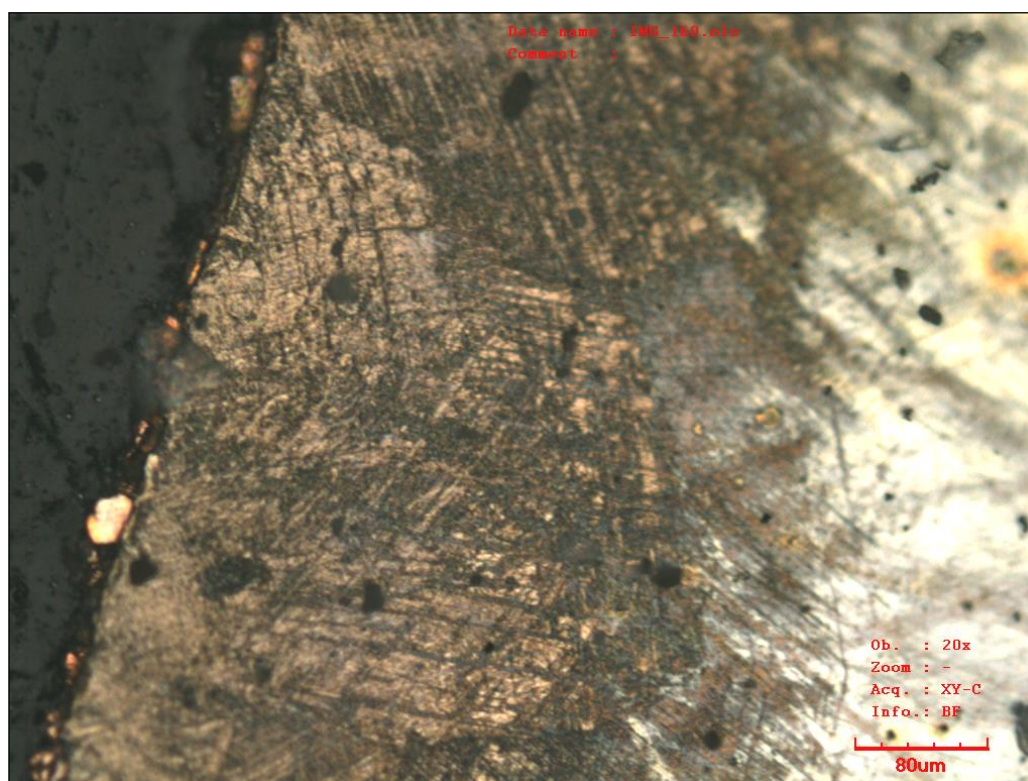
Obrázek 40: mikrostruktura mimo oblast mechanického namáhání



Obrázek 41: mikrostruktura mimo oblast mechanického namáhání



Obrázek 42: mikrostruktura v oblasti mechanického namáhání na povrchu



Obrázek 43: mikrostruktura v oblasti mechanického namáhání na povrchu

Mikrostruktura testovaného vzorku po rozřezání tupou pilou vykazuje uvnitř odlitku litou strukturu původního austenitického zrna (viz obrázek 40 a 41). Zrno je v celém obsahu průřezu hrubší, což odpovídá použité technologii odlévání. Na obrázcích 42 a 43 je patrné, že u okrajů v místech mechanického namáhání proběhla transformace z austenitu na martenzit. Tato transformace zasahuje do hloubky od 354–428 μm od povrchu. [31]

12.4. Závěr k materiálovému řešení nového zubu

Manganová ocel daného chemického složení s vyšším obsahem Cr, která byla zvolena jako náhrada za Hadfieldovu ocel, vykazuje transformaci austenitu na martenzit při mechanickém namáhání. Hloubka, do které transformace zasahuje (max. 0,1–0,4 mm), je závislá na způsobu mechanického namáhání (rázy, tlak, otěr a podobně). Chrom obsažený v materiálu brzdí onu transformaci, která by jinak dosahovala vyšších hodnot. U konkrétního kusu dodaného zubu byla identifikována vada ve formě staženiny o velikosti několika milimetrů. Tato metalurgická vada by vedla k výraznému snížení životnosti zubu.

Postupy dalšího řešení

Objednat sadu několika zubů ve formě odlitků u firmy UNEX a.s. s následující specifikací:

Chemické složení:

C = 1,10–1,40 %, Mn = 11,0–13,0 %, Si max. 1,0 %, Cr max. 0,5 %

(varianta ocele třídy 17 618 - Hadfieldova ocel)

Tepelné zpracování:

Rozpouštěcí žíhání: $T = 1030\text{ }^{\circ}\text{C}$ (max. $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$) po dobu 80 minut. Následné ochlazení v 10 % vodním roztoku NaCl.

