

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie

**STUDIUM DEGRADAČNÍCH PROCESŮ NA
NÁVARECH PŘI INTERAKCI S TVRDÝMI
ČÁSTICEMI**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor: Bc. Tomáš Panáček

Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Vedoucí práce: prof. Ing. Jan Suchánek, CSc.

Praha 2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro Bc. Tomáše Panáčka

Program: Strojní inženýrství

Obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Název: Studium degračních procesů na návarech při interakci s tvrdými částicemi

Název anglicky: Study of degradation processes of overlays during interaction with hard particles

Zásady pro vypracování

1. Přehled současných představ o mechanismech abrazivního opotřebení
2. Stavba přístroje s pryžovým kotoučem
3. Zkoušky vybraných návarových materiálů v podmínkách abrazivního opotřebení
4. Studium morfologie povrchu po zkoušce abrazivního opotřebení
5. Mikrostrukturní změny v povrchových vrstvách opotřebovaných návarů

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

Bc. Tomáš Panáček

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval mému vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Janu Suchánkovi, CSc. a konzultantovi Ing. Pavlu Rohanovi, Ph.D. za pomoc a odborné rady při realizaci praktické části a vypracování této diplomové práce.

Tomáš Panáček

Počet stran: 75

Počet obrázků: 57

Počet tabulek: 17

Počet grafů: 1

Anotace

Degradační procesy zahrnují širokou škálu případů znehodnocování kovových i nekovových materiálů a jejich studiu je věnována velká pozornost. Jedním z nejvíce studovaných oblastí je abrazivní opotřebení kovových součástí. Tyto součásti jsou využívány při těžbě nerostných surovin, v zemědělství a dalších oblastech, kde se dostávají do kontaktu s abrazivními částicemi, které narušují jejich povrch.

Cílem práce je popsat současné představy o mechanismech abrazivního opotřebení a faktory, které hrají důležitou roli v těchto procesech. Dále se práce zabývá stavbou přístroje s pryžovým kotoučem v souladu s normou ASTM G65 – 04(2010), kde se modelují podmínky interakce tvrdých částic s povrchem materiálů pomocí tří bodové abraze. Následující část se věnuje navařování dvou typů slitin a předmětem výzkumu bude snaha provést navařování při různé rychlosti ochlazování a tím ovlivnit jejich krystalickou strukturu, která by měla vykazovat větší odolnost proti abrazivnímu opotřebení, jež bude zkoušena na výše zmíněném přístroji s pryžovým kotoučem. Konečným výstupem práce bude zhodnocení, v jaké míře se odolnost proti abrazivnímu opotřebení projevila a co tuto vlastnost ovlivnilo s vyhodnocením makro a mikrostruktury slitin.

Klíčová slova: degradační procesy, abraze, modely abrazivního opotřebení, opotřebení součástí, tvrdonávarové slitiny, navařování, přístroj s pryžovým kotoučem.

Abstract

Degradation processes include a wide variety of cases of degradation of metal and non-metal component wear and their further study is important area of research. One of the most researched areas is the abrasive wear of metal parts. These components are used in mining, agriculture and other areas, where they come in contact with abrasive particles, which disturb their surface.

The aim of this thesis is to describe the current ideas about mechanisms of abrasive wear and which factors play an important role in these processes. Furthermore, the thesis deals with the construction of the device with a rubber blade (in accordance to ASTM G65), which models the conditions of interaction of hard particles with the surface of materials by three-point abrasion. The research will then focus on welding during different cooling rates and how this affects the alloy's structure, which is expected to be more resistant to abrasive wear. The outcome of the thesis will be the evaluation of the change of resistance to abrasive wear in tested alloy, what influenced this change and how this affected the macro and microstructure of the alloy.

Keywords: degradation processes, abrazion, models of abrasion wear, component wear, hardfacing alloys, renovarion of hard surfacing

Obsah

1. Úvod	11
2. Přehled současných představ o mechanizmech abrazivního opotřebení	11
2.1 Charakterizace abrazivního opotřebení	11
2.2 Modely abrazivního opotřebení kovových materiálů	12
2.3 Důležité parametry při abrazivním opotřebení	15
3. Mineralogické vlastnosti abrazivních částic	16
3.1 Tvrdost	16
3.2 Tvar	18
3.3 Zrnitost	18
3.4 Houževnatost	19
3.5 Štěpitelnost	19
4. Rozdělení abrazivního opotřebení podle intenzity jejich působení	19
4.1 Málo intenzivní abrazivní opotřebení	20
4.2 Středně intenzivní abrazivní opotřebení	20
4.3 Velmi intenzivní abrazivní opotřebení	20
5. Vliv strukturních faktorů na procesy abrazivního porušování	21
5.1 Vliv tvrdých strukturních složek na procesy porušování kovových materiálů proti abrazi	21
5.2 Vliv matrice na odolnost proti na procesy porušování kovových materiálů proti abrazi ..	23
5.3 Vliv kluzné rychlosti na abrazivní opotřebení	25
5.4 Vliv doby provozu	25

5.5 Vliv zatížení	25
6. Přístroje pro zkoušky abrazivního opotřebení	26
6.1 Přístroje s vázanými částicemi.	26
6.2 Přístroje s volnými částicemi	27
6.3 Přístroje s vrstvou volných částic mezi stykovými povrchy	28
6.4 Zařízení modelující procesy abraze v reálných podmínkách provozu	28
6.5 Etalony používané ke zkouškám abrazivního opotřebení kovových materiálů	29
7. Zkoušené materiály	29
8. Hodnocení abrazivního opotřebení	30
9. Popis konstrukce zařízení s pryžovým kotoučem	31
10. Vliv parametrů navařování na promísení se základním materiálem	34
11. Provedení návarů	35
11.1 Úprava vzorků pro zkoušku abrazivního opotřebení	40
12. Zkouška odolnosti proti abrazi na přístroji s pryžovým kotoučem	41
13. Mikrostrukturní změny v povrchových vrstvách opotřebených návarů	44
13.1 Morfologie povrchu	44
13.2 Makrostruktura vzorků.....	47
14. Makrotvrdost	51
15. Mikrostruktura vzorků	52
16. Zhodnocení experimentu	67
17. Závěr	68
18. Použitá literatura	69
19. Seznam obrázků	71

20. Seznam tabulek 73

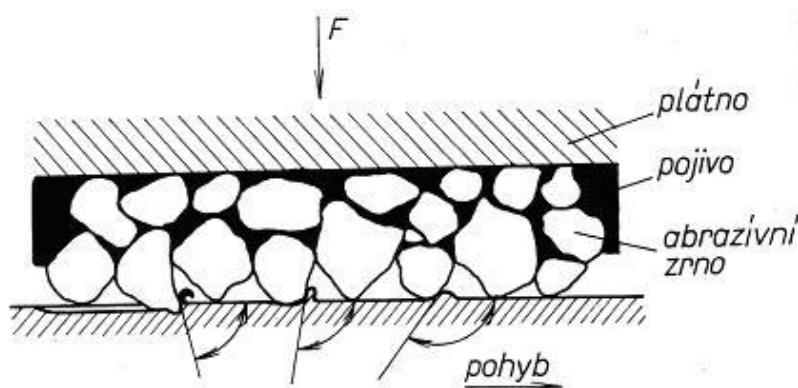
1. Úvod

Jednou z možností jak ještě více zlepšit funkční vlastnosti otěruvzdorných povrchů při navařování, je ovlivnit jejich krystalickou strukturu řízenou rychlostí ochlazování. Tato změna rychlosti odvodu tepla z materiálu má za následek zvýšení odolnosti proti opotřebení. Cílem práce je zjistit závislost mezi rychlostí ochlazování, makrotvrdostí a relativním úběrem materiálu bez řízené rychlosti ochlazování a řízenou rychlostí ochlazování a naměřené hodnoty mezi sebou porovnat. Odolnost proti opotřebení bude realizována na přístroji s rotujícím pryžovým kotoučem sestaveným pod záštitou ČVUT v Praze a jeho výroba je také součástí práce. Přínosem práce je prokázání zvýšení odolnosti proti opotřebení vzorků, které byly podrobeny vyšší rychlosti ochlazování po navařování a s možným použitím naměřených výsledků jako podklad pro aplikaci návarů na reálné součásti, které jsou vystaveny abrazivnímu opotřebení s cílem prodloužení jejich životnosti za současného snížení nákladů na případné renovace povrchu, které by nastaly mnohem dříve nebo možná aplikace této technologie již při výrobě nového dílce.

2. Přehled současných představ o mechanizmech abrazivního opotřebení [1], [2], [10]

2.1 Charakterizace abrazivního opotřebení

Opotřebení je nežádoucí změna povrchu nebo rozměrů tuhých těles, způsobená buď vzájemným působením funkčních povrchů, nebo funkčního povrchu a média. Projevuje se jako odstraňování nebo přemísťování částic hmoty z funkčního povrchu mechanickými účinky, popřípadě doprovázenými i jinými vlivy (např. chemickými, elektrochemickými nebo elektrickými). (Definice podle ČSN 01 5050) [5]



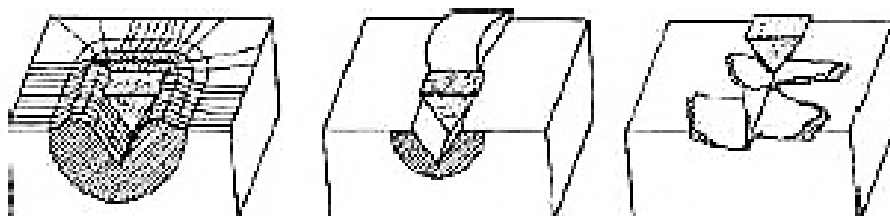
Obr. 1 Působení pevně vázaných abrazivních částic na opotřebovávaný povrch [5]

Rozlišuje se šest základních druhů opotřebení: adhezivní, abrazivní, erozivní, kavitační, vibrační a únavové. V praxi, při provozních podmínkách většinou nastává kombinace mezi jednotlivými typy opotřebení. Na základě dlouhodobého pozorování bylo zjištěno, že v 50 % případů poruch zařízení vlivem opotřebení, bylo způsobeno abrazí. [5] [10]

2.2 Modely abrazivního opotřebení kovových materiálů

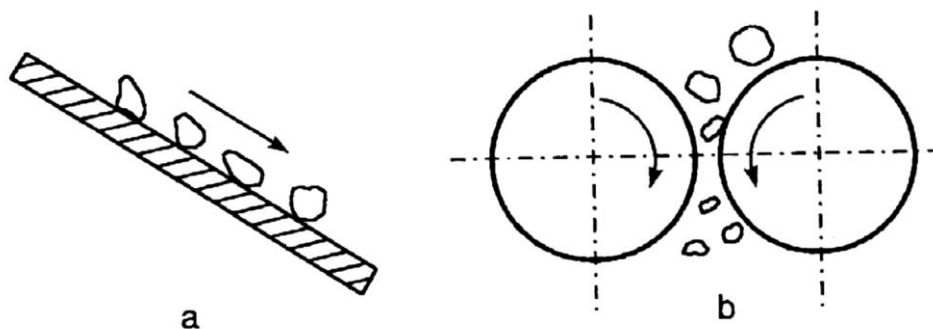
Existují dva základní principy abrazivního opotřebení:

1. Oddělováním a přemísťováním částic materiálu při rýhování a řezání tvrdými částicemi, které mohou být při interakci s opotřebovávaným tělesem volné (křemenný písek) nebo vázané (brusné plátno). Před částicí se vytváří nárůstek a materiál je kontinuálně vytlačován do boků a vytváří valy kolem rýhy. Teoreticky nedochází k přenosu materiálu a ani se nevytváří částice otěru. Nejspíše je vzniklý otěr způsoben delaminačním mechanismem když dojde k vyčerpání deformační schopnosti povrchových vrstev materiálu.
2. Druhý případ se vyznačuje přítomností tvrdých částic mezi dvěma funkčními povrchy, které jsou v relativním pohybu. Tvorba rýh je spojena s odstraňováním materiálu z povrchu mikro řezáním až do stavů úplného oddělení třísky z rýhy základního materiálu bez tvorby postranních valů. Rovněž se může vyskytnout případ, kdy částice vzniklé adhezivním opotřebením způsobují následně opotřebení abrazivní.



Obr. 2 Typické případy během abrazivního opotřebení zleva rýhování, mikrořezání a mikrořezání s tvorbou mikrotrhlin [7]

Abrazivní opotřebení (two-body abrasion), které vzniká silovým působením abraziva na opotřebovávaný povrch, kdy jako příklad je uveden pluh rozrušující zeminu (částice abraziva + pluh) způsobuje poměrný otěr o jeden až tři řády vyšší než abraze s mezivrstvou částic mezi dvěma povrchy (three-body abrasion), což je např. ložisko, kde jsou částice abraziva mezi stykovými plochami čepu a vnějšího kroužku (čep + vnější kroužek + částice abraziva) při stejném zatížení. Ze všech typů opotřebení, která se vyskytují u strojních součástí, zabírá abraze 50 % z celkového množství poruch zařízení.



Obr. 3 a) dvoubodové abrazivní opotřebení, b) třibodové abrazivní opotřebení [12]

Pro abrazi kovů, který je považován jako plastický materiál, se v současné době uplatňuje modelová situace dvou těles, kdy pevně vázané tvrdé částice nebo nerovnosti povrchu vnikají do povrchu. Při relativním pohybu částic a měkčího opotřebovávaného povrchu kovu ho rýhují při možném vzniku oddělování třísek kovu.

V reálných podmínkách a na různých místech opotřebovávaného povrchu houževnatého materiálu může nastat situace, kdy dojde zároveň k porušování jeho povrchových vrstev:

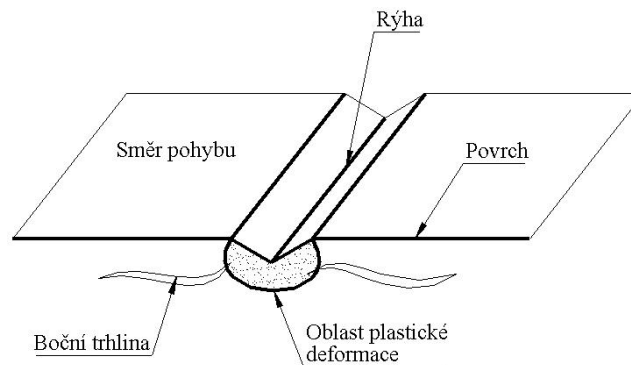
- a) vysokocyklovým kontaktním únavovým procesem, kdy částice působícího abraziva nevnikají do povrchu, ale způsobují pouze elastické deformace
- b) nízkocyklovým únavovým procesem, kdy při plastické deformaci částice vnikají do povrchu
- c) rýhováním spolu s oddělováním částic opotřebovávaného materiálu

Při vyšších rychlostech relativního pohybu abrazivních částic a opotřebovávaného materiálu, je nutné brát v potaz i další degradační mechanismy, které tímto procesem vznikají. Mezi ně patří tepelné ovlivnění materiálu např. popuštění oceli, adsorbční porušování (reakce opotřebovávaného materiálu s povrchově aktivními látkami snižující povrchovou tvrdost) nebo tribochemické reakce opotřebovávaného materiálu s okolním prostředím.

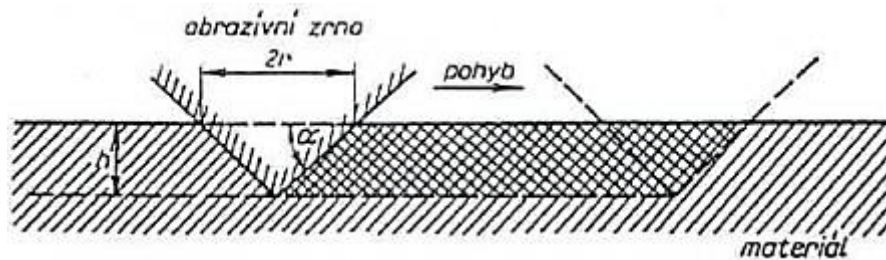
Při abrazivním opotřebení houževnatých materiálů může nastat porušování křehkým lomem a následně ovlivňovat tvorbu třísek a částice otěru. Tato porucha pravděpodobně nastane těsně za abrazivní částicí, kvůli působení tahového napětí.

Typ porušení u křehkých materiálů v situaci, kdy hrot vniká do povrchu, závisí na působícím zatížení, na tvaru hrotu a na tom, zda hrot klouže po povrchu nebo působí staticky a na okolním prostředí. Z toho vyplývá, že odstraňování materiálu dochází spíše křehkým lomem než plastickou deformací. Rovněž při abrazi heterogenních materiálů, které obsahují křehké

a houževnaté fáze může nastat porušování křehkým lomem. Převládající mechanismus odstraňování bude záviset na vlastnostech jednotlivých fází a na jejich objemovém podílu.



Obr. 4 Schématické zobrazení tvorby otěru u křehkého materiálu šířením bočních trhlin z dolních partií plasticky deformované oblasti pod rýhou podle Evanse [2]



Obr. 5 Zjednodušený model interakce abrazivní částice s opotřebovávaným povrchem podle Rabinowicze. Při pohybu kužele po dráze 1 se odstraní objem materiálu [2]

Zjednodušený model abrazivního opotřebení kuželovou nerovností popsal Rabinowicz. Pro rovnováhu sil na obr. 2 platí vztah:

$$F = p_m r^2 \quad (1)$$

p_m - tvrdost povrchu, která ve smyslu tlaku potřebného k dosažení plasticity povrchových vrstev materiálu

r - poloměr vtisku v úrovni původního povrchu

Celkový objem materiálu W_0 , který se odstraní, je závislý na množství částic, které způsobují abrazivní otěr a k tomu s různým úhlem α částice. Hodnota p_m není konstantní a mění se s úhlem α .

$$dW_0 = r \cdot h \cdot dl = \frac{F \cdot \tan \alpha}{p_m \cdot \pi} dl \quad (2)$$

$$W_0 = K_{abr} \cdot \frac{F \cdot l}{p_m} \quad (3)$$

K_{abr} - průměrný tangent všech abrazivních částic v daném případě. Obvyklé hodnoty K_{abr} jsou v rozmezí $2 \cdot 10^{-1} \div 2 \cdot 10^{-2}$ podle Rabinowicze.

h - hloubka vniku nerovnosti tvrdého tělesa

R – poloměr vnikající nerovnosti

Deformace povrchu materiálu závisí na poměru h/R . Pružné deformace vznikají při $h/R = 0,01 \div 0,0001$, plastické deformace při $h/R = 0,1 \div 0,2$ a rýhování při $h/R > 0,1 \div 0,2$.

2.3 Důležité parametry při abrazivním opotřebení

1. První parametr se týká vlastností opotřebované součásti při abrazi, mezi ně patří tvrdost v jádře, povrchová tvrdost, tvrdost deformované struktury a mikrostruktura, kde hraje roli velikost zrna, jeho tvar a velikost a orientace tvrdší fáze.
2. Abrazivo. U něj je významná tvrdost, geometrie nerovností/částice což je velikost, tvar a orientace. Dále rozdělení nerovností/částice jako jsou hustota, výšky a prostor pro částice otěru.
3. Parametry dotyku. Mezi ně patří zatížení, nominální dotyková plocha, relativní rychlost, prostředí (vzduch, voda, mazivo, teplota) a orientace systému, čímž je myšleno odstraňování částic abraziva i otěru z dotykové plochy).
4. Výsledné parametry po opotřebení, kde je na prvním místě poměrný otěr, dále koeficient opotřebení, koeficient tření, koeficient odstraňování, specifická energie, topografie povrchu a průběh tvrdosti do hloubky opotřebovaného materiálu.