Kontrola kvality:

Předepsání nedestruktivních zkoušek: zkouška ultrazvukem nebo rentgenem. Cílem zkoušek je odhalení vnitřních vad (trhliny a staženiny) a případné vyřazení zmetků.

Cena:

Předběžně stanovená cena za jeden zub je 835 Kč.

[31]

13. Závěr

Cílem první části experimentu bylo připravit vzorky z doposud používaného zubu na korečku velkorypadla KU 800, následně je analyzovat a vyhodnotit, zda jsou vyhovující či nikoli.

Firma Vršanská uhelná a.s. poskytla hned několik vzorků v podobě celých zubů z materiálu pod interním označením VP7 a požadovaným chemickým složením. Na základě výsledků analýzy chemických prvků bylo možné konstatovat, že tři z pěti vzorků obsahovaly deklarované množství legujících prvků. Zbylé dva vzorky obsahovaly více uhlíku a jiné prvky, např. Al, Ni, P, S, Ti, W, Zn, zastoupeny nebyly. Při následné zkoušce vrubové houževnatosti materiál VP7 vykazoval příliš nízké hodnoty, tudíž by při těžbě došlo k ulamování zubů. Navíc v průběhu testování byla na jednom ze vzorků nalezena metalurgická vada, tím pádem byl celý zub klasifikován jako zmetkový kus. Celkové zhodnocení výsledků ukazuje, že dosud používaný typ oceli není příliš vhodný pro výrobu zubů korečků.

Cílem druhé části experimentu bylo navrhnout nové materiálové řešení pro výrobu zubů korečku a provést analýzu na zhotovených vzorcích.

Novým materiálem byla zvolena Hadfieldova ocel, která v závislosti na dodavateli byla nahrazena manganovou ocelí s vyšším obsahem chromu. Alternativní ocel měla oproti Hadfieldovy oceli vyšší obsah chromu a molybdenu, nicméně si zachovala nejpodstatnější vlastnost – schopnost transformovat austenit na martenzit vlivem mechanického namáhání. Vzorky z navrženého materiálu byly dodány firmou UNEX a.s. a následně podrobeny simulačním procesům. Zkoumání mikrostruktury po mechanickém namáhání prokázalo přeměnu austenitu na martenzit v hloubce od 90–428 μm v závislosti na způsobu namáhání. U konkrétního kusu testovaného zubu byla opět nalezena metalurgická vada a zub byl vyhodnocen jako zmetkový. Pro eliminaci vnitřních vad bude zapotřebí zdokonalit technologii odlévání zubu a celkový výsledek otestovat v provozu. Této problematice by se mohla věnovat další etapa výzkumu, případně navazující práce.

14. Seznamy

14.1. Seznam použité literatury

- [1] Těžba hnědého uhlí. 7.cz [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z:
<http://www.7.cz/cz/uhli/tezba.html>
- [2] Těžební technika. Unex.cz [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z:
<http://www.unex.cz/cs/tezebni-technika/dulni-zarizeni>
- [3] DOUBEK, Petr. Životnost nástrojů pro zpracování půdy [online]. Brno, 2006 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z:
http://is.mendelu.cz/zp/portal_zp.pl?prehled=vyhledavani;podrobnosti=14894;download_prace=1. Bakalářská práce. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Josef Filípek, CSc.
- [4] UNEX. Koreček.
- [5] Spraš. Geologická encyklopedie [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z:
<http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?spras>
- [6] Jíly a jílovce. Katedra geologického inženýrství VŠB [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/nerudy/j%C3%ADly.html>
- [7] MOHYLA, Miroslav. Strojírenské materiály I. 2. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2003. ISBN 80-248-0270-8.
- [8] STODOLA, Jiří, Františka PEŠLOVÁ a Jan KRMELA. Opotřebení strojních součástí: monografie. Brno: Univerzita obrany, 2008. ISBN 978-80-7231-552-9.
- [9] SUCHÁNEK, Jan. Abrázivní opotřebení kovových materiálů. Tribotechnika [online]. TechPark [cit. 2018-05-16]. Dostupné z:
<http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12010/abrazivni-opotrebeni-kovovych-materialu.html>
- [10] SUCHÁNEK, Jan, Vladimír KUKLÍK a Eva ZDRAVECKÁ. Abrázivní opotřebení materiálů. Praha: České vysoké učení technické, 2007. ISBN 978-80-01-03659-4.
- [11] Abrasive wear. Onyx In Sight [online]. [cit. 2018-07-13]. Dostupné z:
onyxinsight.com/failure-atlas/bearing-failures/abrasive-wear