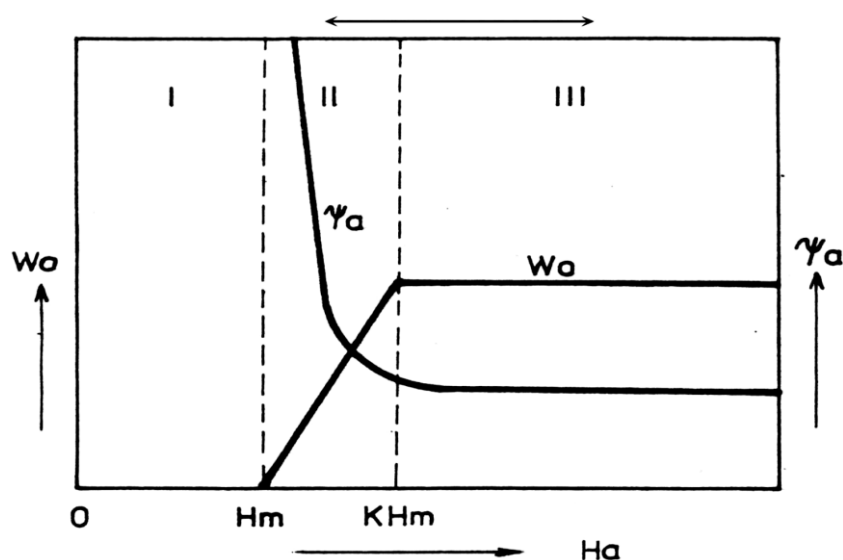
3. Mineralogické vlastnosti abrazivních částic [1], [2], [7], [10]

Abrazivita je definovaná jako schopnost brusných částic opotřebovat funkční povrch kovového materiálu.

V praktickém nasazení strojů a strojních zařízení, se setkáváme s přírodními materiály, kde je obvykle nejtvrdší složkou SiO_2 (1000 HV). Proto vysokou odolnost proti opotřebení budou mít materiály s tvrdostí 500 - 770 HV. Laboratorní experimenty ukázaly, že ani oceli s vysokým podílem velmi tvrdých komplexních a speciálních karbidů nemají konstantní hodnoty poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení. Intenzivní abrazivní oťer závisí výrazně na mineralogických vlastnostech abraziva. Významnou úlohu mají tvrdost, tvar jednotlivých zrn (makro a mikrogeometrie), zrnitost, štěpitelnost a houževnatost. [1] [2]

3.1 Tvrdost

Oťer opotřebovávaného materiálu je úměrný přitlačné síle a délce dráhy, na které dochází k působení abraziva a nepřímo úměrný tvrdosti opotřebovávaného materiálu. Je-li tvrdost kovového materiálu H_m značně menší než tvrdost abraziva H_a , pak je odolnost proti abrazivnímu opotřebení malá. S růstem tvrdosti opotřebovávaného kovového materiálu roste odolnost proti opotřebení a je největší když dosáhne hodnoty $H_a = kH_m$. Hodnota koeficientu k se pohybuje podle Chruščova v rozmezí 1.3 - 1.7 a podle Tenenbauma v rozmezí 1.6 - 2.0.



Obr. 6 Vliv poměru tvrdosti abraziva H_a a tvrdosti opotřebovávaného materiálu H_m na objemový oťer W_o a poměrovou odolnost proti abrazivnímu opotřebení ψ_a [10]

Tab. 1 Porovnání tvrdostí vybraných abraziv a kovových materiálů [5]

Materiál	Tvrdość (HV)	Kovový materiál	Tvrdość (HV)
vápenec	110	železo Armco	90
sklo	500	žíhané oceli	100 - 250
živec	600 - 750	perlitická ocel	230 - 350
křemen	900 - 1280	ocel pro valivá ložiska	700 - 950
WC	1900	nástrojové oceli	700 - 1000
korund	2000	cementovaná ocel	900
TiC	2450	nitridovaná ocel	900 - 1250
SiC	2500	WC+Co	1400 - 1800

Tab. 2 Poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení vybraných ocelí a litin (zkoušeno na přístroji s brusným plátnem podle bývalé ČSN 01 5084) [5]

Opotřebovávaný materiál	Tvrdość (HV)	Poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení ψ_a [-]
ocel 12 014 (žíhaná) - ferit	95 - 105	1,0
ocel 12 020 (žíhaná) - ferit + perlit	152	1,2
ocel 12 050 (žíhaná) - ferit + perlit	195 - 205	1,32
ocel 19 152 (žíhaná na měkko) - perlit	167	1,19
ocel 12 050 (kalená) - martenzit	789	1,96
ocel 19152 (kalená) - martenzit	865	2,57
ocel 19 255 (kalená) - martenzit + cementit	750	1,89
ocel 19 436 (kalená) - martenzit + austenit + karbidy M_7C_3	876	3,85
ocel 42 2920 (aust. žíhaná) - austenit	260	1,59
bílá chromová litina Cr15Mo2 (kaleno) -	67.1 HRC	4,01

martenzit + austenit + karbidy M_7C_3		
nástřík K50	488 - 583	2,30
návar OTS 517	760	2,96

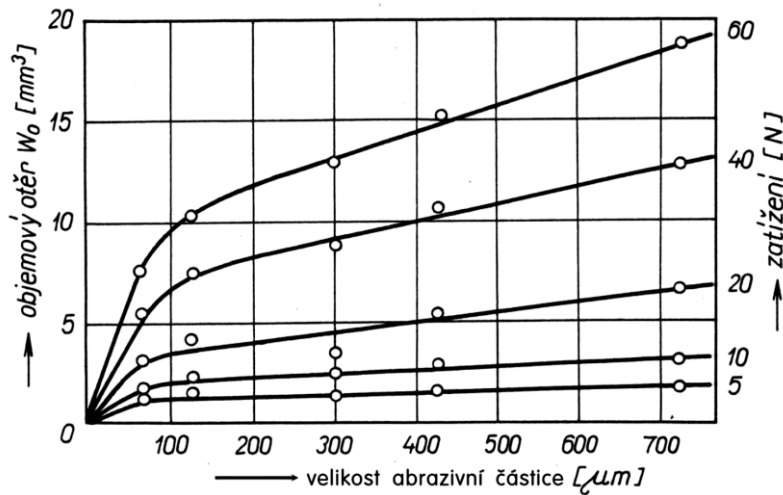
3.2 Tvar

V zásadě platí pravidlo, že čím více bude mít částice odlišný tvar od kulového, tím více bude povrch opotřebovávaného tělesa rýhovat a oddělovat jeho materiál při jejich vzájemném pohybu. Zároveň bude více docházet k otupování částic vlivem vylamování jejich hran. Z hlediska abrazivních účinků můžeme kvantitativně i kvalitativně popsat jejich tvar a zaměřit se na: [1] [10]

1. Makrogeometrii, což je množství hran či výstupků
2. Mikrogeometrii, popisující hladkost povrchu hran nebo výstupků
3. Poloměr výstupků

3.3 Zrnitost

Experimentálním studiem se ukázalo, že existuje určitá kritická velikost abrazivních částic. S růstem velikosti jednotlivých částic od menších po částice s většími rozměry intenzita abrazivního otěru výrazně roste až do určité hodnoty. Po dosažení kritické velikosti se intenzita abrazivního otěru výrazně zpomaluje, ale neustále roste. Tato kritická hranice je závislá na zatížení, rozměrech opotřebované plochy, typu částic a vlastnostech opotřebovávaného materiálu.



Obr. 7 Objemový otěr žíhané nízkouhlikové oceli v závislosti na velikosti abrazivních částic a zatížení [10]

3.4 Houževnatost

Při malém zatížení zrn, se téměř nemění jejich průměrná velikost, ale mění se jejich mikrogeometrie. Při větším zatížení dochází k většímu porušování zrn a to k jejich fragmentaci, což do určité míry kompenzuje větší otupování výstupků a hran. To má za následek, že i při větším silovém zatížení není pokles abrazivity částic výrazně větší.

3.5 Štěpitelnost

Vyjadřuje schopnost jednotlivých abrazivních zrn se rozrušovat vlivem působícího zatížení a vytvářet nové řezné hrany. Při vysokých zatížení u dobře štěpitelných minerálů v podstatě štěpitelnost tolik neklesá, protože se zároveň vytvářejí nové řezné hrany.

4. Rozdělení abrazivního opotřebení podle intenzity jejich působení

Dle intenzity abrazivního opotřebení kovových materiálů je lze rozdělit následujícím způsobem:

4.1 Málo intenzivní abrazivní opotřebení

„Nejčastěji se jedná o abrazi sypkými materiály nebo málo pevnými částicemi při malých rychlostech pohybu. Obvyklé řešení je použití ocelových plechů nebo profilů bez tepelného zpracování. Zvýšit životnost lze použitím oceli s vyšší pevností (např. plechy z oceli Hardox 500) nebo přechodem na materiál s vyšší odolností proti abrazivnímu opotřebení (např. litiny nebo obklady z taveného čediče, korundu apod.). Zcela nevhodné je použití austenitické manganové oceli, protože při málo intenzivním silovém účinku abrazivních částic nedochází k dostatečnému zpevnění povrchové vrstvy. Tyto oceli v podmínkách kluzné abraze nemají dostatečnou odolnost.“ [5]

4.2 Středně intenzivní abrazivní opotřebení

„Tento typ opotřebení je typický pro různé mlýny používané pro dezintegraci abrazivních materiálů, pro stroje pracující při těžbě, dopravě a zpracování zemin a různých stavebních či keramických materiálů. Vlivem silového působení mezi abrazivem a funkčními plochami součástí dochází obvykle k intenzivnímu zpevňování povrchové vrstvy materiálu a k růstu makropnutí. Snížení abrazivního opotřebení lze dosáhnout zvýšením pevnosti použitím vysokopevnostních ocelí nebo použitím heterogenních materiálů s vysokou pevností základní hmoty a tvrdými karbidy (otěruvzdorné bílé litiny, legované nástrojové oceli a pod.). Při silném rázovém namáhání vzrůstá nebezpečí porušování povrchových vrstev růstem vnitřních pnutí, zejména při rozpadu zbytkového austenitu v některých ocelích a litinách.“ [5]

4.3 Velmi intenzivní abrazivní opotřebení.

„Jde zejména o drcení tvrdých hmot a nerostných surovin, přičemž se dosahují na funkčních površích maximální silové účinky. S ohledem na požadovanou provozní bezpečnost se na výrobu rozměrných součástí drtičů a mlýnů používá nejčastěji velmi houževnatá manganová austenitická ocel a její modifikace. Tato ocel při velkém silovém zatížení zpevňuje do hloubky až několika mm v důsledku strukturálních změn a dobře odolává opotřebení abrazivními materiály. Některé případy intenzivní abraze při zpracování hornin a nerostných surovin se řeší nástrojovými ocelmi zušlechtěnými na velkou tvrdost, případně použitím vložek ze slinutých karbidů připájených na základní materiál o dostatečné pevnosti a houževnatosti (rotační dláta, vrtací korunky).“ [5]

5. Vliv strukturních faktorů na procesy abrazivního porušování

[1], [2], [15]

5.1 Vliv tvrdých strukturních složek na procesy porušování kovových materiálů proti abrazi

Významnou roli při odolnosti proti abrazivnímu opotřebení jsou typy karbidických fází a jejich velikost. Odolnost proti abrazivnímu opotřebení oceli při změně typu karbidu s rostoucím podílem legujících prvků např. při přechodu karbidů typu M_3C na komplexní karbid typu M_7C_3 se zvýší odolnost proti abrazi. Dalším zvýšení odolnosti může nastat speciálními karbidy legujících prvků v porovnání s oceli, u nichž jsou přítomny komplexní karbidy např. přidáním vanadu do chromových ledeburitických ocelí, kde se vytvoří velmi tvrdé karbidy VC a zároveň se vhodněji rozloží karbidy chromu v základní hmotě a jejím legováním uhlíkem a chromem.

Tab. 3 Poměrná odolnost proti abrazivnímu ψ_a opotřebení kalených ocelí a litiny o tvrdosti 850 – 900 HV se zastoupením typů jejich karbidů a karbidických fází. [2]

Materiál	Mikrostruktura	Poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení ψ_a [-]
12 061	Martenzit	2,45
19 152	Martenzit + karbidy	2,6
19 221	Martenzit + M_3C	2,65
14 100	Martenzit + M_3C	2,7
14 209	Martenzit + M_3C	2,7
19 436	Martenzit + M_7C_3	3,8
19 571	Martenzit + (M_7C_3)	2,5
19 572	Martenzit + M_7C_3	3,5
19 581	Martenzit + MC + M_7C_3	4,4
19 810	MC + M_6C + ($M_{23}C_6$)	6,3
19 811	M_6C + $M_{23}C_6$ + (MC)	4,6
litina Cr15Mo2	M_7C_3	4,0

U vysokolegovaných materiálů zmíněných v tab. 5 je podíl zbytkového austenitu velmi malý a celkově nemá výrazný vliv na odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Hodnoty parametru ψ_a stanovené na přístroji s brusným plátnem ukázaly, že nejmenší odolnost mají karbidy typu

M_3C (Fe_3C), s vyšší odolností následovaly karbidy typu M_7C_3 a maximální hodnoty nastaly u speciálních karbidů MC. Ve struktuře litin je kromě základní matrice důležitý i grafit. Vliv tvaru grafitu se projevuje při porovnání tvárné litiny, kde je grafit kuličkový s litinou šedou, kde je lamelární. Tvárná litina více vzdoruje opotřebení než šedá, z důvodu, že lupínkový grafit na rozdíl od kuličkového působí jako větší koncentrátor napětí. Zásadní roli u litin hraje především základní matrice.

Při zkoušení kobaltové spékané slitiny na přístroji s pryžovým kotoučem bylo zjištěno, že největší odolnost proti abrazivním opotřebení měly vzorky s největšími délkami karbidů (M_7C_3 s malým podílem karbidů M_6C) naopak, na vzorcích s krátkými karbidy byl hmotnostní oěr nejvyšší. Tato závislost byla přímoúměrná délce karbidů. Různých délek karbidů od 8 do 38 μm bylo dosahováno změnou slinovacích teplot.

Výrazný vliv proti abrazi má také disperznost karbidů v základní matrici. Čím je vyšší, tím příznivěji působí.

Kromě karbidů zde můžou příznivě působit i jiné nekovové tvrdé vměstky viz. tab. 4.

Tab. 4 Základní charakteristiky karbidů [2]

Chemické složení	Tavící teplota [K]	Hustota [kg/m^3]	Mikrotvrdość [HVM]	E [MPa]	Mez pevnosti [MPa]		
					Tlak	Ohyb	Tah
B ₄ C	2623	2,54	4950; 5000	-	1800	281- 340	163
SiC	2970	3,2	2500 – 3000; 3350	394000	1500	15	-
TiC	3450	4,93	3000; 3200	460000 322000	1380	280- 870 280- 400	560- 1050
VC	3100	5,77	2094; 2944	430000 276000	620; 300- 1330	-	-
Cr ₃ C ₂	2163	6,68	1350; 2280	380000	1048	-	-
Cr ₂₃ C ₆	1793	6,99	1650	-	-	-	-
Cr ₇ C ₃	1940	6,92	1336; 2200	-	-	-	-
Mn ₃ C	1793	6,89	-	-	-	-	-
Fe ₃ C	1923	7,67	800	-	-	-	-
NbC	3753	7,82	1961; 2400	345000	2423	-	-
TaC	4070	14,3	1600; 1787	291000		30	20-30
WC	2998	15,7	1780; 2080	710000 727000	3600 2720	560	350

Tab. 5 Základní charakteristiky nitridů a boridů [2]

Chemické složení	Tavící teplota [K]	Hustota [kg/m ³]	Mikrotvrdost [HVM]	E [MPa]	Mez pevnosti [MPa]		
					Tlak	Ohyb	Tah
BN	3270	2,34	-	86500	240-320	-	111,2
AlN	2500	3,05	1230	330500	-	-	270
Ca ₃ N ₂	1468	2,63	-	-	-	-	-
VN	2320	6,04	1520	256000	-	-	-
TiN	3200	5,43	1994; 2450	-	1298	-	-
ZrN	3255	7,09	1520; 1988	-	1000	-	-
Fe ₄ N	943	6,57	-	-	-	-	-
NbN	2372	8,4	1396	-	-	-	-
TaN	3360	15,46	1060; 3236	-	-	-	-
HfN	3853	14,0	1600	-	-	-	-
TiB ₂	3253	4,5	3370; 3480	540000 374000	1350 1380	245	-
ZrB ₂	3313	6,17	2252; 2200	350000	1580	93	-
HfB ₂	3520	10,5	2190	-	-	--	-
NbB ₂	3270	6,97	2500	-	-	-	-
TaB ₂	3370	11,7	1670	-	-	-	-

5.2 Vliv matrice na odolnost proti na procesy porušování kovových materiálů proti abrazi

Dosud provedené experimenty jednoznačně prokázaly, že největší odolnosti proti abrazivnímu opotřebení mají oceli a litiny s feritickou matricí. Substituční zpevnění karbidotvornými prvky nemá za výsledek zvýšení odolnosti proti opotřebení. Rostoucí podíl perlitu ve struktuře feriticko – perlitické zvyšuje odolnost proti opotřebení, přičemž lamelární perlit má přibližně o 10 % vyšší odolnost proti opotřebení než perlit globulární při stejné tvrdosti obou struktur.

Tab. 6 Vliv struktury matrice na odolnost proti abrazivnímu opotřebení u vybraných ocelí [2]

Značení oceli	Tepelné zpracování	Mikrostruktura	Ψ_a [-]	Tvrдость [HV]
12 014	Žiháno	Ferit	1,0	100
12 050	Normalizace	Ferit + perlit	1,32	195
19 152	Žiháno na měkko	Perlit globulární	1,19	167
19 313	Žiháno na měkko	Perlit globulární	1,31	186
19 436	Žiháno na měkko	Perlit + karbidy	1,56	216
19 581	Žiháno na měkko	Perlit + karbidy	1,66	265
19 811	Žiháno na měkko	Perlit + karbidy	1,25	223
19 083	Kaleno	martenzit	1,96	789
19 152	Kaleno	martenzit	2,57	865
19 255	Kaleno	Martenzit + karbidy	2,58	889
19 438	Kaleno	Martenzit + karbidy	2,99	799
19 581	Kaleno	Martenzit + karbidy	4,22	772
19 811	Kaleno	Martenzit + zbytkový austenit + karbidy	3,31	752
17 249	Austenitizačně žiháno	austenit	1,49	147
42 2921	Austenitizačně žiháno	Austenit + karbidy	1,72	238

Martenzitická struktura v oceli i litinách má vyšší odolnost opotřebení než perlitické slitiny srovnatelného chemického složení. S rostoucím obsahem legujících prvků a martenzitu se dále zvyšuje odolnost. Další zvýšení se zajistí přidáním karbidů. Při rostoucím obsahu uhlíku a legujících prvků se při tepelném zpracování posunují k nižším hodnotám teploty M_s a M_f , kde hlavně teplota M_f , kterou se určuje podíl zbytkového austenitu, má podíl na konečných vlastnostech. Bylo prokázáno, že zbytkový austenit působí příznivě při kluzné abrazi a u chrom-ledeburitických ocelí bylo zjištěno, že optimální zastoupení austenitu ve struktuře je 75 až 84 %. Tento příznivý jev je dán skutečností, že austenit s karbidy ve fázovém rozhraní má vyšší pevnost než fázové rozhraní martenzit s karbidy, což je způsobeno parametry krystalových mřížek, kdy austenit s karbidy jsou si bližší než martenzit s karbidy. Dále zde působí i efekt zpevnění povrchových vrstev při fázových transformacích γ -Fe na α' -Fe indukované plastickou deformací při vnikání abrazivních částí do povrchu. Naopak do podmínek třítělesové abrazi je výhodnější větší zastoupení austenitu ve struktuře. [1] [2] [4]

V povrchových vrstvách Cr – Ni austenitických ocelích nedochází k fázové přeměně na martenzit a tudíž jejich schopnost odolávat abrazi je nízká. U manganových austenitických ocelí, je situace stejná při kluzné abrazi, nebo austenit transformuje na martenzit pouze v malé míře. Na druhou stranu se využívá u manganových austenitických ocelí zpevňování austenitu a jeho částečnou transformaci na ϵ – fázi martenzitického typu, která je mnohem tvrdší. Toho se docíluje při kombinovaném namáhání při abrazi s rázy. [2]

Oceli a litiny s austeniticko - bainitickou matricí jsou v podmínkách abraze odolnější než s martenzitickou matricí při stejné makrotvrdosti, příznivě se zde projeví i vyšší houževnatost bainitu. [2]

5.3 Vliv kluzné rychlosti na abrazivní opotřebení

Z údajů získaných při zkouškách na přístroji s brusným plátnem bylo zjištěno, že abrazivní opotřebení mírně roste do hodnoty přibližně 2 m/s u uhlíkových ocelí i neželezných kovů. Při zkouškách na přístroji s pryžovým kotoučem se došlo k výsledům u neželezných kovů (Al, Cu), že s růstem rychlosti od 1 m/s do 5 m/s se otěr nemění, zatímco u chromové ledeburitické oceli otěr klesá, což může být zapříčiněno vyšší kontaktní teplotou mezi vzorkem a pryžovým kotoučem s následnou vyvolanou změnou vlastností pryže a i na změnu fyzikálně – mechanických vlastností povrchových vrstev. [1] [2]

5.4 Vliv doby provozu

V otevřených systémech, pokud nedochází k tvarovým změnám opotřebovávané součásti, velikost otěru lineárně roste s dobou provozu, délkou třecí dráhy nebo s množstvím zpracovávaného materiálu např. přístroj s pryžovým kotoučem. [2]

V uzavřených systémech, když se opakovaně abrazivum stýká s povrchem, schopnost abraziva ubírat materiál postupně klesá vlivem porušení řezných hran částic. Příkladem může být rovněž přístroj s pryžovým kotoučem, kde na rozdíl od neustálého přísunu nového abraziva je v tomto případě kotouč se vzorkem ponořen do vaničky, ve které je nasypán stálý objem abraziva. [1] [2]

5.5 Vliv zatížení

Vliv zatížení v předpokládaném otevřeném systému, kdy nebude docházet k postupnému snižování abrazivity částic bude platit závislost, že hmotnostní otěr je přímo úměrný působícímu zatížení či měrnému tlaku. Je známá situace, kdy u kalené a následně popuštěné oceli nástrojové oceli se po dosažení určité úrovně zatížení nevedlo k růstu otěru. Tento jev je

způsoben přítomností karbidů M_7C_3 v oceli, které při větším zatížení při interakci křemenným abrazivem porušovali jeho řezné hrany, a tím dochází ke snížení abrazivního účinku. [1] [2]

Celkově je důležité při výběru vhodného typu materiálu skloubit výrobně - technická a provozně - ekonomická hlediska. Materiál, který bude použit, musí zajistit dostatečnou životnost i při nahodile vyšších parametrech provozního zatížení. Cílem je vybrat takové materiálové řešení, který při dlouhodobém provozu nejvíce sníží provozní náklady a současně bude vhodný na následnou údržbu či renovaci.