- [12] POŠTA, Josef, Milan DVORČÁK a Petr VESELÝ. Degradace strojních součástí: monografie. V Praze: Česká zemědělská univerzita, Technická fakulta, 2002. ISBN 80-213-0967-9.
- [13] GNECCO, Enrico a Ernst MEYER. Fundamentals of friction and wear on the nanoscale [online]. Berlin: Springer, 2007 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/225845142_Surface-Damage_Mechanisms_from_Nano-_and_Microcontacts_to_Wear_of_Materials?_sg=QteUNOmatAd33kUwawRmEi-ReA6Af2JFpv9KOrVBMVuKQsKxJp0aG-0whIb5AXf0wYLMblhDyA
- [14] PES [online]. [cit. 2018-07-13]. Dostupné z: <http://blog.pes-solutions.com/pes-201-boat-propeller-cavitation-and-repair/>
- [15] KRÁSENKÝ, J., J. RYPLOVÁ a L. TÁJEK. Kavítace [online]. Praha 1 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2012-2013/Zima12/proc/kavitace.pdf>. Příspěvek. ČVUT, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská.
- [16] Vývoj únavového poškození povrchu ložisek v místě valivého styku. Evolution [online]. [cit. 2018-07-13]. Dostupné z: <http://evolution.skf.com/cs/vyvoj-unavoveho-poskozeni-povrchu-lozisek-v-miste-valiveho-styku/>
- [17] ČERVENÝ, Jaroslav a Viktor KREIBICH. Koróze v potrubních systémech. Tlakinfo [online]. 14.9.2011 [cit. 2018-07-13]. Dostupné z: <http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2&i=1827>
- [18] Jaký je rozdíl mezi druhy opotřebení?. E-konstrukter [online]. 15.03. 2016 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/novinka/jaky-je-rozdil-mez-i-druhy-opotrebeni>
- [19] Žárové stříkání. Plasmametal [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.plasmametal.cz/pouzite-technologie>
- [20] IVANIŠOVÁ, Klára. Návrh technologie broušení HVOF nástřiku na dílech lisovacích nástrojů [online]. Praha, 2015 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/63675>. Bakalářská práce. ČVUT, Fakulta Strojní. Vedoucí práce Ing. Jiří Kyncl.
- [21] AMBROŽ, Oldřich a Jiří KAŠPAR. Žárové nástřiky a jejich průmyslové využití. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-03-00347-4.

- [22] DAVIS, Joseph. Handbook of thermal spray technology. Materials Park, OH: ASM International, 2004. ISBN 0871707950.
- [23] PETELOVÁ, Kristýna. Termické nástřiky aplikované pro zvýšení odolnosti proti opotřebení [online]. Praha, 2015 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/63414>. ČVUT, Fakulta strojní. Vedoucí práce Jan Suchánek.
- [24] Ochrana proti opotřebení otěrem. Renomag [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.renomag.cz/s72231-ochrana-proti-opotrebeni-oterem>
- [25] HARDOX wear resistant plates. Qtic [online]. [cit. 2018-07-13]. Dostupné z: <http://www.qtic.com/hardox-wear-resistant-plates/>
- [26] HARDOX. SSAB [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.ssab.com/products/brands/hardox>
- [27] LIŠKA, Jaromír. Degradace strojírenských materiálů opotřebením [online]. Brno, 2012 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/38101990-Degradace-strojirenskych-materialu-opotrebenim-disertacni-prace.html>. Disertační práce. Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta. Vedoucí práce Josef Filípek.
- [28] VOREL, Ivan. Ověření možnosti nekonvenční výroby otěruvzdorné Mn oceli [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/8627/1/DP2013_IVAN%20VOREL_S11NO099P.pdf. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní. Vedoucí práce Miroslav Hála
- [29] FREMUNT, Přemysl a Tomáš PODRÁBSKÝ. Konstrukční oceli. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1996. ISBN 80-858-6795-8.
- [30] DAVIS, J. R. Alloying: understanding the basics. Materials Park, OH: ASM International, 2001. ISBN 9780871707444.
- [31] MICHNA, Štefan a Jaromír CAIS. Souhrnná výzkumná zpráva z projektu "Nové materiálové řešení zubů pro korečky na důlním rýpadle" pro Vršanská uhelná a.s. Ústí nad Labem, 2013.
- [32] SOBOTOVÁ, Jana, Elena ČIŽMÁROVÁ, Zdeňka JENÍKOVÁ a Jakub HORNÍK. Nauka o materiálu I. a II.: cvičení. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2