6. Přístroje pro zkoušky abrazivního opotřebení

Podle podmínek v oblasti kontaktu opotřebovávaného povrchu s abrazivními částicemi se experimentální zařízení modelující kluznou abrazi rozdělují na: [3]

- Přístroje s vázanými částicemi
- Přístroje s volnými částicemi
- Přístroje s vrstvou volných částic mezi stykovými povrchy
- Zařízení modelující procesy abraze v reálných podmínkách provozu

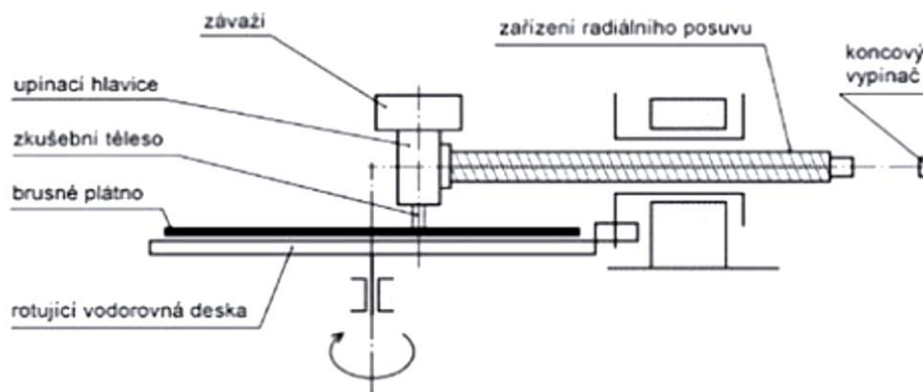
6.1 Přístroje s vázanými částicemi

Při použití pevně fixovaných částic se užívá brusného plátna, kde jsou abrazivní částice nejčastěji z korundu, případně i jiného druhu o zrnitosti 120 až 60 pevně fixovány lepidlem k podložce a zkoušený i etalonový vzorek je s konstantním zatížením přitlačen v držáku na brusné plátno, které je připevněno na rotující kotouč. Jiná možnost fixace částic je do brusného kotouče, tato metoda umožňuje zkoušet materiál za normálních i vysokých teplot.

Použití hrotu definovaného tvaru se využívá především ke studiu tribologických vlastností povlaků nebo jednotlivých strukturních složek. Typické zařízení Scratch Tester, které se používá ke zjišťování adheze tvrdých PVD a CVD povlaků k podkladovému materiálu. Princip zkoušky je diamantový hrot ve tvaru jehlanu nebo kužele, který je vtlačován rostoucí silou do povrchu pomalu se pohybujícího vzorku. Výstupem je zjištění, kdy dochází k tvorbě prvních trhlin v povlaku nebo celkovému porušení povlaku. Další používaný přístroj s hrotem je zařízení s názvem kyvadlo. Hrot je u něj připevněn na kladivo Charpyho přístroje a při pohybu kyvadla rýhuje povrch vzorku. Výhody metody jsou snadnost získání údajů o spotřebě energie na rýhování povrchu, rychlost, jednoduchost zkoušky a úzký rozptyl výsledků. Oba typy přístrojů lze využít ke studiu lokálního mechanismu abrazivního

opotřebení, s tím omezením, že využití získaných experimentálních údajů pro řešení praktických případů abrazivního opotřebení jsou velmi omezené.

Společnou nevýhodou všech přístrojů s pevně vázanými částicemi je klesající abrazivita brusného plátna nebo kotouče při opakovaném kontaktu jednotlivých abrazivních částic s opotřebovávaným povrchem zkoušených vzorků. Vlivem sil působících v kontaktu se abrazivní částice postupně otupují a vylamují. Rovněž dochází ke kontaminaci abraziva částicemi otěru, což může mít i za následek změnu mechanismu opotřebení. [3]



Obr. 8 Princip činnosti přístroje s brusným plátnem [4]

6.2 Přístroje s volnými částicemi

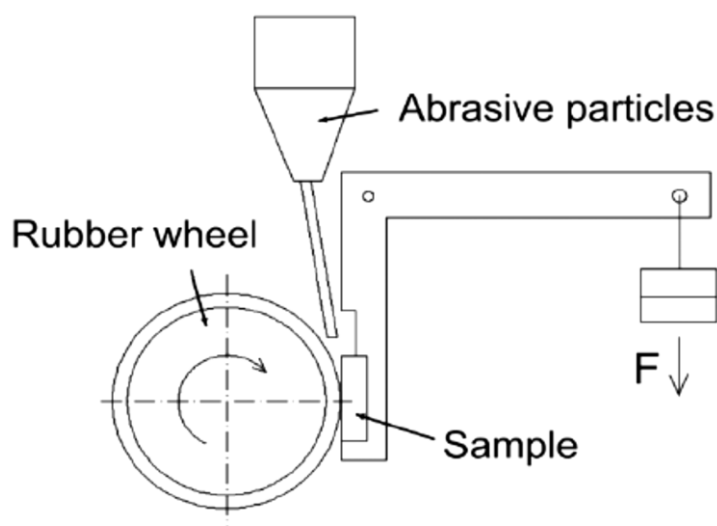
Metody zkoušení lze rozdělit na přístroje s brusnou nádobou, přístroje s pryžovým kotoučem a bubnové přístroje.

Přístroje s brusnou nádobou mají zkušební nádobu s abrazivními částicemi a v ní jsou umístěny zkušební vzorky. Při vzájemném pohybu vzorků a volných částic dochází k opotřebení povrchu vzorků. Výhody této metody jsou použití různých druhů částic z reálných podmínek abraze a možnost zkoušet materiály i za vysokých teplot. Jako nevýhody se jeví malá intenzita procesu opotřebení a postupný pokles abrazivity volných částic vlivem otupování řezných hran a jejich znečišťování otěrem, což se dá řešit periodickými výměnami abraziva. Pomocí tohoto zařízení lze modelovat podmínky blízké provozu strojních zařízení pracujících v zemině.

Bubnové přístroje jsou svou konstrukcí velmi jednoduché a spolehlivé v provozu. Nevýhodou je značná časová náročnost zkoušek a omezená aplikovatelnost získaných experimentálních

dat. Z tohoto důvodu se výsledky zkoušek obvykle používají k hodnocení odolnosti materiálů pancéřů a mlecích elementů při rozmělnování nerostných surovin. [3]

Přístroje s volně sypanými částicemi, kde jako abrazivum je standardně použit křemenný písek sypaný mezi pryžový kotouč a zkoušený vzorek. Frakce částic se získá gravitačním prosátím na síť např. s velikostí ok 0,8 mm. Jako další abrazivum je možno použít jakýkoliv sypký materiál o vhodné zrnitosti, přičemž záleží na aplikaci, pro kterou je zkoušený materiál určen např. vápenec, rula, živec, uhlí, ruda, koks atd. U této zkoušky činí největší potíže s reprodukovatelností výsledků v postupném zahřívání pryžového kotouče, při kterém abrazivum více ulpívá na kotouči a tím se mění abrazivita zrn, které je závislé na obvodové rychlosti, přítláčné síle a použitém abrazivu abrazivu. Stanovení měrného tlaku mezi vzorkem a pryžovým kotoučem je proměnlivé. S déle trvající dobou zkoušky se měrné zatížení snižuje. [3]



Obr. 9 Princip činnosti přístroje s pryžovým kotoučem [14]

6.3 Přístroje s vrstvou volných částic mezi stykovými povrchy

Tyto přístroje slouží k modelování podmínek tzv. 3 - body abraze. Problematické je zejména odstraňování rozrušených částic abraziva z oblasti stykových povrchů a dodávka čerstvých částic mezi pracovní plochy vzorků. [3]

6.4 Zařízení modelující procesy abraze v reálných podmínkách provozu

Pro zkoušky abrazivního opotřebení je možné využít experimentální zařízení, které se blíží nebo je shodné se zařízením, které bude pracovat v reálných podmínkách provozu. Tento

způsob měření dává nejpřesnější hodnoty blížící se skutečnému provozu. Nevýhodou bývají vysoké náklady na stavbu zařízení v podstatě jednoúčelového zkušebního stroje a většině případů i značně zabírajícího prostor.

Procesy kombinovaného účinku abraze a rázů lze modelovat na laboratorních čelistových a kladivových drtičích nebo na přístroji pro stanovení abrazivity např. laboratorní mlýn dle Bonda (ON 721184). Na mlýnu lze hodnotit jak abrazivnost částic, tak i otěruvzdornost materiálu a představuje skutečné provozní podmínky, k nimž dochází u některých typů mlýnů, drtičů, dopravních a transportních zařízení při $v = 5-6$ m/s. Podstata zkoušky spočívá v tom, že rotující plochý vzorek nebo etalon naráží na abrazivo pohybující se uvnitř uzavřené nádoby opačným směrem než vzorek.

6.5 Etalony používané ke zkouškám abrazivního opotřebení kovových materiálů

Pro použití etalonového materiálu ke stanovení poměrné odolnosti opotřebení zkoušených materiálů se používají vzorky oceli ČSN 12 013, ČSN 12 014 nebo ČSN 12 050. Dříve se používali i vzorky z oceli ČSN 11 500.

Metodika použití etalonového materiálu spočívá v tom, že se před nebo po zkoušení materiálu, u kterého se chce stanovit odolnost proti abrazivnímu opotřebení, se provede za stejných podmínek s výše uvedeným etalonovým materiálem zkouška opotřebení a stanoví se u něj rovněž hmotnostní nebo objemový úbytek materiálu. Tento rozdílný hmotnostní nebo objemový úbytek bude následně použit při vyhodnocování a stanovení koeficientu abrazivního opotřebení zkoušeného vzorku. Pro konstantnost a vypovídající hodnotu naměřených veličin se doporučuje pro každé měření použít nový etalon a nevztahovat do výpočtu hmotnostní nebo objemový úbytek například jednoho etalonu do dalších pěti měření zkoušených vzorků z důvodu změn v orovnění pryžového kotouče atd.

7. Zkoušené materiály [12], [13]

Jako zkoušené materiály se hodí všechny druhy kovů, funkčních povlaků, plastů, keramiky nebo dřeva.

Lze rovněž zkoušet ochranné vrstvy kompozitních materiálů, které se skládají z houževnaté matrice obsahující tvrdé částice. Jako matrice se nejčastěji používají materiály na bázi niklu, železa, kobaltu a dalších, jako tvrdé částice pak lze použít různé druhy karbidů, nitridů, boridů, jež vyztužují matici.

V případech, kdy v provozu nedochází k velkým rozměrovým změnám, se často s výhodou používají tvrdé návary nebo nástřiky na houževnatém a pevném materiálu. Použití chemicko-tepelného zpracování (nitridace, cementace, boridování) je efektivní v případech malého přípustného opotřebení. Tyto povrchové vrstvy jsou však křehké a proto není účelné je používat v případech abrazivního opotřebení kombinovaného s rázovým namáháním.

Případů kdy lze s úspěchem použít pro zvýšení odolnosti proti abrazivnímu opotřebení použít elastomery je několik. Používají se na ložiska hřídelí lodních šroubů, ložisek bagrů, na stroje zpracovávající písek a štěrk. Tlumí hluk, vibrace a odolávají korozi. Odolnost proti abrazivnímu opotřebení elastomerů je v přímé závislosti na mezi pevnosti v tahu. Tvrdost přitom nemůže být používána jako kritériu odolnosti proti abrazivnímu opotřebení. Velmi dobrou odolnost proti abrazi mají polyuretany a přírodní kaučuk.

Keramické materiály se stále více využívají při ochraně proti opotřebení a korozi různých součástí při třídění, zpracování, dopravě a v potrubních systémech v důlním průmyslu. Keramické materiály mají velmi dobré mechanické vlastnosti včetně tvrdosti, jsou odolné proti působení chemických látek, odolávají opotřebení a mohou pracovat i za vysokých teplot.

8. Hodnocení abrazivního opotřebení [16], [20]

Principem zkoušek abrazivního opotřebení je hodnocení úbytku materiálu ve vztahu k fyzikální veličině, jako je například čas nebo dráha.

Rychlost opotřebení je dána vztahem:

$$\psi_l = \frac{\Delta m}{l} \text{ [g/m]} \quad (4)$$

Poměrné hmotnostní opotřebení je dáno:

$$\psi_a = \frac{\Delta m_e}{\Delta m} \text{ [-]} \quad (5)$$

Objemové opotřebení je dáno:

$$\psi_v = \frac{\Delta V_e}{\Delta V} \text{ [-]} \quad (6)$$

Tomáš Panáček

ψ_a – poměrné hmotnostní opotřebení

ψ_{av} – rychlost opotřebení

ψ_v – poměrné objemové opotřebení

l – ujetá vzdálenost

Pro stanovení hmotnostních úbytků se používá laboratorní váha s nejvhodnější přesností vážení na pět desetinných míst, což ale v mnohých případech, hlavně u přístroje s pryžovým kotoučem limituje jejich použití kvůli maximální dovolené hmotnosti vzorku, který můžeme pomocí těchto vah zvážit. Většinou je maximální nosnost vah do 210 g. V omezených případech právě kvůli vyšší hmotnosti vzorku je možnost snížení hmotnosti pomocí ofrézování nebo použití vah s nižší přesností např. na tři nebo čtyři desetinná místa.

Dále se před a po zkoušce abrazivního opotřebení stanovují změny drsnosti funkčního povrchu obou stýkajících se povrchů, změny zrnitosti působících částic, změny mikro a makrogeometrie opotřebovávaných povrchů a změny mikrotvrdosti mikrostruktury povrchové vrstvy.

9. Popis konstrukce zařízení s pryžovým kotoučem [21], [19]

Pro provedení zkoušek abrazivního opotřebení byl sestrojen přístroj s pryžovým kotoučem. Jako podklady pro sestrojení byla použita norma ASTM G65 – 04(2010) a SVÚM, Realizační výstup resortního úkolu: vybrané metody pro hodnocení opotřebení materiálů. Na základě těchto zdrojů byly stanoveny parametry stroje:

Rozměry stroje: 700 x 600 x 1200 mm

Výkon motoru: 1,1 kW

Otáčky motoru: 950 ot/min

Přítlačná síla na vzorek: 130 N

Průměr pryžového kotouče: 240 mm

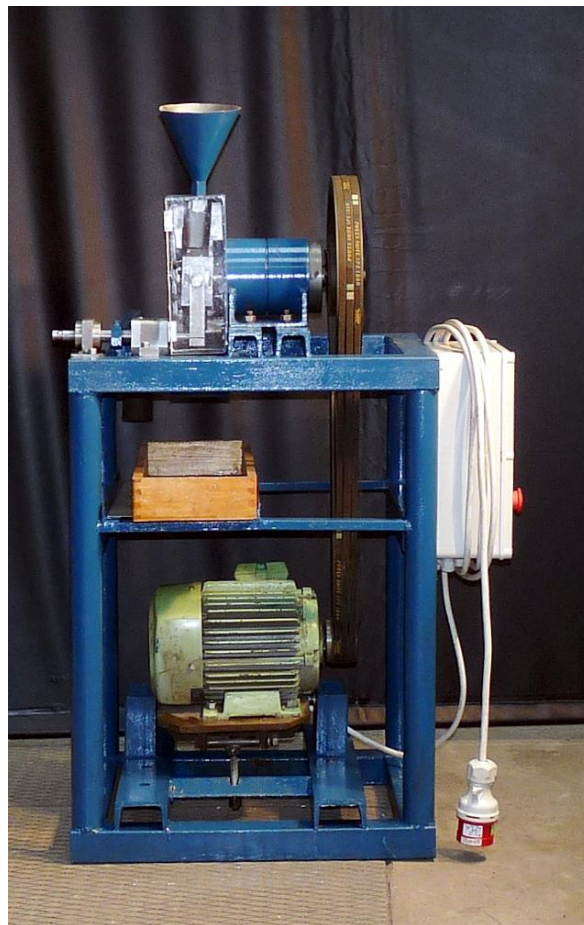
Šířka pryžového kotouče: 22 mm

Obvodová rychlost: 2,68 m/s

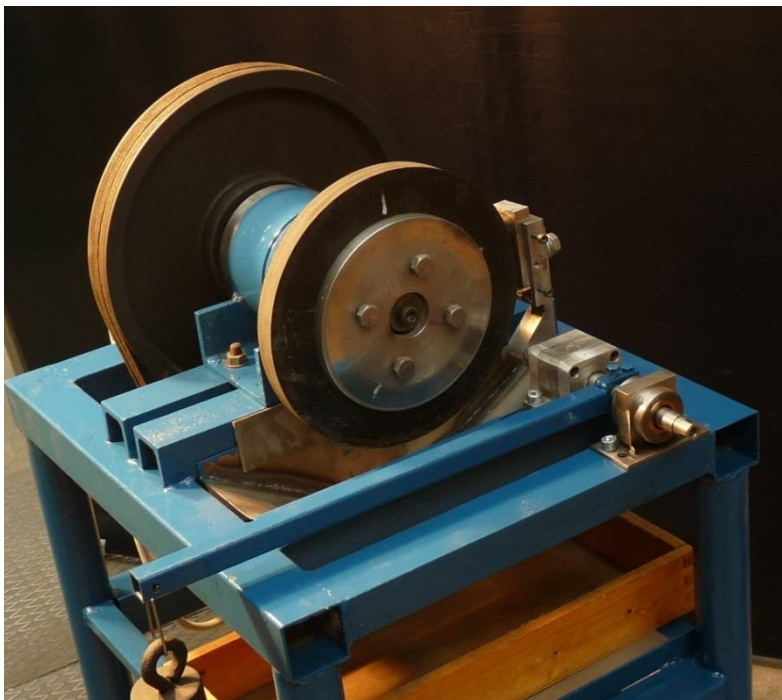
Množství abraziva: 310 g/min

Maximální velikost zkušební vzorku: 90 x 35 x 20 mm

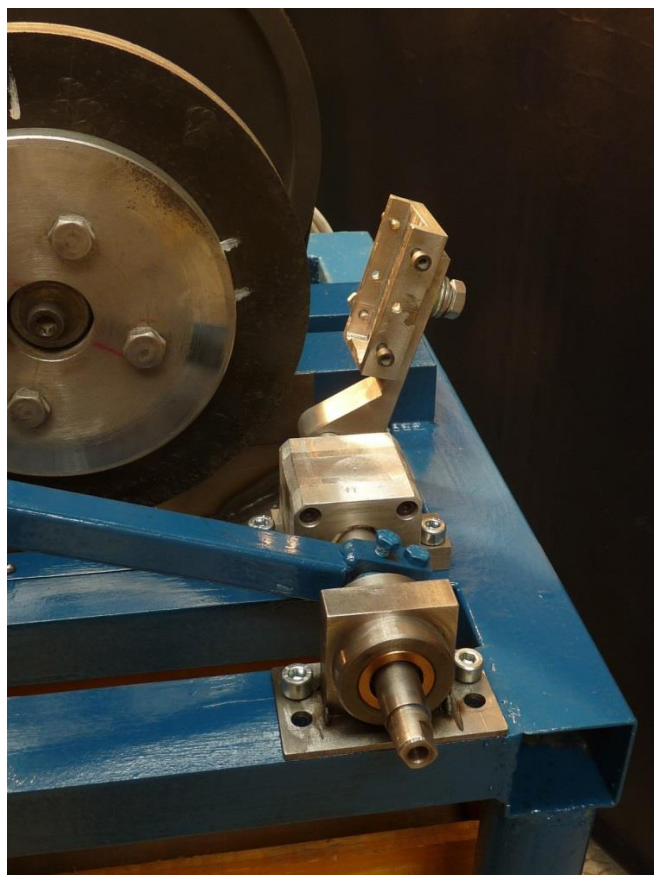
Kovový rám přístroje je svařen z tenkostěnných ocelových profilů. Přenos výkonu na hnanou hřídel je zajištěn pomocí tří klínových řemenů a jejich napínání se provádí stavěcím šroubem posunováním elektromotoru. Přítlak vzorku na pryžový kotouč je realizován přes rameno páky s odpovídajícím zatížením podle požadovaného přítlaku při zkoušce a nyní je nastaven na přítlačnou sílu 130 N. Prostor kolem pryžového kotouče je opatřen ochranným krytem kvůli snížení prašnosti, která tuto zkoušku doprovází. Nad krytem je umístěna trychtýřovitá násypka pro abrazivum se zásobníkem o objemu 800 ml a výstupním otvorem 5 mm. Pod pryžovým kotoučem se nachází sběrná nádoba pro abrazivum. Přístroj je dále opatřen elektro skříní s centrálním vypínačem. Upíná vzorků je uzpůsobeno pomocí čtyř stavěcích šroubů, které jsou umístěny po stranách držáku a slouží k dodatečnému vycentrování vůči pryžovému kotouči.