14.2. Seznam obrázků

Obrázek 1: koreček rypadla KU 800 [4]	11
Obrázek 2: abrazivní opotřebení [11]	14
Obrázek 3: adhezivní opotřebení [13]	15
Obrázek 4: erozivní opotřebení [12]	16
Obrázek 5: kavitační opotřebení [8]	17
Obrázek 6: kavitace na lopatkách lodního šroubu [14]	17
Obrázek 7: únavové opotřebení valivých ložisek [16]	18
Obrázek 8: vibrační opotřebení [12]	19
Obrázek 9: koroze [17]	21
Obrázek 10: proces žárového stříkání [19]	22
Obrázek 11: žárové stříkání plamenem [19]	22
Obrázek 12: žárové stříkání – vysokorychlostní stříkání plamenem [19]	23
Obrázek 13: nakladač – ochrana pomocí pinů a VIDA prvků Renomag [24]	24
Obrázek 14: plech HARDOX 450 [25]	24
Obrázek 15: vzorek A – vyměnitelný zub, nový nepoužitý [31]	30
Obrázek 16: vzorek B – vyměnitelný zub, starý opotřeбенý [31]	30
Obrázek 17: vnitřní vada u vzorku A [31]	31
Obrázek 18: umístění vady u vzorku A [31]	32
Obrázek 19: makrostruktura vzorku A s vadou [31]	32
Obrázek 20: zvýšená porezita v okolí dutiny [31]	33
Obrázek 21: zvýšená porezita v okolí dutiny [31]	33
Obrázek 22: výskyt většího počtů vměstků v okolí dutiny (označeno šipkou) [31]	34
Obrázek 23: výskyt většího počtů vměstků v okolí dutiny (označeno šipkou) [31]	34
Obrázek 24: výskyt vměstků v okolí dutiny (označeno šipkami) [31]	35
Obrázek 25: výskyt vměstků v okolí dutiny (označeno šipkou) [31]	35
Obrázek 26: mikrostruktura vzorku A [31]	36
Obrázek 27: mikrostruktura vzorku B [31]	36
Obrázek 28: mikrostruktura vzorku A [31]	37
Obrázek 29: mikrostruktura vzorku A [31]	37
Obrázek 30: struktura manganové austenitické oceli 17 618 (zvětšení 200x) [31]	39

Obrázek 31: struktura manganové austenitické oceli 17 618 vystavena tlaku, kde je patrná částečná přeměna austenitu na martenzit (zvětšení 200x) [31]	40
Obrázek 32: nový zub od společnosti UNEX a.s. [31]	41
Obrázek 33: nový zub od společnosti UNEX a.s. [31]	41
Obrázek 34: dělení zubu na jednotlivé segmenty [31]	42
Obrázek 35: metalurgická vada ve středové čísti zubu [31]	42
Obrázek 36: mikrostruktura mimo oblast mechanického namáhání [31]	43
Obrázek 37: mikrostruktura mimo oblast mechanického namáhání – detail [31]	44
Obrázek 38: mikrostruktura v oblasti mechanického namáhání na povrchu [31]	44
Obrázek 39: mikrostruktura v oblasti mechanického namáhání na povrchu [31]	45
Obrázek 40: mikrostruktura mimo oblast mechanického namáhání [31]	46
Obrázek 41: mikrostruktura mimo oblast mechanického namáhání [31]	46
Obrázek 42: mikrostruktura v oblasti mechanického namáhání na povrchu [31]	47
Obrázek 43: mikrostruktura v oblasti mechanického namáhání na povrchu [31]	47

14.1. Seznam tabulek

Tabulka 1: podíl jednotlivých prvků v hmot. % [31]	28
Tabulka 2: chemické složení oceli VP7 [31]	29
Tabulka 3: hodnoty vrubové houževnatosti vzorků A, B [31]	31

14.2. Seznam použitých zkratk a symbolů

Označení	Název	Jednotka
Al	hliník	-
B	bor	-
C	uhlík	-
C _{ekv}	uhlíkový ekvivalent	-
Cr	chrom	-
Cu	měď	-
č.v.	číslo výrobku	-
G	hmotnost kladiva	[kg]
H	počáteční výška kladiva	[m]
h	maximální dosažená výška kladiva	[m]
HB	tvrdost dle Brinella	-
hm. %	hmotnostní procento	-
HV	tvrdost dle Vickerse	-
K	absorbovaná energie	[J]
KC	vrubová houževnatost	[J/cm ²]
KCU	vrubová houževnatost měřená na vzorku s vrubem ve tvaru písmene U	[J/cm ²]
KCV	vrubová houževnatost měřená na vzorku s vrubem ve tvaru písmene V	[J/cm ²]
Mn	mangan	-
Mo	molybden	-
Ni	nikl	-
P	fosfor	-
S ₀	plocha příčného průřezu	[mm ²]
Si	křemík	-
T	teplota	°C
Ti	titan	-
V	vanad	-
W	wolfram	-
Zr	zirkonium	-