Obr. 10 Přístroj s pryžovým kotoučem



Obr. 11 Detail pákového mechanismu s upnutým vzorkem v držáku



Obr. 12 Detail pryžového kotouče a upínání vzorků

10. Vliv parametrů navařování na promísení se základním materiálem

Při svařování dochází k promísení svarového kovu a základního materiálu, což ovlivňuje po chemické stránce mikrostrukturu návaru. Cílem je udržet promísení co nejnižší, aby se udržely optimální vlastnosti navařené vrstvy. Měkčí návarové materiály vykazují nárůst tvrdosti, když se provedou návary na výše legované základní materiály v důsledku zvýšení obsahu uhlíku a legur promísením se základním materiálem. Při navařování jakýchkoliv funkčních vrstev důležitý podíl jednotlivých strukturních fázích a tudíž jsou tyto fáze funkcí metalurgických dějů probíhajících při navařování. Velmi často je ale základní materiál nelegovaný nebo nízkolegovaný. V takovém případě může být potřebné navařit několik vrstev návaru, aby se získala potřebná tvrdost. V běžných případech ale postačují dvě nebo tři vrstvy návaru. Jelikož stupeň promísení závisí nejen na použitém svařovacím procesu, ale i na konkrétním postupu svařování, při volbě svařovacího postupu je potřebné zajistit, aby se promísení minimalizovalo. [6], [9], [11]

Tab. 7 Vliv parametrů navařování na promísení se svarovým kovem [6]

Svařovací rychlost	Nízká rychlost – vysoké promísení Vysoká rychlost – nízké promísení
Svařovací polarita	DC (-) nízké promísení AC střední promísení DC (+) vysoké promísení
Tepelný příkon	Nízký - nízké promísení Vysoký - vysoké promísení
Technika svařování	Tahové housenky - nízké promísení Svařování s rozkyvem - vysoké promísení
Poloha svařování	Svislá nahoru - vysoké promísení Vodorovná shora, svislá dolů - nízké promísení
Počet vrstev	Se stoupajícím počtem vrstev promísení klesá
Typ svarového kovu	Vysoce legované svarové kovy jsou méně citlivé na promísení
Výlet drátu	Dlouhý výlet - menší promísení
Přehřev zákl. mat.	Přehřev - zvýšení promísení
Odvod tepla	Rozměrná nebo intenzivně ochlazovaná součást – menší promísení

11. Provedení návarů

Pro zkoušku byly vybrány dvě návarové slitiny:[6]

ESAB PZ 6159

Plněná elektroda pro navařování. Svarový kov obsahuje karbidy wolframu v martenzitické matici a odolává teplotám do 500 °C. Opracování návaru je možné pouze broušením. Drát je použitelný i pro navařování částí pracujících za zvýšených teplot, např. v ocelářství. Využití je v žíhacích pecích, navařování ostří nástrojů pracujících za tepla.

Tab. 8 Směrné chemické složení přídatného materiálu PZ 6159

C	Si	Mn	Cr	Co	Mo	V	W
0,40	1,10	1,10	1,80	2,00	0,40	0,40	8,00

ESAB Trubrodur 14.70

Plněná elektroda pro tvrdé návary s velmi vysokou odolností proti opotřebení tvrdými a zrnitými minerály jako pískem rudou, kamenivem a půdou. Otěruvzdornost je zachována až do teploty 500 °C, návar je korozivzdorný, žáruvzdorný do 1000 °C. Pro činné díly zemních a důlních strojů. Maximální počet housenek nemá přesáhnout 2 až 3.

Tab. 9 Směrné chemické složení přídatného materiálu Trubrodur 14.70

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
3,50	0,40	0,90	22,0	3,50	0,40

Pro všechny návary byl použit na ocelový plech o rozměrech 150 x 100 x 15 mm, jehož povrch byl řádně otryskán ocelovou drtí, odmaštěn a pro ověření chemického složení byla provedena spektrální analýza na přístroji s následujícím chemickým složením:

Tab. 10 Vyhodnocení spektrální analýzy

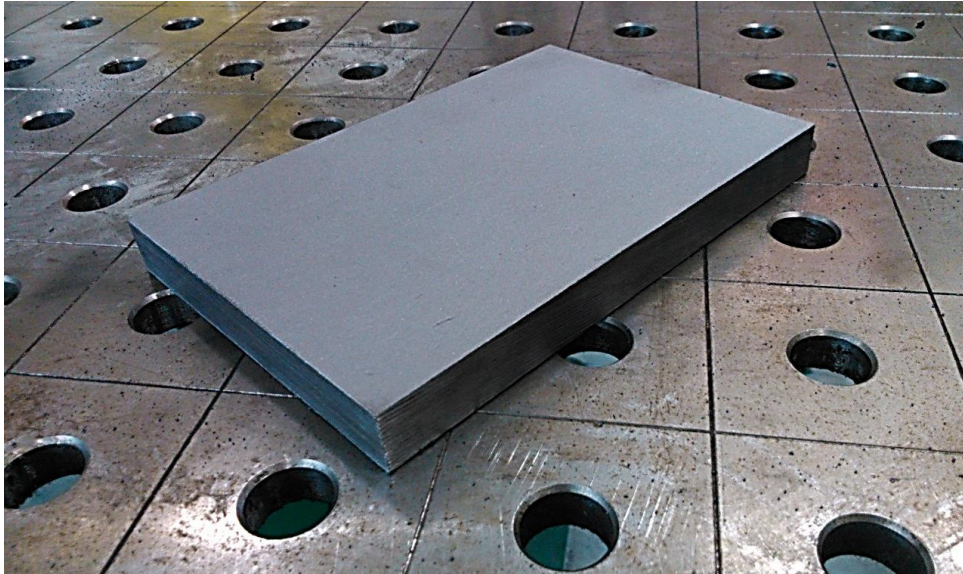
Č.	Datum	Mod	Mod zameny	Nejlepší shoda	2. nejlepší shoda
11.	26.5.2015	Analytický Plus	PASS	1-0460 P250GH [C22-8]	-
8.	26.5.2015	Analytický Plus	PASS	1-0460 P250GH [C22-8]	-
5.	26.5.2015	Analytický Plus	PASS	1-0460 P250GH [C22-8]	1-0301 {1-1121} C10
2.	26.5.2015	Analytický Plus	PASS	Carbon Steel	1-0301 {1-1121} C10

Tab. 11 Vyhodnocení spektrální analýzy

Č.	Si	P	S	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Mo
11.	0.3543	ND	0.0346	0.2781	0.3971	98.3064	0.2601	0.3534	0.0159
8.	1.1059	0.0195	0.0179	0.0956	0.4045	97.64	0.2870	0.3411	ND
5.	0.2647	ND	0.0171	0.1358	0.3456	98.7190	0.2071	0.3012	0.0095
2.	0.7698	0.0203	0.0175	0.0772	0.3706	98.2984	0.1823	0.2638	ND

Z výsledků zkoušky spektrální analýzy je z chemického složení patrné, že se jedná o kotlovou ocel P250GH, což se vymyká běžnému standardu navařování zkoušeného materiálu na ocel S235JR, nicméně chemické složení oceli P250GH přibližně odpovídá (s výjimkou vyššího obsahu křemíku) S235 a ve vztahu svařitelnosti je tato ocel dobře svařitelná.

První způsob navařování byl proveden na plech podložený v rozích podložkami, který po ukončení navařování chladnul přirozeně na vzduchu. Druhý způsob spočíval v umístění zkušební vzorku do plechové nádoby, která byla naplněna vodou, plech v ní byl v rozích podepřen podložkami, aby co nejméně zakrývali povrch plechu a ustavili jej, tak aby voda sahala téměř po horní okraj vzorku. Tím bylo v druhém případě zajištěno většího odvodu tepla při navařování oproti prvnímu způsobu. Rozměr plechové nádoby byl 400 x 300 x 100 mm a byla naplněna 4,5 l vody. Při zkoušce voda nuceně neproudila kolem vzorku.



Obr. 13 Otryskaný základní materiál P250GH

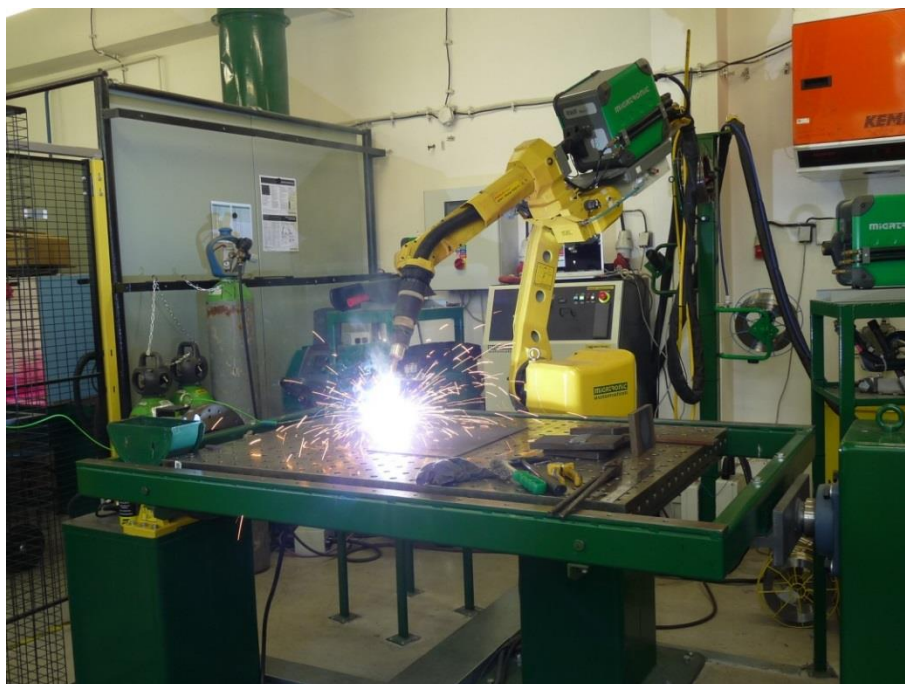
Pro co nejkonstantnějšího dosažení opakovaných výsledků měření se zvolilo použití svařovacího robota od firmy FANUC Robot ARC Mate 100iC a svařovacího zdroje Migatron Sigma Galaxy 400, na kterém byly odladěny nejvhodnější parametry, jako jsou proud, napětí, rychlost svařování a následně spočítán tepelný příkon viz tab. 12, a zároveň se tím docílilo co nejrovinnatějšího vzhledu svaru, bez nežádoucích proláklín nebo převýšení, což by zvýšilo pracnost následného opracování a hlubším ubrušováním by byl materiál více promíšen se základním materiálem. Hořák byl naprogramován na vedení s rozkyvem s násl. parametry:

Rozkmit: 0,2 Hz

Amplituda: 17 mm

Výdrž v krajních polohách: 0,6 s

Svařovací rychlost: 3 cm/min

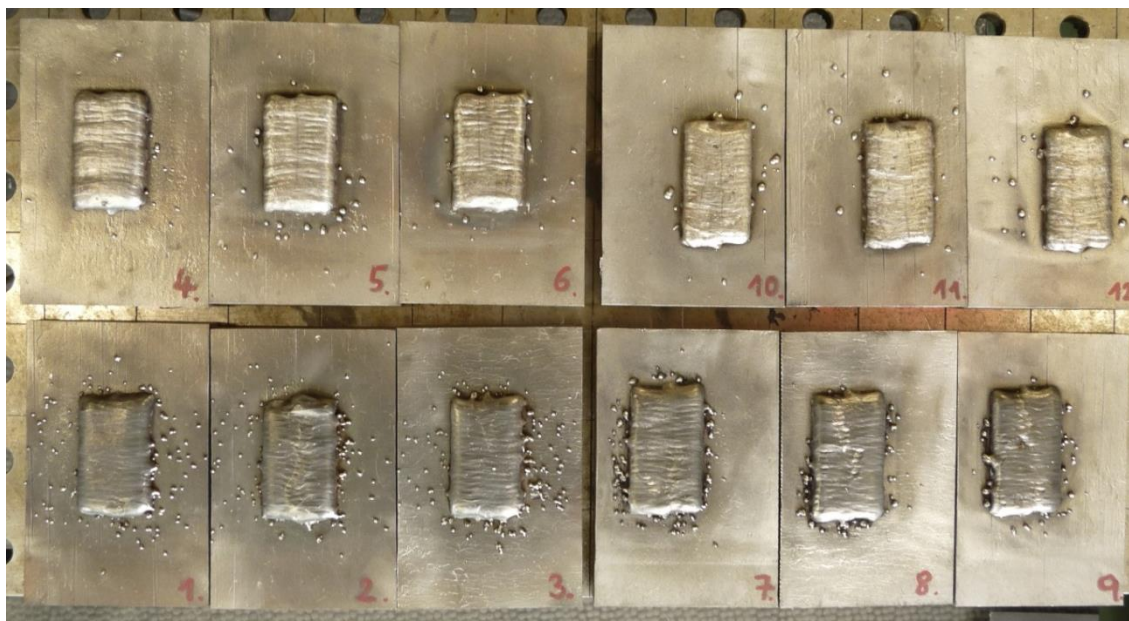


Obr. 14 Proces automatizovaným navařováním pomocí robotického zařízení



Obr. 15 Vzorek po navaření s vodním ochlazováním

Celkově se návar skládal ze dvou vrstev, kde se zahájilo navařování druhé vrstvy až po vyhladnutí vzorku po prvním návaru. Jako ochranný plyn byla použita směs M21 s 82 % Ar a 18 % CO₂ při průtoku 16,5 l/min.



Obr. 16 Vzorčky po navaření

Tab. 12 Parametry navařování jednotlivých návarů

	Č.	I_1 [A]	U_1 [V]	I_2 [A]	U_2 [V]	v_c [cm/min]	q_1 [kJ/cm]	q_2 [kJ/cm]
PZ 6159 vzduch	1.	177	20,3	180	19,5	3	0,96	0,94
PZ 6159 vzduch	2.	177	20,3	180	19,5	3	0,96	0,94
PZ 6159 vzduch	3.	177	20,3	180	19,5	3	0,96	0,94
Trubrodur 14.70 vzduch	4.	180	19,5	180	19,5	3	0,94	0,94
Trubrodur 14.70 vzduch	5.	180	19,5	180	19,5	3	0,94	0,94
Trubrodur 14.70 vzduch	6.	180	19,5	180	19,5	3	0,94	0,94
PZ 6159 voda	7.	177	20,3	180	19,5	3	0,96	0,94
PZ 6159 voda	8.	177	20,3	180	19,5	3	0,96	0,94
PZ 6159 voda	9.	177	20,3	180	19,5	3	0,96	0,94
Trubrodur 14.70 voda	10.	180	21,5	180	21,5	3	1,03	1,03
Trubrodur 14.70 voda	11.	180	21,5	180	21,5	3	1,03	1,03
Trubrodur 14.70 voda	12.	180	21,5	180	21,5	3	1,03	1,03

I_1 - Proud první návarové vrstvy

I_2 - Proud druhé návarové vrstvy

U_1 – Napětí první návarové vrstvy

U_2 - Napětí druhé návarové vrstvy

T_1 – Povrchová teplota základního materiálu před navařením první vrstvy

T_2 – Povrchová teplota základního materiálu po navaření první vrstvy

T_{11} – Povrchová teplota základního materiálu před navařením druhé vrstvy

T_{22} - Povrchová teplota základního materiálu po navaření druhé vrstvy

Dále byla měřena teplota dotykovým termočlánkem před navařováním a po navařování s cílem zaznamenat nejvyšší povrchovou teplotu, které se objevila na displeji.

Tab. 13 Naměřené teploty dotykovým termočlánkem

Č.	T_1 [°C]	T_{11} [°C]	T_2 [°C]	T_{22} [°C]
1.	19	210	19	210
2.	19	220	19	214
3.	19	214	19	216
4.	19	19	19	195
5.	19	187	19	190
6.	19	187	19	203
7.	21	60	22	58
8.	21	58	22	57
9.	21	55	22	54
10.	20,5	44	21	56
11.	20,5	47	21	55
12.	20,5	48	21	57

11.1 Úprava vzorků pro zkoušku abrazivního opotřebení

Po procesu navaření byly vzorky rozřezány na metalografické pile s intenzivním chlazením, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění materiálu, na rozměry 65 x 35 mm. Dále pro sjednocení povrchu návaru kvůli zkoušce abrazivního opotřebení byly vzorky strojně přebroušeny na brusce naplocho a kvůli snížení hmotnosti pro maximální dovolené zatížení měřicí váhy ze spodní strany ofrézovány o 5 mm.

Před a po opracování vzorku byla změřena tloušťka navařené vrstvy, z které se následně vypočetla změna výška návaru, jež byla odstraněna broušením.

Tab. 17 Celková výška návaru, výška po přebroušení a změna výšky

Č.	Výška návaru před broušením [mm]	Výška návaru po broušení [mm]	Změna výšky Δh [-]
1.	7,0	6,7	0,3
2.	7,1	6,9	0,2
3.	6,8	6,5	0,3
4.	8	6,0	2,0
5.	7,8	5,5	1,7
6.	7,8	5,4	1,8
7.	6	5,3	0,7
8.	6,4	4,8	1,6
9.	6,4	4,5	1,9
10.	7,8	5,8	2,0
11.	7,8	6,6	1,2
12	7,8	6,6	1,2

12. Zkouška odolnosti proti abrazi na přístroji s pryžovým kotoučem [22]

Vybrané otěruvzdorné návary byly podrobeny zkoušce odolnosti proti abrazivnímu opotřebení na přístroji s pryžovým kotoučem v návaznosti na normu ASTM G65: Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, který byl v rámci diplomové práce vyroben, s následujícími parametry zkoušky:

Tomáš Panáček

Průměr pryžového kotouče: 240 mm

Obvodová rychlost: 2,68 m/s

Přítlačná síla působící na vzorek a kotouč: 130 N

Abrazivum: křemenný písek, frakce 0,3 mm

Množství částic: 310 g/min

Doba zkoušky: 6 min 13 s

Ujetá obvodová vzdálenost: 1000 m

U všech vzorků byly použity stejně nastavené parametry. Výchozím materiálem pro stanovení úběru materiálu byla zvolena ocel ČSN 12 050 normalizačně žíhaná nařezaná ze čtyřhranné tyče na rozměry 65 x 28 x 16 mm. Všechny vzorky byly před a po zkoušce zváženy na vahách s přesností na tři desetinná místa a jako výstup pro stanovení poměrného úběru materiálu byl zaznamenáván hmotnostní úbytek materiálu. Vzorky byly zkoušeny systémem (1; 4; 7; 10), (2; 5; 8; 11), (3; 6; 9; 12) se shodně označeným etalonovým, kde etalon byl zkoušen jako první a po něm následoval vzorek s návarem. Po každé sérii byl orovněn pryžový kotouč, který se nejvíce opotřebovával ve střední části po jeho obvodu.

Tab. 15 Naměřené hmotnosti vzorků před a po zkoušce s vyhodnocením poměrného a délkového opotřebení

Č.	m_1 [g]	m_2 [g]	Δ_m [g]	m_{1e} [g]	m_{2e} [g]	Δ_{me} [g]	ψ_a [-]	ψ_{av} [g/m]
1.	268,065	267,880	0,185	225,413	225,162	0,251	1,3	0,000185
2.	272,046	271,879	0,167	228,553	228,340	0,213	1,5	0,000167
3.	267,608	267,462	0,146	227,550	227,365	0,185	1,3	0,000146
4.	278,756	278,730	0,026	225,797	225,585	0,212	8,2	0,000026
5.	274,397	274,363	0,034	228,449	228,225	0,224	6,5	0,000034
6.	269,308	269,278	0,03	224,898	224,712	0,186	6,2	0,00003
7.	264,429	264,263	0,166	225,617	225,403	0,214	1,3	0,000166
8.	269,746	269,561	0,185	225,340	225,087	0,253	1,4	0,000185
9.	265,502	265,312	0,19	224,974	224,750	0,224	1,2	0,00019
10.	285,555	285,535	0,02	225,917	225,692	0,225	11,3	0,00002
11.	291,498	291,477	0,021	224,110	223,878	0,232	11	0,000021
12.	290,934	290,894	0,04	225,862	225,640	0,222	5,6	0,00004

$$\psi_a = \frac{\Delta m_e}{\Delta m} = [-] \quad (7)$$

$$\psi_{av} = \frac{\Delta m}{l} [\text{g/m}] \quad (8)$$

m_1 – hmotnost vzorku před zkouškou

m_2 – hmotnost vzorku po zkoušce

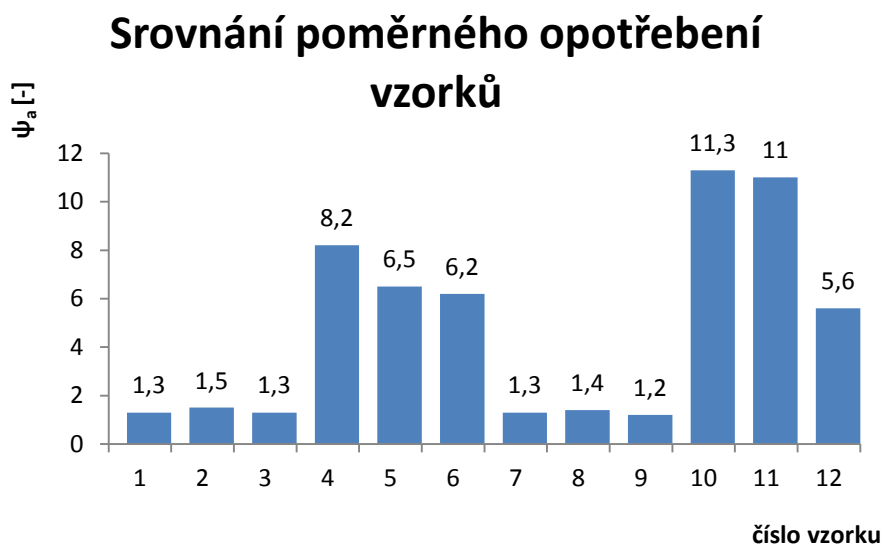
m_{1e} – hmotnost etalonu před zkouškou

m_{2e} – hmotnost etalonu po zkoušce



2.

Obr. 17 Vzorek z materiálu ČSN 12 050 č. 2 po zkoušce



Grafické znázornění poměrného opotřebení

Ze zkoušky abrazivního opotřebení vyplývá, že se poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení u vzorků typu PZ 6159 nezměnila vlivem rozdílných podmínek odvodu tepla a u materiálu Trubrodur 14.70 se průměrná odolnost proti abrazi zvýšila o 40 % vzhledem ke standardně navařeným vzorkům. Tato hodnota je stanovena ze vzorků č 5 a 6 vůči vzorkům 10 a 11. Dále je také patrné, že mnohem lepší odolnost proti abrazivnímu opotřebení mají karbidy M_7C_3 v austenitické matici oproti karbidům wolframu v martenzitické matici se zbytkovým austenitem.

13. Mikrostrukturní změny v povrchových vrstvách opotřebených návarů [8]

Před samotnou zkouškou abrazivního opotřebení byla orientačně změřena v místech budoucího úběru materiálu povrchová tvrdost třemi měřeními na jednom vzorku s následujícími hodnotami uvedené v tab. 16.

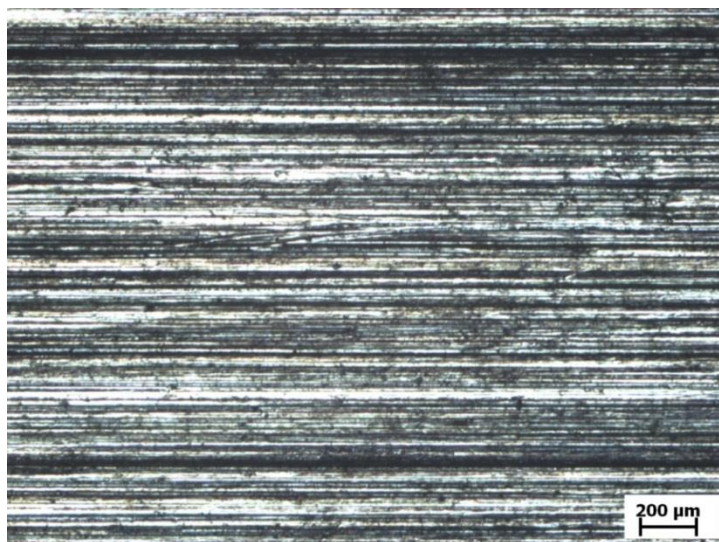
Tab. 16 Povrchová tvrdost vzorků před zkouškou abrazivního opotřebení

Č.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	Etalon
Povrchová	511	532	507	846	801	769	487	495	488	809	791	761	272
tvrdost	541	562	502	737	821	734	442	530	454	773	844	832	277
HV1	510	551	505	810	880	788	491	477	451	761	773	809	277

13.1 Morfologie povrchu

Po zkoušce opotřebením pryžovým kotoučem byly pořízeny snímky povrchu materiálu po interakci s tvrdými částicemi křemenného písku.

Vzorek č. 2



Obr. 18 Rýhovaný povrch vzorku č. 2 po zkoušce

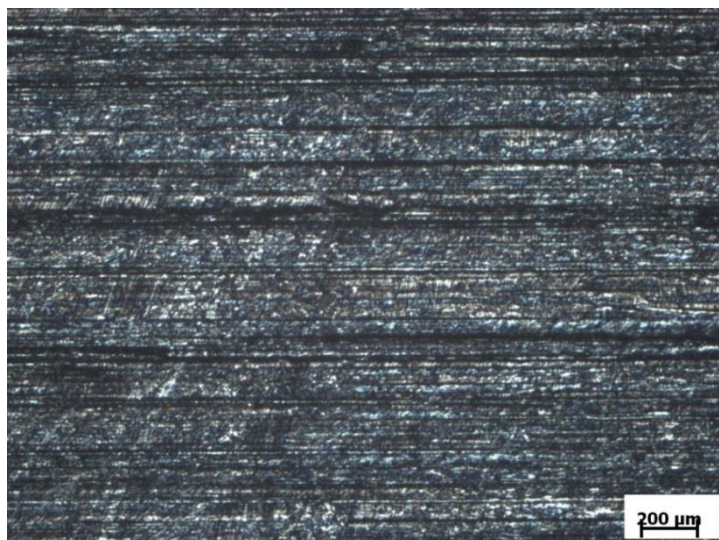
Vzorek č. 8



Obr. 19 Rýhovaný povrch vzorku č. 8 po zkoušce

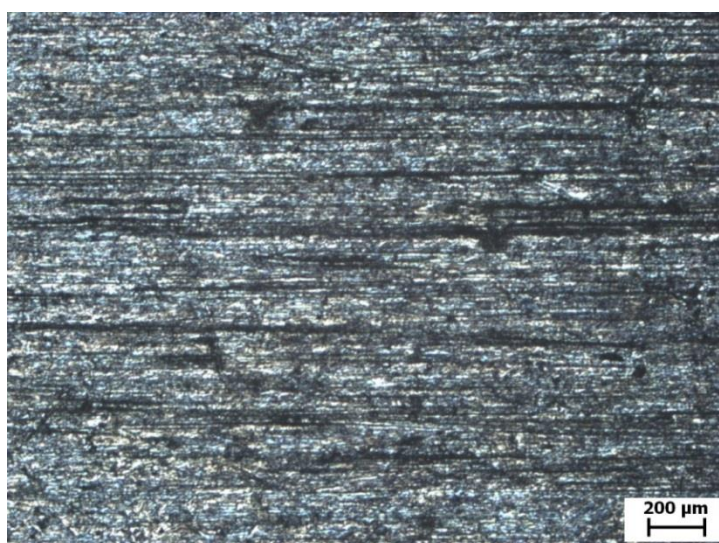
Ve vzorcích č. 2 a 8 není patrný rozdíl v rýhování.

Vzorek č. 5



Obr. 20 Rýhovaný povrch vzorku č. 5 po zkoušce

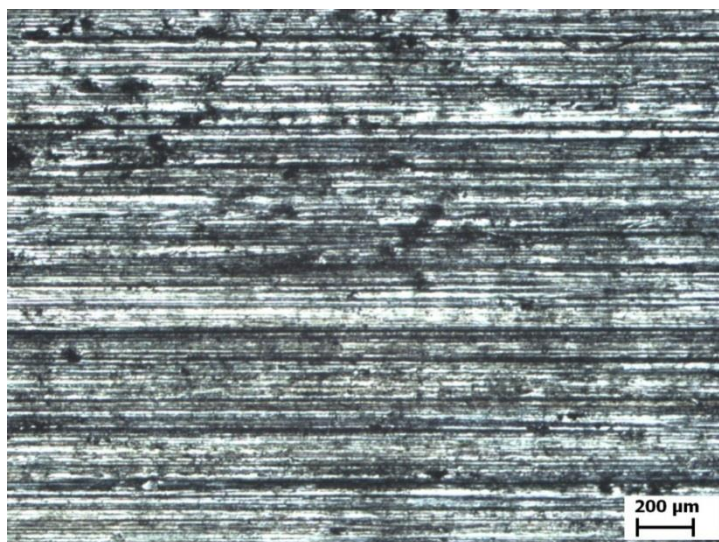
Vzorek č. 11



Obr. 21 Rýhovaný povrch vzorku č. 11 po zkoušce

U vzorků č. 5. a 8. je patrný rozdíl v tom, že v č. 5 jdou vidět hlubší rýhy. V č. 11 jsou rýhy mělké a místy docházelo k vytrhávání větších částic karbidů.

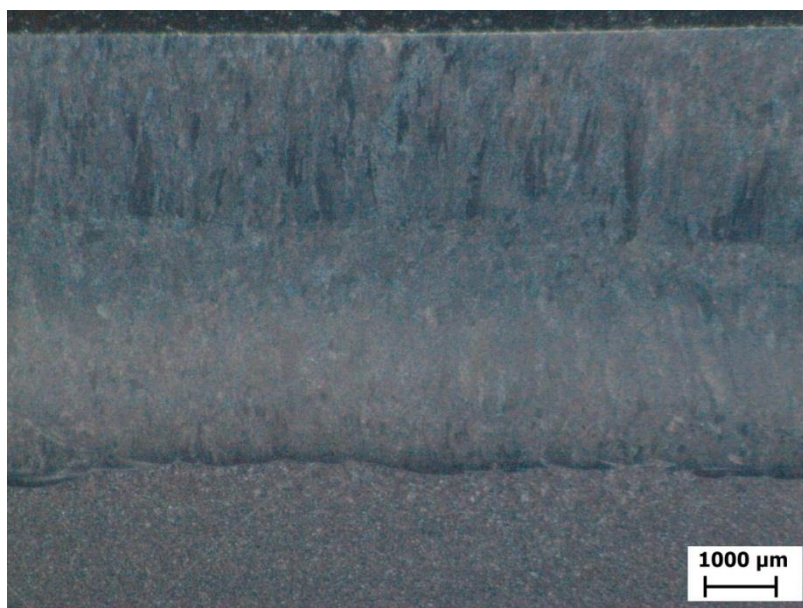
Etalon 12 050



Obr. 22 Rýhovaný povrch etalonového vzorku po zkoušce

13.2 Makrostruktura vzorků

Vzorek č. 2

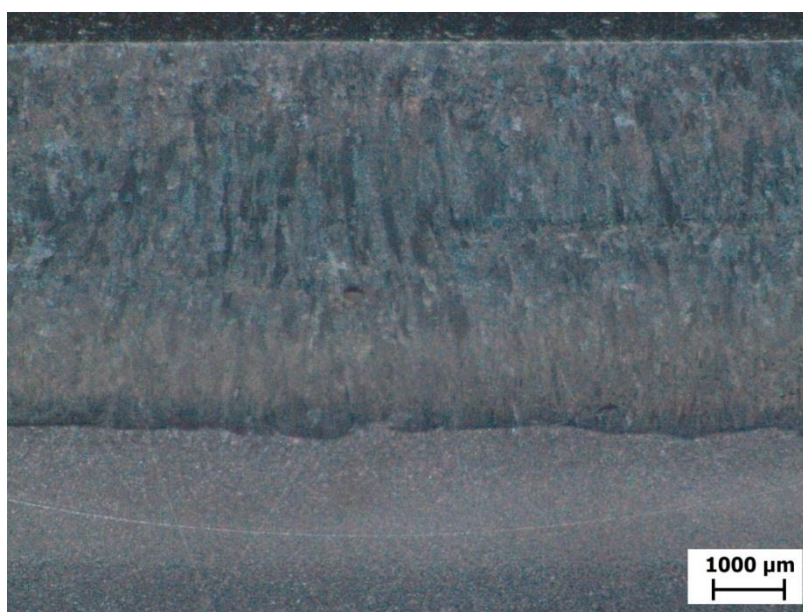


Obr. 23 Dvouvrstvý návar s přechodovou oblastí



Obr. 24 Přejíhodová oblast s tepelně ovlivněnou oblastí

Vzorek č. 8

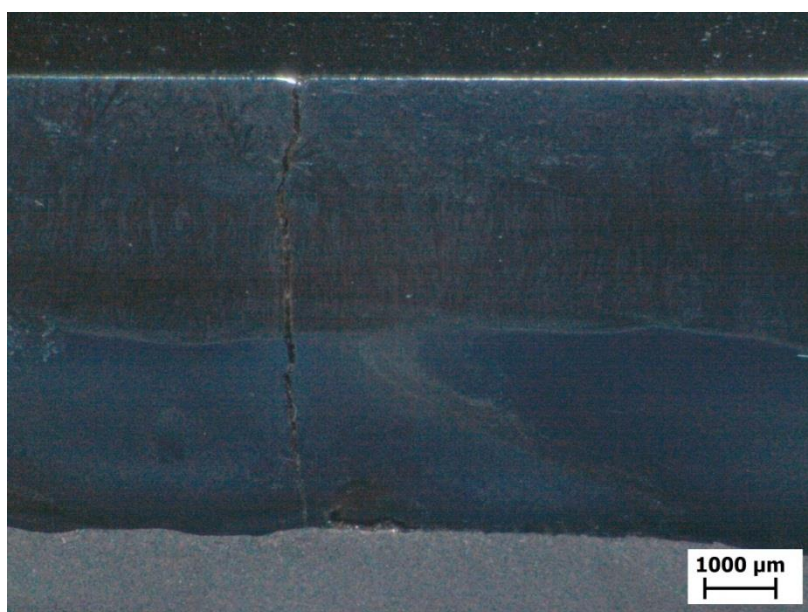


Obr. 25 Dvourstvý návar s přechodovou oblastí



Obr. 26 Přejíhodová oblast s tepelně ovlivněnou oblastí

Vzorek č. 5

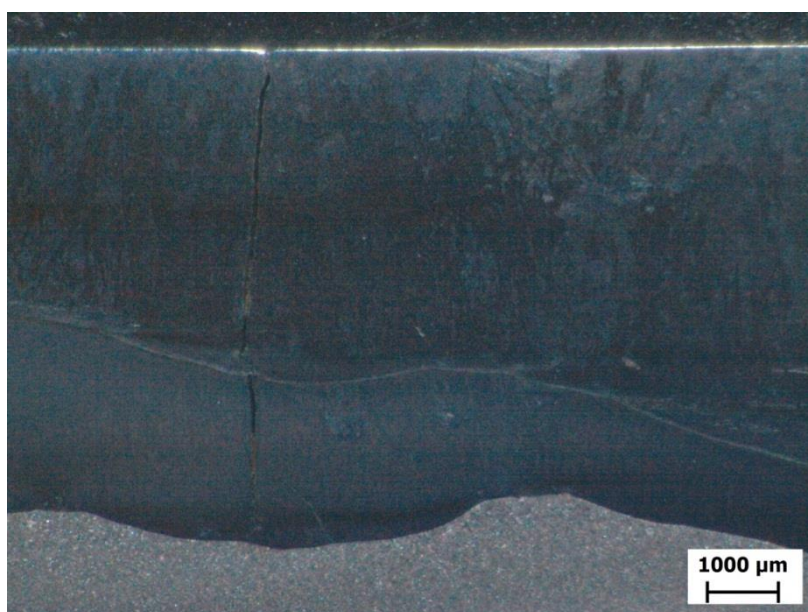


Obr. 27 Dvoustvrstvý návar s přechodovou oblastí

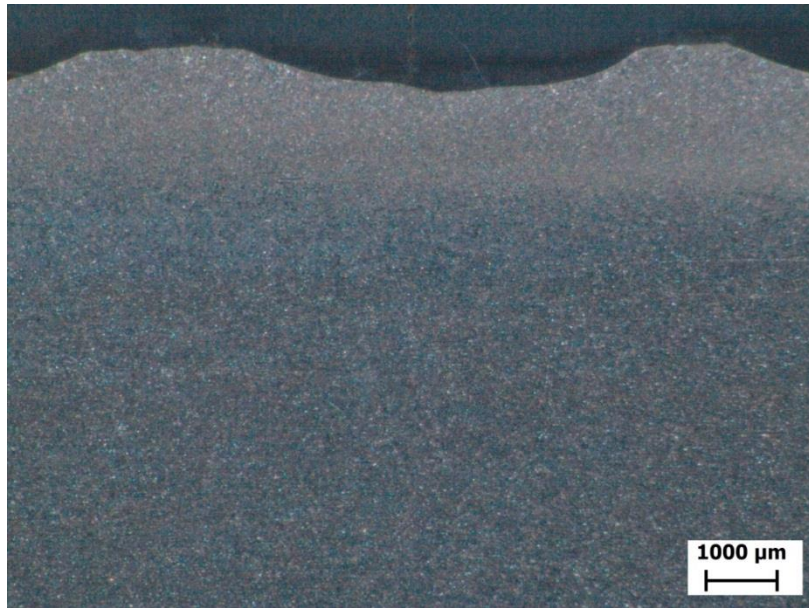


Obr. 28 Přechodová oblast s tepelně ovlivněnou oblastí

Vzorek č. 11



Obr. 29 Dvouvrstvý návar s přechodovou oblastí



Obr. 30 Přechodová oblast s tepelně ovlivněnou oblastí

14. Makrotvrдость

Výsledná tvrdost byla měřena podle Vickerse, kde je indentorem diamantový jehlan se zvoleným zatížením 1 kg (HV 1). Tvrдость byla měřena v ose kolmé k základnímu materiálu ve středu os vybrání od zkoušky abrazivního opotřebení. Jednotlivé vpichy byly odstupňovány po 0,5 mm směrem od povrchu. Měření bylo ukončeno po získání přibližně třech stejných hodnot tvrdosti základního materiálu. Pro srovnání byla změřena tvrdost etalonu, která je vyšší přibližně o 70 HV od údajů deklarovaných výrobcem při normalizačním žíhání. Z měření makrotvrdsti dále vyplývá, že naměřené hodnoty mezi porovnávanými vzorky dosahovaly přibližně stejných výsledků a tudíž lze usuzovat, že vlivem rozdílných rychlostí odvodu tepla z materiálu nemá tento parametr vliv na výslednou makrotvrdsti strukturu.

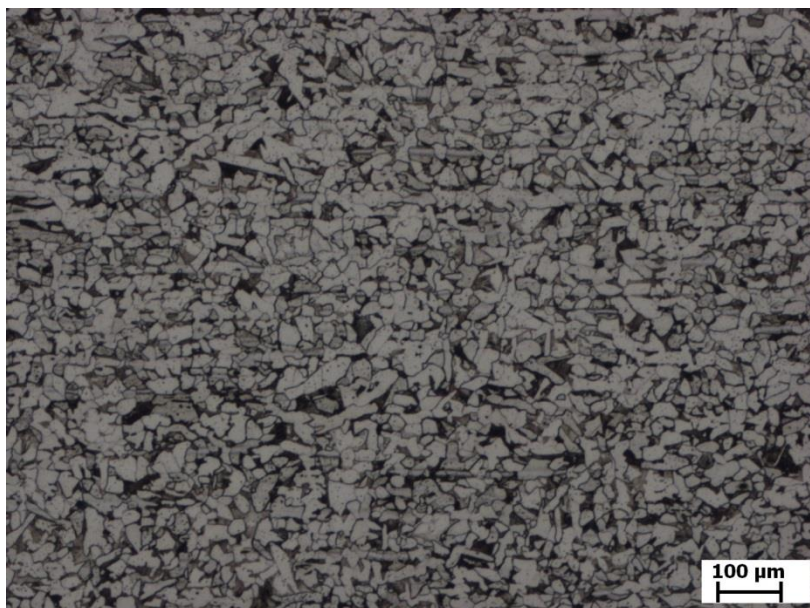
Obr. 17 Naměřené hodnoty makrotvrdosti

Hloubka h [mm]	Vzorek č. 2 [HV1]	Vzorek č. 5 [HV1]	Vzorek č. 8 [HV1]	Vzorek č. 11 [HV1]	12 050 [HV1]
0,5	508	686	447	742	273
1,0	524	788	468	760	265
1,5	479	676	446	784	268
2,0	513	672	483	641	-
2,5	465	677	515	732	-
3,0	502	614	497	730	-
3,5	475	733	511	734	-
4,0	432	818	460	884	-
4,5	374	755	371	900	-
5,0	347	807	430	892	-
5,5	369	856	136	832	-
6,0	453	752	150	784	-
6,5	137	149	143	147	-
7,0	132	150	138	146	-
7,5	128	145	140	140	-

15. Mikrostruktura vzorků [17], [22]

Základní materiál

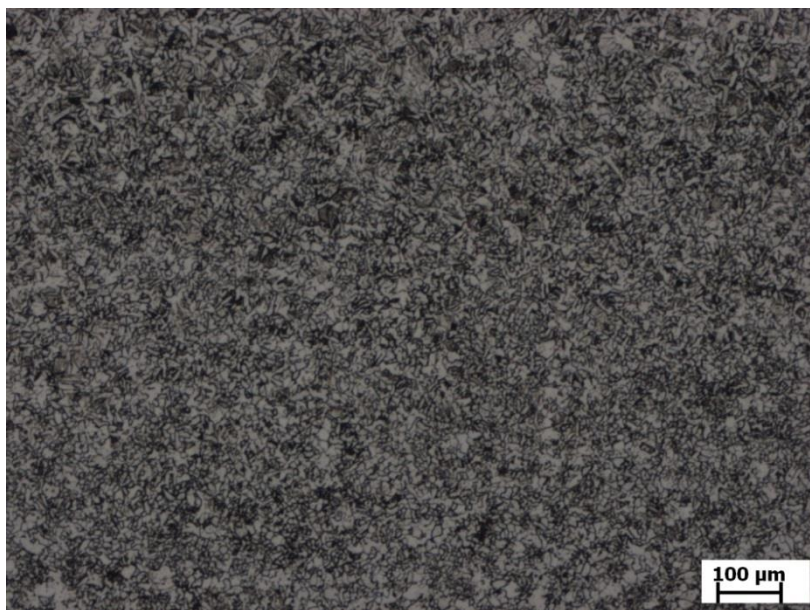
Struktura základního materiálu je pro všechny vzorky stejná, ze snímku mikrostruktury je patrné, že se jedná o feriticko – perlitickou strukturu, která byla vystavena válcování za tepla a jak bylo stanoveno na základě spektrální analýzy, jedná se pravděpodobně podle chemického složení o ocel P250GH.



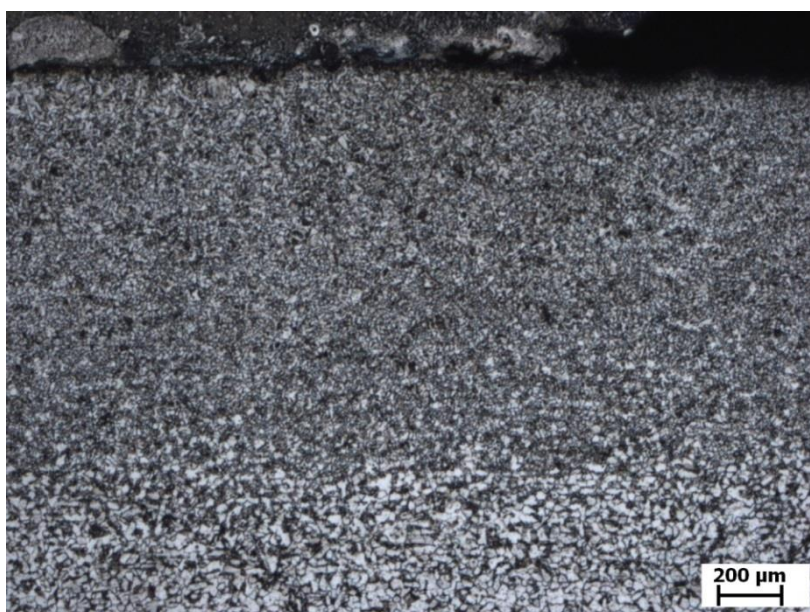
Obr. 31 Mikrostruktura základního materiálu bez tepelného ovlivnění zvětšení 50x



Obr. 32 Mikrostruktura vyžíhané oblasti zvětšení 50x



Obr. 33 Zjemnění zrna v blízkosti svaru zvětšení 50x



Obr. 34 Tepelně ovlivněná oblast s ostrým rozhraním mezi návarem 25x

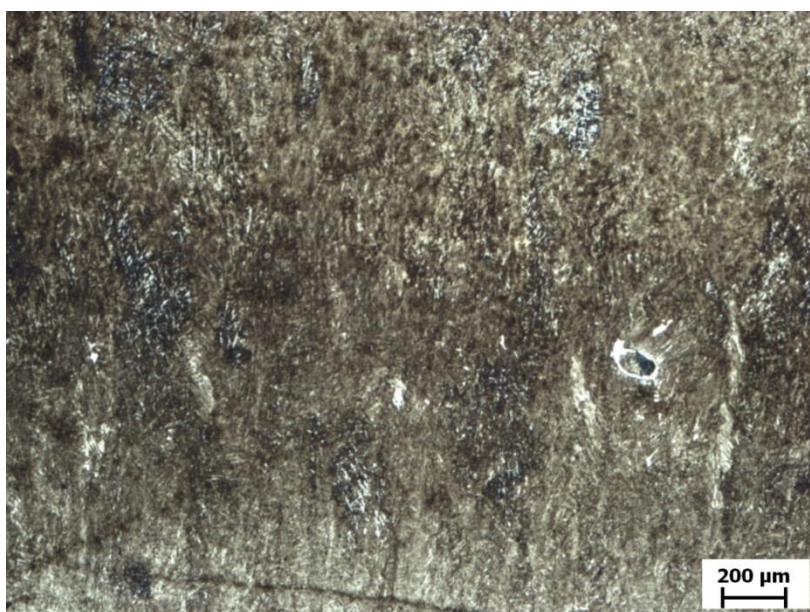
PZ 6159

Struktura návaru typu PZ 6159 je heterogenní směs martenzitu, zbytkového austenitu a jemných karbidů wolframu. V návaru se nevyskytovaly žádné trhliny.

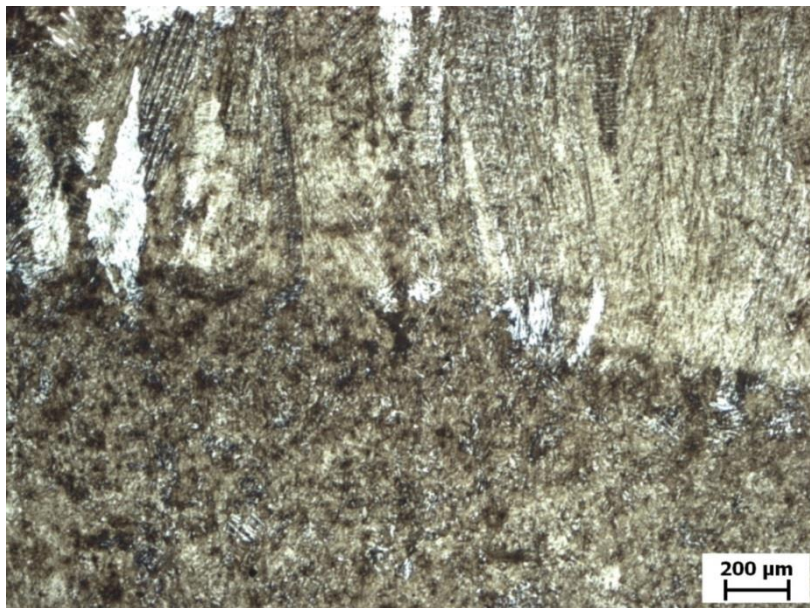
Vzorek č. 2



Obr. 35 Přechodová oblast zvětšení 25x

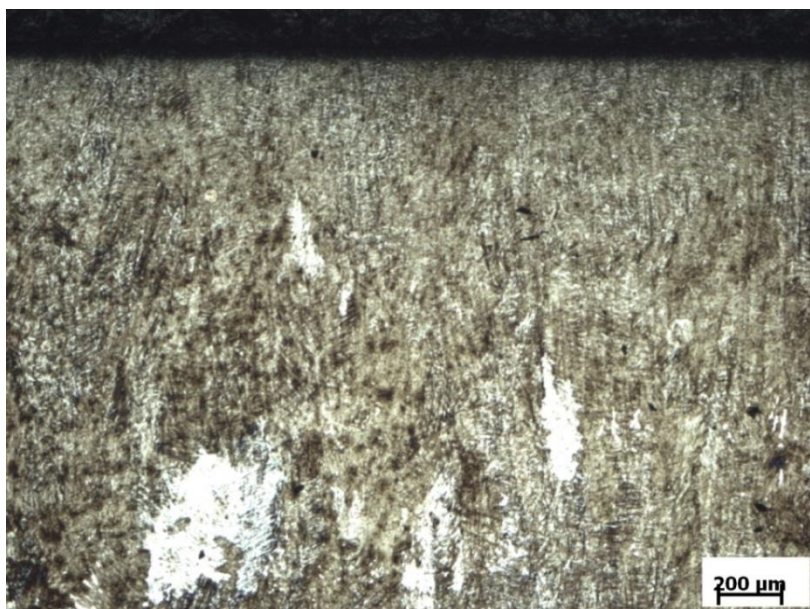


Obr. 36 Struktura první návarové vrstvy zvětšení 25x

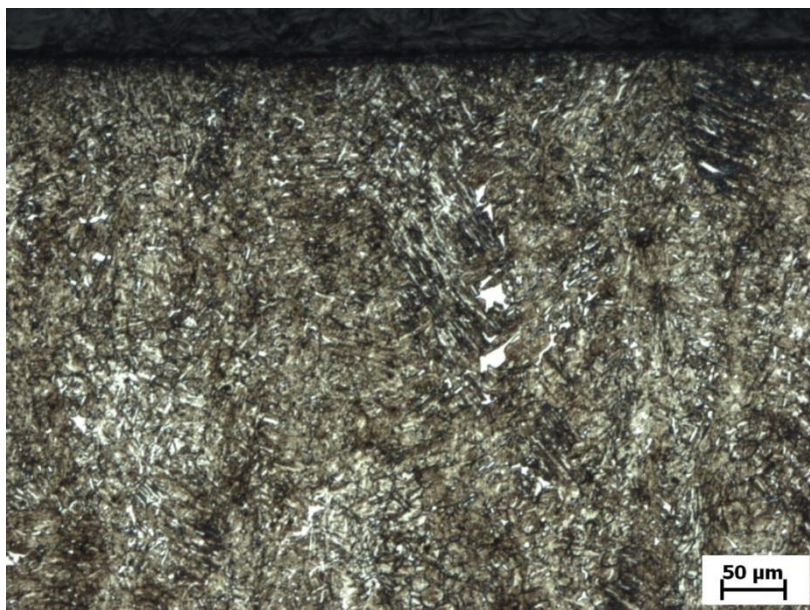


Obr. 37 Rozhraní první a druhé návarové vrstvy zvětšení 25x

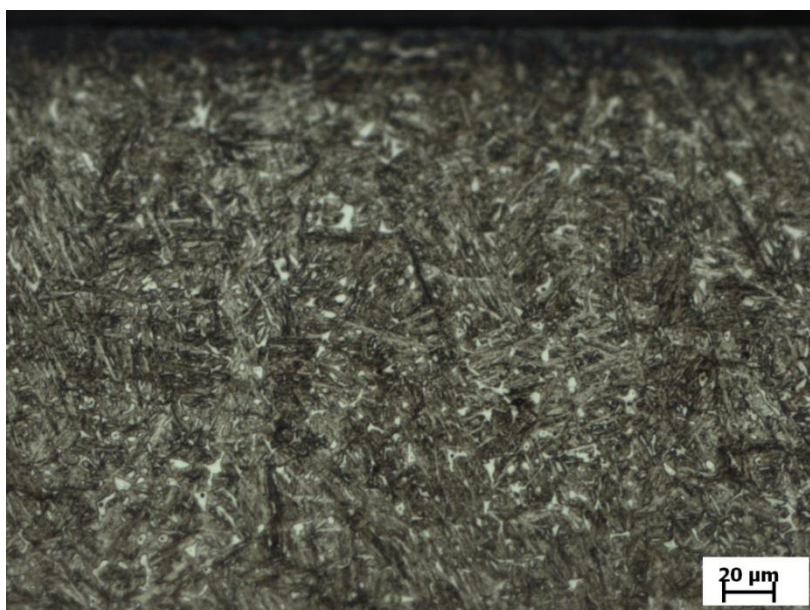
Na základě tepelně ovlivněného základního materiálu došlo také k vyžihání první návarové vrstvy při navařování druhé vrstvy. Naopak u druhé vrstvy se částečně potvrdil předpoklad normálního růstu karbidických zrn, avšak růst nepokračoval až k povrchové vrstvě i po sjednocení povrchu odbroušením.



Obr. 38 Druhá vrstva s kontaktní plochou po zkoušce abrazivního opotřebení zvětšení 25x



Obr. 39 Druhá vrstva s kontaktní plochou po zkoušce abrazivního opotřebení zvětšení 100x



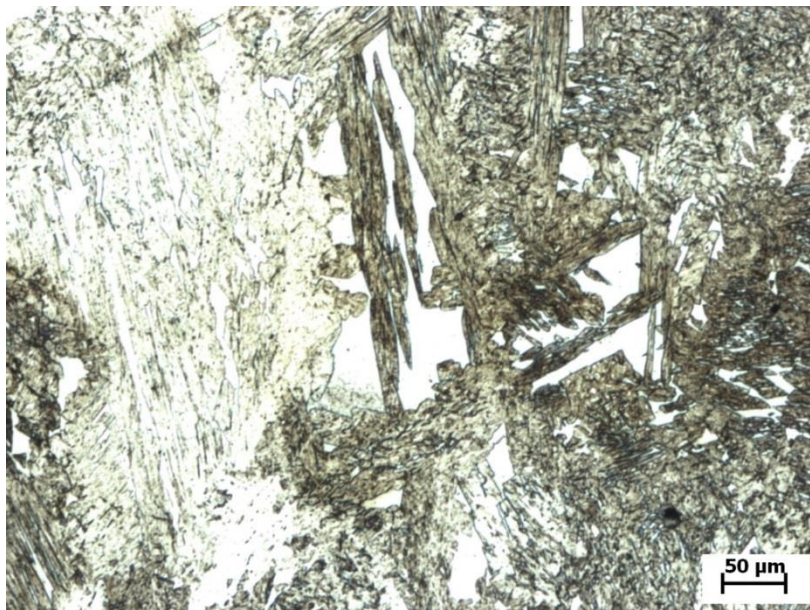
Obr. 40 Druhá vrstva návaru 200 x

Struktura obsahuje drobné karbidy v martenzitické matici se zbytkovým austenitem. Tvrdost světlé oblasti - matrice byla 345 HV 0,1 a makrotvrdost karbidů – tmavé oblasti byla 542 HV 0,1.

Vzorek č. 8

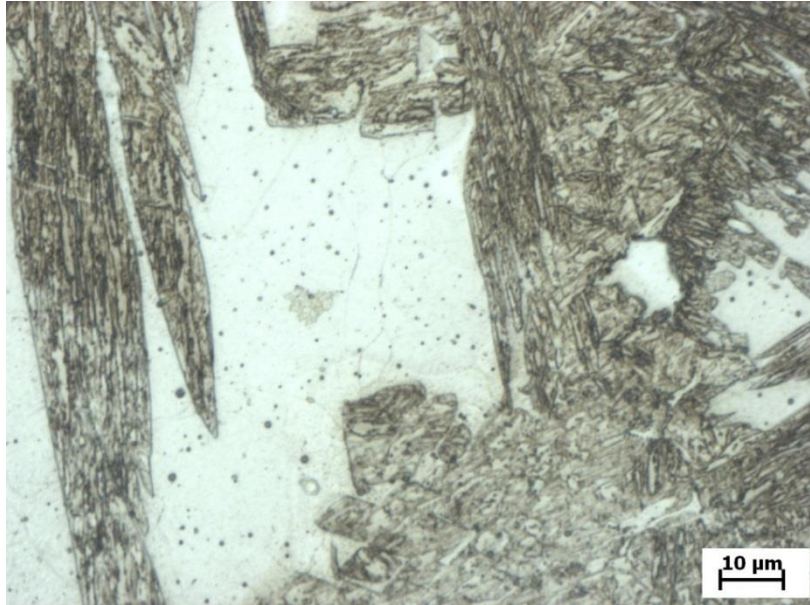


Obr. 41 Struktura první návarové vrstvy zvětšení 100x



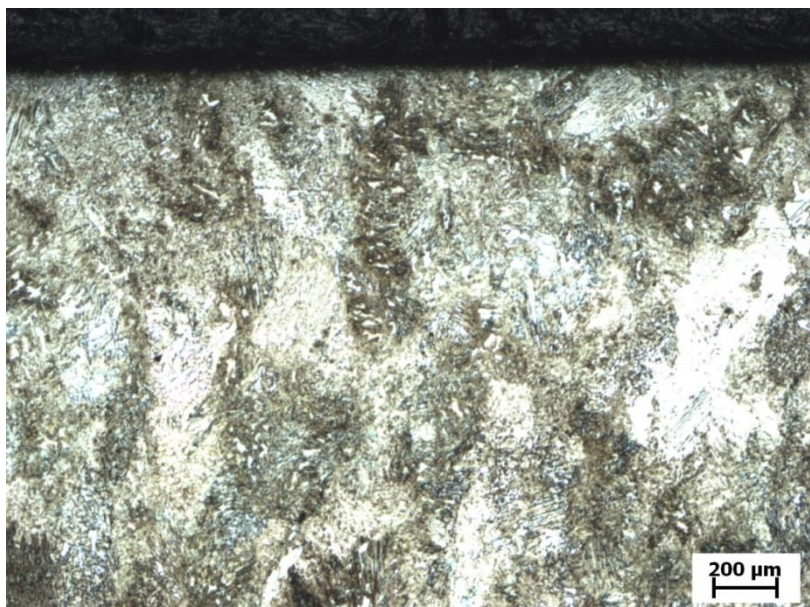
Obr. 42 První vrstva deskový martenzit-karbid zvětšení 100x

V první vrstvě se nacházela podobná struktura jako v poslední vrstvě u vzorku č. 8, to bylo pravděpodobně dáno vyšším odvodem tepla do základního materiálu, i když z něj nebylo nuceně odváděno teplo.

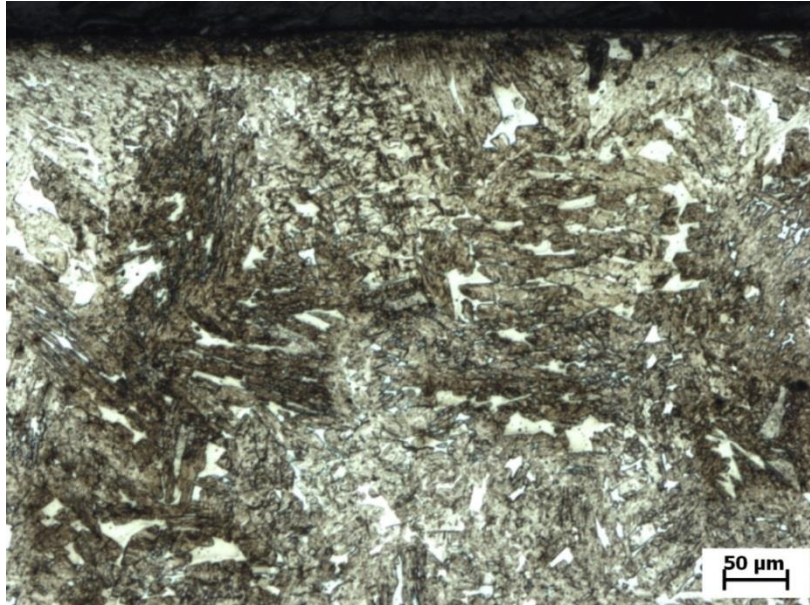


Obr. 43 První návarová vrstva zvětšení 500x

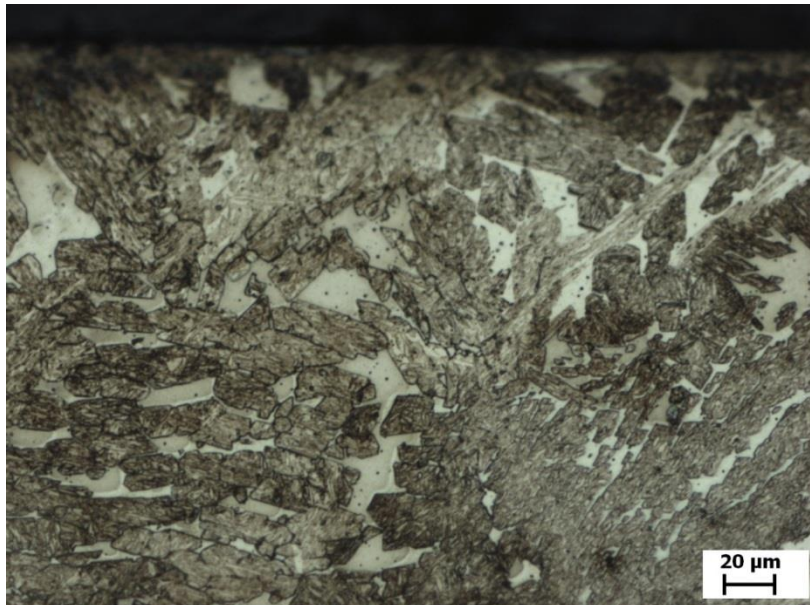
V první vrstvě návaru se vyskytovaly útvary, které byly výrazně světlejší a měly větší rozměr oproti ostatním útvarům ve struktuře. Pravděpodobně se bude jednat o nízkouhlíkový martenzit. U těchto útvarů bylo provedeno měření tvrdosti a zjistilo se, že maximální tvrdost je 416 HV1 a minimální 332 HV1, což je o něco méně, než bylo zjištěno celkovou makrotvrdostí v této návarové vrstvě.



Obr. 44 Druhá vrstva s kontaktní plochou po zkoušce abrazivního opotřebení zvětšení 25x



Obr. 45 Druhá vrstva s kontaktní plochou po zkoušce abrazivního opotřebení zvětšení 100x



Obr. 46 Druhá vrstva s kontaktní plochou po zkoušce abrazivního opotřebení zvětšení 200x

Ve vodě ochlazovaném vzorku se vytvořila odlišná struktura v tom, že se vytvořilo více světlých oblastí s mikrotvrdostí 342 HV 0,1. Oproti tomu, tmavá místa, kde nešlo změřit mikrotvrdost jednotlivých karbidů, dosahovaly makrotvrdosti 572 HV 0,1, což pravděpodobně odpovídá karbidům wolframu s tím rozdílem, že se nepodařilo změřit jejich mikrotvrdost vlivem malých rozměrů, jež by měla dosahovat kolem 1900 HV. Tento rozdíl ve vztahu k vzorku č. 2 se nijak neprojevil při zkoušce abrazivního opotřebení. Mimo jiné se při tomto způsobu odvodu tepla nepodařila vytvořit struktura, která by měla karbidy v povrchové

vrstvě orientované normálově k základnímu materiálu, a tudíž orientací karbidů nejde objektivně posoudit vliv na odolnost proti abrazivnímu opotřebení.

Trubrodur 14.70 [4] [18]

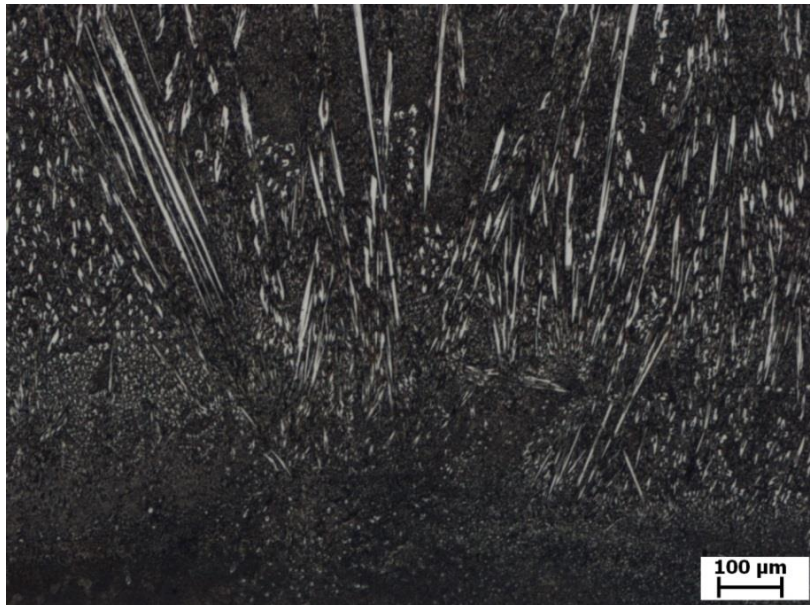
Pro strukturu bílých litin, čemuž odpovídá návar Trubrodur 14.70, při poměru Cr/C = 3-10 se podíl karbidů stanoví lineární rovnicí:

$$K [\%] = 12,33 \cdot C + 0,55 \cdot Cr - 15,2$$

$$K = 12,33 \cdot 3,5 + 0,55 \cdot 22 - 15,2 = 40,1 \% \quad (9)$$

Z výpočtu vyplývá, že návarová struktura obsahuje 40,1 % karbidů a 59,9 % základní matrice. Struktura při tomto chemickém složení obsahuje martenziticko – austenitickou matici, v níž jsou rozptýleny primární karbidy M_7C_3 a MC karbidy. Následně po ukončení procesu navařování se na povrchu jednotlivých vrstev začaly objevovat trhliny viz. obr. 27, 29, které v některých případech vedly až k základnímu materiálu. Tyto trhliny nemají vliv na funkci návaru.

Vzorek č. 5



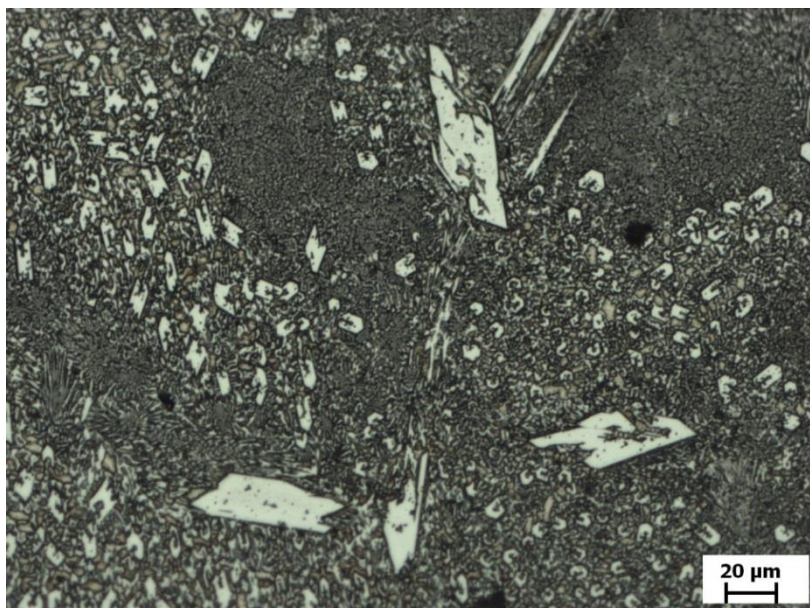
Obr. 47 Rozhraní prvního a druhého návaru zvětšení 50x

Ze snímku je patrné rozhraní mezi první a druhou vrstvou návaru, vzniklé jehlice karbidů směřují normálově od rozhraní návarů. Povrch první vrstvy je rovněž vyžíhaný, jako u předchozích vzorků. Usměrnění jehlic je zapříčiněno rychlejším odvodem tepla do materiálu.



Obr. 48 Druhá vrstva s kontaktní plochou po zkoušce abrazivního opotřebení zvětšení 50x

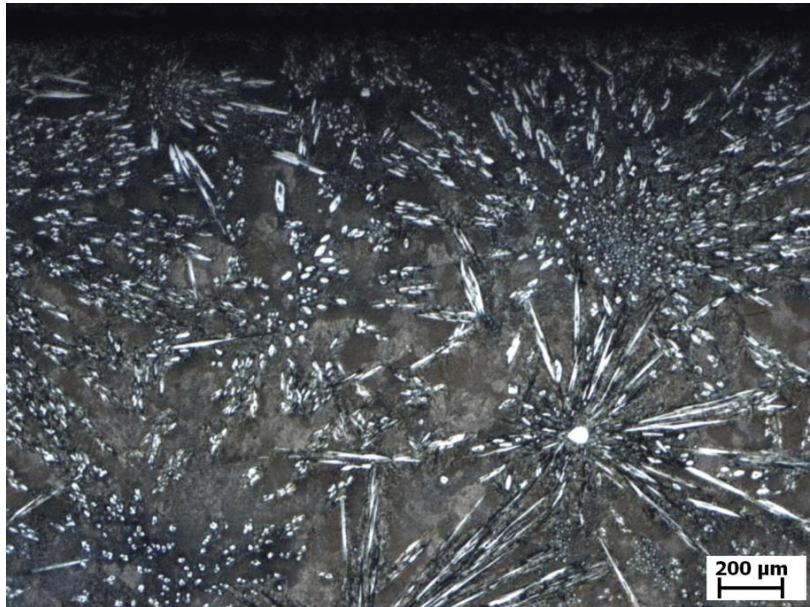
Ze snímku je patrné rozložení jemnějších karbidů, které jsou znázorněny světlejší barvou.



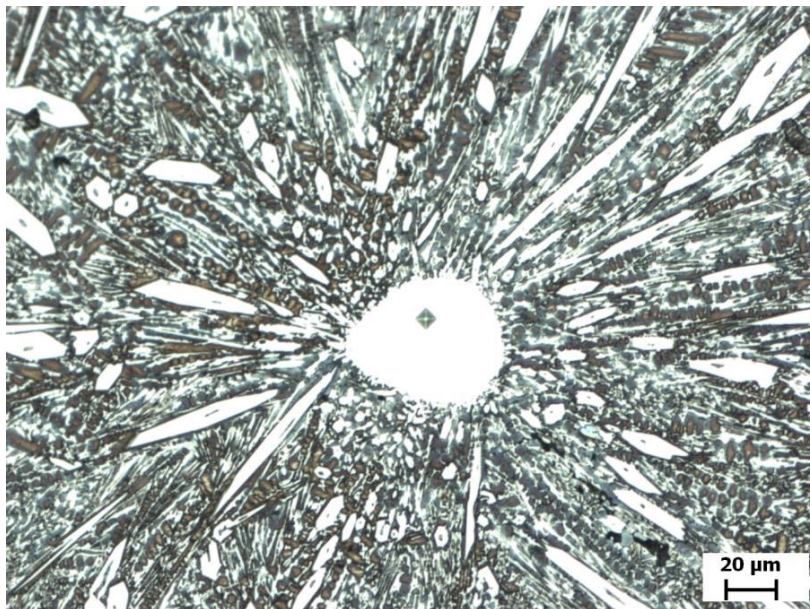
Obr. 49 Struktura návaru pod povrchem zvětšení 25x

Ve vzorku č. 5 se vytvořily menší karbidy, jejich rozprostření je rovnoměrnější. Největší karbidy měly mikrotvrdot 1100 HV 0,1 a jemně rozprostření menší karbidy měly průměrnou tvrdost 729 HV 0,1. Matrice vykazovala mikrotvrdot průměrně 670 HV 0,1.

Vzorek č. 11

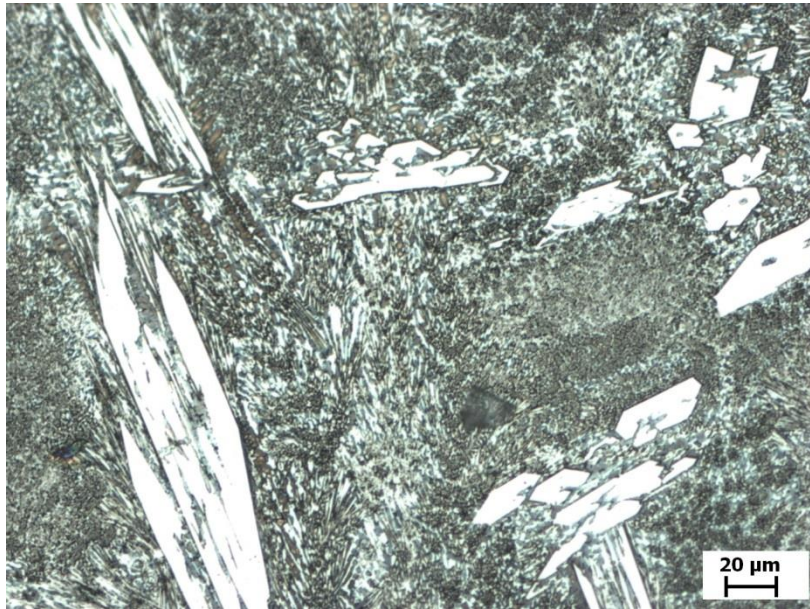


Obr. 50 Druhá vrstva s kontaktní plochou po zkoušce abrazivního opotřebení zvětšení 25x

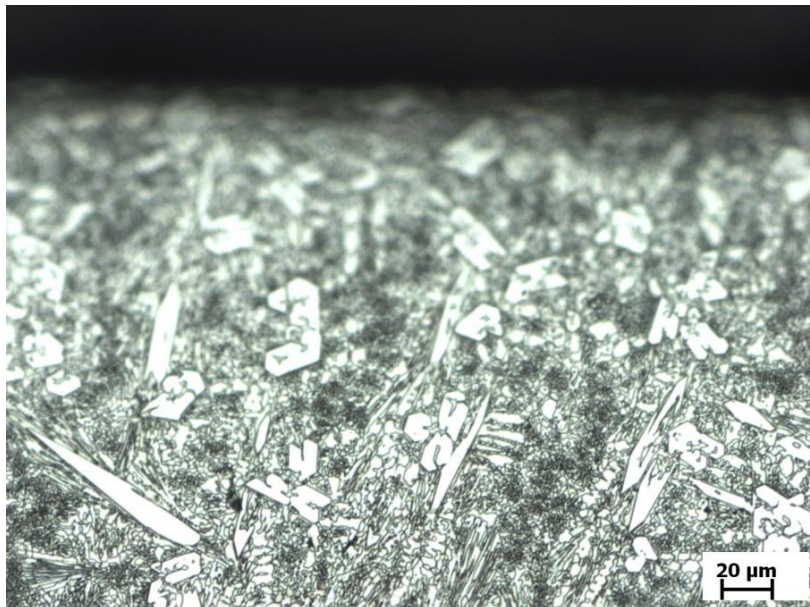


Obr. 51 Střed hvězdčovitěho útvaru s vpichem po indentoru zvětšení 200x

Ve struktuře se vyskytovaly karbidy, které vystupovaly z jednoho světlého bodu, u kterého byla naměřena mikrotvrdość 2478 HV_{0,1}. Vznik toho útvaru byl pravděpodobně zapříčiněn místním teplotním gradientem. Tvrdość karbidů kolem hvězdice byla kolem 1450 HV_{0,1}



Obr. 52 Rozmístění a velikost karbidů zvětšení 200 x

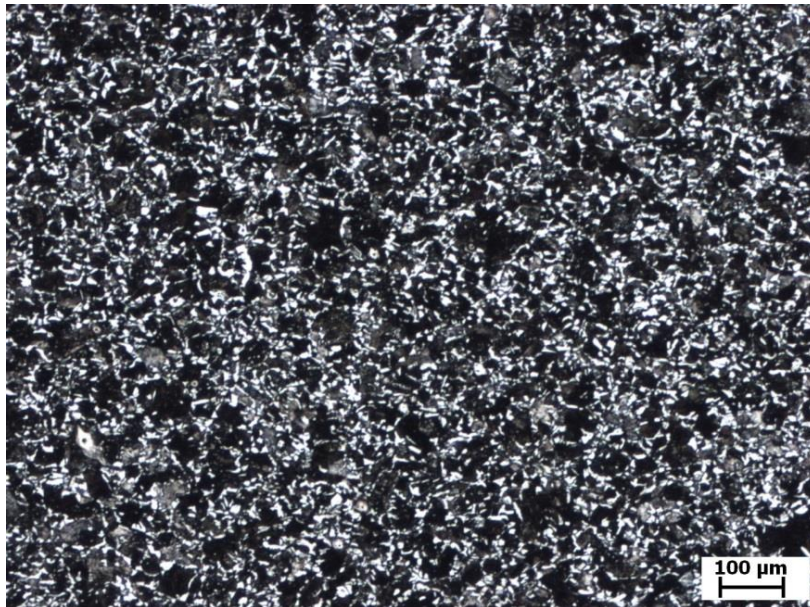


Obr. 53 Druhá vrstva s kontaktní plochou po zkoušce abrazivního opotřebení zvětšení 200x

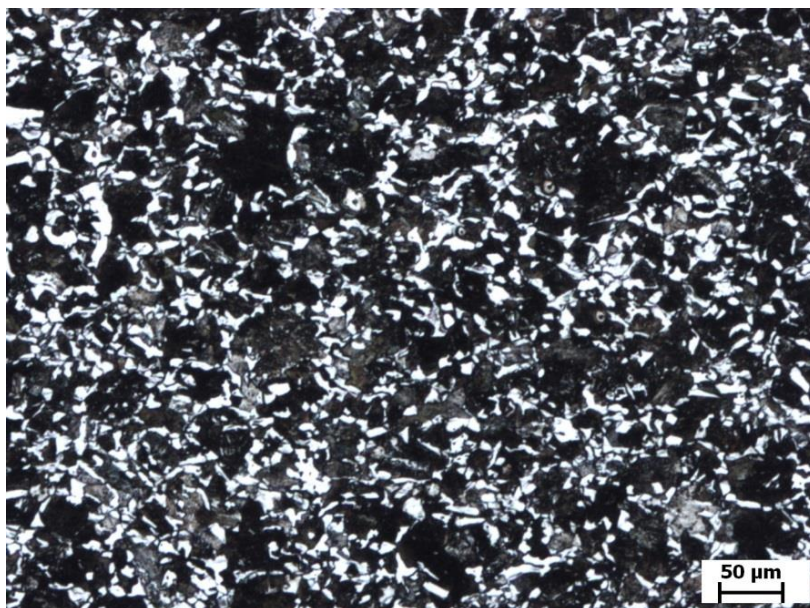
Tvrдость matrice, na obrázku znázorněna tmavou barvou byla 880 HV_{0,1} a tvrдость podlouhlých bílých karbidů byla průměrně 1600 HV_{0,1}. Rozdíl mezi vzorkem č. 5 je ve vytvoření větších karbidů. Tento rozdíl ve velikosti karbidů je pravděpodobně příčina, proč návar, zhotovený při rychlejším ochlazením má vyšší schopnost odolávat tříbodové abrazi. Rovněž jako u materiálu PZ 6159 se nepovedlo vytvořit strukturu, která by měla karbidy v povrchové vrstvě orientované kolmo k základnímu materiálu, a tudíž se odolnost proti abrazivnímu opotřebení vlivem směrové orientace karbidů nepodařila prokázat.

Etalon – 12 050

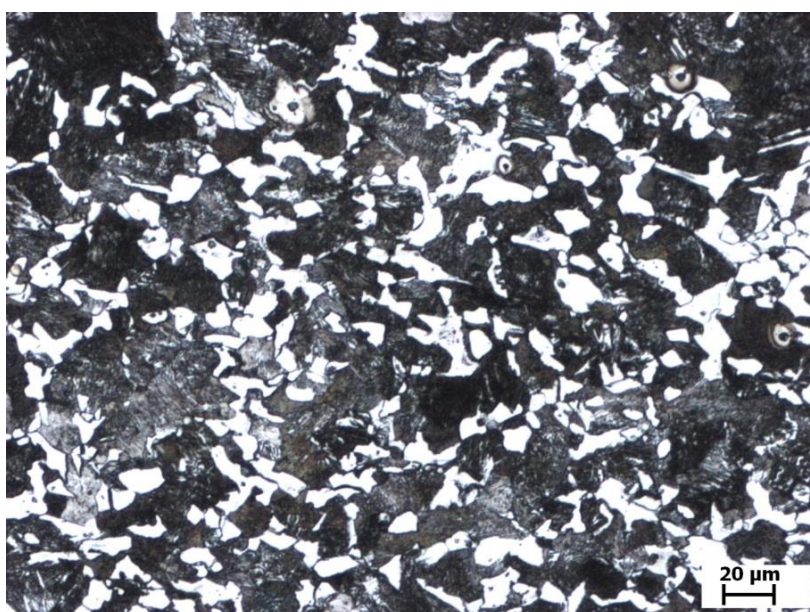
Mikrostruktura etalonového vzorku je čistě feriticko – perlitická. Struktura není nijak tepelně ovlivněná od přípravy povrchu broušením. Tento materiál je primárně určen k zušlechtní.



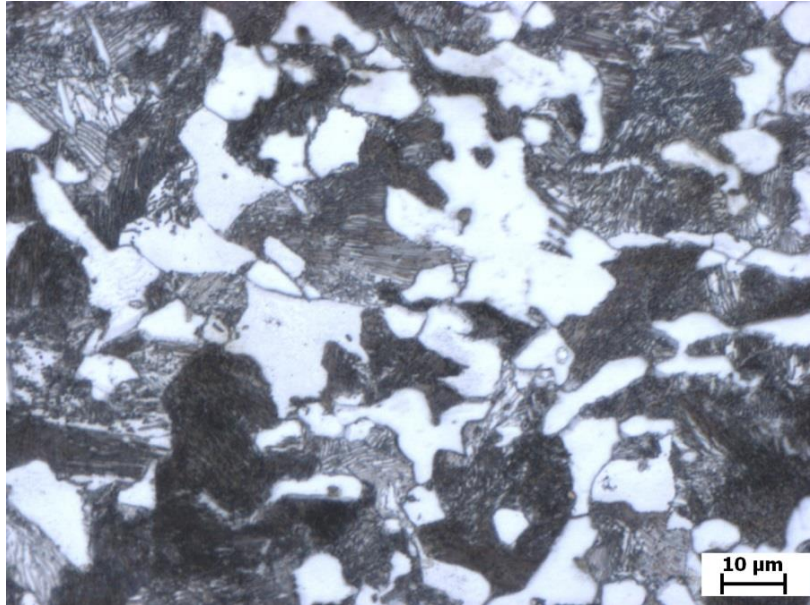
Obr. 54 Mikrostruktura oceli 12 050 zvětšení 50x



Obr. 55 Mikrostruktura oceli 12 050 zvětšení 100x



Obr. 56 Mikrostruktura oceli 12 050 zvětšení 200x



Obr. 57 Mikrostruktura oceli 12 050 zvětšení 500x

16. Zhodnocení experimentu

U dvou typů návarových slitin, jeden obsahoval karbidy wolframu a druhý karbidy chromu, se nepodařila prokázat přímá závislost mezi směrovou orientací karbidů a opotřebením materiálu kvůli nedosažení požadovaných strukturních změn, které měly vzniknout odlišnými ochlazovacími podmínkami při navařování slitin. To bylo zřejmě způsobeno nedostatečným odvodem tepla ze vzorků, které byly ochlazovány ve vodě nebo i způsobem nanášení svarového kovu, jenž bylo realizováno s rozkyvem, čímž došlo k tepelnému ovlivnění již naneseného kovu a rozpadem vytvořené struktury.

Návarový materiál PZ 6159 vykazoval stejnou odolnost proti abrazivnímu opotřebením jak při ochlazování na vzduchu, tak při ochlazování ve vodě. Rozdíl byl pouze patrný v odlišné mikrostruktuře návaru, kdy vzorek ochlazovaný ve vodě vykazoval méně rovnoměrné rozmístění karbidů wolframu v martenzitické matici.

U materiálu typu Trubrodur 14.70 byla situace odlišná v tom, že vzorek, jenž byl ochlazován ve vodě, měl při zkoušce na přístroji s pryžovým kotoučem výrazně lepší poměrnou odolnost proti abrazivnímu opotřebením a to o 40 %. Tento nárůst odolnosti proti opotřebením byl pravděpodobně způsoben vznikem rozměrově větších karbidů, které se vytvořily rychlejším odvodem tepla z materiálu. Dále se ve struktuře nacházely hvězdicovité útvary, kde jednotlivé paprsky byly orientované z jednoho bodu. Naměřená mikrotvrдость středu hvězdicce byla 2478

HV0,1, tím se pravděpodobně jedná o vytvoření karbidu VC, který tato slitina obsahuje v malém množství.

Celková naměřená makrotvrdost obou materiálů byla přibližně stejná a rozdílné podmínky ochlazování se zde neprojevily. Tím zároveň nebyla prokázána závislost mezi tvrdostí a poměrné abrazivní odolnosti

17. Závěr

Jednou z nejčastějších příčin omezující spolehlivost a životnost strojů a zařízení je opotřebení. Opotřebení způsobuje zhoršení funkce zařízení, což může vést k jeho předčasnému vyřazení nebo úplnému porušení. Opotřebení je definováno podle normy ČSN 01 5050 jako nežádoucí změna povrchu nebo rozměrů tuhých těles, způsobená buď vzájemným působením funkčních povrchů, nebo funkčního povrchu a média. Projevuje se jako odstraňování nebo přemísťování částic hmoty z funkčního povrchu mechanickými účinky, popřípadě doprovázenými i jinými vlivy (např. chemickými, elektrochemickými nebo elektrickými). Takto způsobené škody jsou příčinou velkých ztrát a dají se přirovnat jen ke škodám vzniklých následky koroze.

V rámci diplomové práce byla stavba přístroje s pryžovým kotoučem, jehož funkčnost se potvrdila při zkoušce abrazivního opotřebení. Zařízení slouží k hodnocení procesů, které nastávají při interakci tvrdých částic s povrchem zkoumaného materiálu. Přístroj byl sestaven podle normy ASTM G65.

Jako hlavní cíl práce bylo stanovení vlivu rychlosti ochlazování dvou návarových slitin od firmy Esab Vamberk, s.r.o, ve kterých jsou obsaženy prvky W a Cr na orientaci karbidů, které vzniknou při standartním způsobu ochlazování na vzduchu a na vzorcích, jež byly z části ponořeny do vodní lázně pro rychlejší odvod tepla. Odlišná orientace karbidů měla prokázat vyšší otěruvzdornost proti opotřebení těch vzorků, které nejrychleji odváděly teplo. Tato skutečnost se neprokázala nejspíše vlivem nízkého odvodu tepla v kombinaci s navařováním rozkyvem, kde docházelo k druhotnému tepelnému ovlivnění vlivem překrývání svarových housenek. Vyšší odolnost proti opotřebení se projevila pouze u návaru obsahující karbidy chromu, což bylo pravděpodobně způsobeno, jak vyplývá z mikrostrukturních snímků vytvořením větších karbidů oproti vzorkům chladnoucích přirozeně na vzduchu, ve kterých se nacházely spíše jemnější karbidy. U návarů s výskytem karbidů wolframu k žádnému zvýšení odolnosti proti opotřebení nedošlo, i přes odlišnou změnu struktury, u které měly karbidy

větší tendenci se shromažďovat a mezi nimi vytvářet „světlejší místa“ nejspíše nízkouhličkového martenzitu o nižší tvrdosti.

18. Použitá literatura

- [1] VOCEL, M., DUFEK, V. a kolektiv. *Tření a opotřebení strojních součástí*. Praha: SNTL, 1976. ISBN 04-224-76.
- [2] SUCHÁNEK, J., KUKLÍK, V., ZDRAVECKÁ, E., *Abrazivní opotřebení materiálů*. Praha, 2007. ISBN 978-80-01-03659-4.
- [3] VOCEL, M. A KOLEKTIV. *Vybrané metody pro hodnocení opotřebení materiálu*. Praha: , 1987.
- [4] www.konstrukce.cz. *Konstrukce*. [online]. 16. 6. 2015 [cit. 2015-06-16]. Dostupné z: http://www.konstrukce.cz/UserFiles/files/K/2009/abraz_01.pdf
- [5] SUCHÁNEK, J. Kavitační opotřebení. Tribotechnika [online]. © 2008-2013 [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12011/kavitačni-opotrebeni.html>
- [6] N. N. Katalog přídatných materiálů pro svařování. Páté přepracované vydání. ESAB VAMBERK, s.r.o. 29.2.2012, 134 s.
- [7] ZDRAVECKÁ, E, TKÁČOVÁ, J. Možnosti riešenia abrazívneho opotrebenia v technickej praxi. Tribotechnika. 2011, roč. IV, č. 1, s. 40-42. ISSN 1338- 0524.
- [8] KOZÁK, J. *vliv rozmístění částic karbidu wolframu v návaru na odolnost proti opotřebení*, Esab Vamberk; Ed.; 2015.
- [9] PANÁČEK, T. vliv parametrů navařování na vlastnosti otěruvzdorných slitin. Bakalářské práce, FS ČVUT v Praze, 2013.
- [10] SUCHÁNEK, J. Problematika abrazivní opotřebení, Podklady pro výuku kurzu IWE FS ČVUT v Praze, 2015
- [11] HRBÁL, P., *Zváranie oblúkom v opravarenstve*, Bratislava:Alfa n. p. 1969, První vydání, ISBN 63-041-69
- [12] DOUBEK, P. Abrazivní a erozivní opotřebení. Diplomová práce, Mendelova Univerzita v Brně agronomická fakulta, 2010.

- [13] LIŠKA, J. Degradace strojírenských materiálů opotřebením. Disertační práce, Mendelova univerzita v Brně Agronomická fakulta Ústav techniky a automobilové dopravy, 2012.
- [14] CHOTĚBORSKÝ, R. Effect of heat treatment on the microstructure, hardness and abrasive wear resistance of high chromium hardfacing. *CAAS* 2013, 59 (1), 23–28.
- [15] KOTECKI, D. J.; OGBORN, J. S. Abrasion resistance of iron-based hardfacing alloys. *Welding research supplement* 1995, 269–278.
- [16] CHOTĚBORSKÝ, R.; HRABĚ, P.; KABUTEY, A. The effect of microstructure of the hypoeutectic Fe-Cr-C hardfacing on abrasive wear. *Scientia agriculturæ bohémica* **2011**, 42 (3), 127–132.
- [17] SABET, H.; KHIERANDISH, S.; MIRDAMADI, S.; GOODARZI, M. The Microstructure and Abrasive Wear Resistance of Fe–Cr–C Hardfacing Alloys with the Composition of Hypoeutectic, Eutectic, and Hypereutectic at $Cr/C = 6$. *Springer Science+Business Media* 2011, 42, 237–245.
- [18] CORREA, E. O.; ALCANTARA, N. G.; TECCO, D. G.; KUMAR, R. V. The Relationship between the Microstructure and Abrasive Resistance of a Hardfacing Alloy in the Fe-Cr-C-Nb-V System. *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International* **2007**, 38,
- [19] N. N. Dry Sand Rubber/Wheel Abrasion Test (ASTM G 65). Nova Swiss. [online].
13. 2. 2015 [cit. 2015-02-13] Dostupné z: <http://www.novaswiss.ch/>
- [20] ASTM G105 – 02(2007). *Standard Test Method for Conducting Wet Sand/Rubber Wheel Abrasion Tests*. West Conshohocken: ASTM International, 2007. 9 p..
- [21] ASTM G65 – 04(2010). *Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*. West Conshohocken: ASTM International, 2010. 12 p
- [22] LAPOINTE, F.; DALLAIRE, S. Erosion and Abrasion Resistance of Boride and Carbide-Based Weld Overlays. *ASM International* 2003, 421–426.

Seznam obrázků

Obr. 1 Působení pevně vázaných abrazivních částic na opotřebovávaný povrch [5]	11
Obr. 2 Typické případy během abrazivní opotřebení z leva rýhování, mikrořezání a mikrořezání s tvorbou mikrotrhlin [7].....	12
Obr. 3 a) dvoubodové abrazivní opotřebení, b) tříbodové abrazivní opotřebení [12]	13
Obr. 4 Schématické zobrazení tvorby otěru u křehkého materiálu šířením bočních trhlin z dolních partií plasticky deformované oblasti pod rýhou podle Evanse [2]	14
Obr. 5 Zjednodušený model interakce abrazivní částice s opotřebovávaným povrchem podle Rabinowicze. Při pohybu kužele po dráze l se odstraní objem materiálu [2]	14
Obr. 6 Vliv poměru tvrdosti abraziva H_a a tvrdosti opotřebovávaného materiálu H_m na objemový otěr W_o a poměrovou odolnost proti abrazivnímu opotřebení ψ_a [10].....	16
Obr. 7 Objemový otěr žíhané nízkouhlíkové oceli v závislosti na velikosti abrazivních částic a zatížení [10].....	19
Obr. 8 Princip činnosti přístroje s brusným plátnem.....	27
Obr. 9 Princip činnosti přístroje s pryžovým kotoučem.....	28
Obr. 10 Přístroj s pryžovým kotoučem	32
Obr. 11 Detail pákového mechanismu s upnutým vzorkem v držáku	33
Obr. 12 Detail pryžového kotouče a upínání vzorků.....	33
Obr. 13 Otryskaný základní materiál P250GH	37
Obr. 14 Proces automatizovaným navařováním pomocí robotického zařízení.....	38
Obr. 15 Vzorek po navaření s vodním ochlazováním a se zapojeným termočlánkem	38
Obr. 16 Vzorky po navaření.....	39
Obr. 17 Vzorek z materiálu ČSN 12 050 č. 2 po zkoušce.....	43
Obr. 18 Rýhovaný povrch vzorku č. 2 po zkoušce	45
Obr. 19 Rýhovaný povrch vzorku č. 8 po zkoušce	45
Obr. 20 Rýhovaný povrch vzorku č. 5 po zkoušce	46
Obr. 21 Rýhovaný povrch vzorku č. 11 po zkoušce	46

Obr. 22 Rýhovaný povrch etalonového vzorku po zkoušce.....	47
Obr. 23 Dvouvrstvý návar s přechodovou oblastí.....	- 47 -
Obr. 24 Přechodová oblast s tepelně ovlivněnou oblastí	48
Obr. 25 Dvouvrstvý návar s přechodovou oblastí.....	48
Obr. 26 Přechodová oblast s tepelně ovlivněnou oblastí	49
Obr. 27 Dvouvrstvý návar s přechodovou oblastí.....	49
Obr. 28 Přechodová oblast s tepelně ovlivněnou oblastí	50
Obr. 29 Dvouvrstvý návar s přechodovou oblastí.....	50
Obr. 30 Přechodová oblast s tepelně ovlivněnou oblastí	51
Obr. 31 Mikrostruktura základního materiálu bez tepelného ovlivnění zvětšení 50x.....	53
Obr. 32 Mikrostruktura vyžíhané oblasti zvětšení 50x	53
Obr. 33 Zjemnění zrna v blízkosti svaru zvětšení 50x.....	54
Obr. 34 Tepelně ovlivněná oblast s ostrým rozhraním mezi návarem 25x.....	54
Obr. 35 Přechodová oblast zvětšení 25x	55
Obr. 36 Struktura první návarové vrstvy zvětšení 25x.....	55
Obr. 37 Rozhraní první a druhé návarové vrstvy zvětšení 25x	- 56 -
Obr. 38 Druhá vrstva s kontaktní plochou po zkoušce abrazivního opotřebení zvětšení 100x	56
Obr. 39 Druhá vrstva s kontaktní plochou po zkoušce abrazivního opotřebení zvětšení 100x	57
Obr. 40 Druhá vrstva návaru 200 x	57
Obr. 41 Struktura první návarové vrstvy zvětšení 100x.....	58
Obr. 42 První vrstva deskový martenzit-karbid zvětšení 100x	58
Obr. 43 První návarová vrstva zvětšení 500x	59
Obr. 44 Druhá vrstva s kontaktní plochou po zkoušce abrazivního opotřebení zvětšení 25x-	59

Obr. 45 Druhá vrstva s kontaktní plochou po zkoušce abrazivního opotřebení zvětšení 100x	60
Obr. 46 Druhá vrstva s kontaktní plochou po zkoušce abrazivního opotřebení zvětšení 200x ..- 60 -	
Obr. 47 Rozhraní prvního a druhého návaru zvětšení 50x.....	61
Obr. 36 Tepelně ovlivněná oblast s ostrým rozhraním mezi návarem 25x.....	55
Obr. 37 Přejížděvací oblast zvětšení 25x	55
Obr. 38 Struktura první návarové vrstvy zvětšení 25x.....	56
Obr. 39 Rozhraní první a druhé návarové vrstvy zvětšení 25x	- 56 -
Obr. 40 Druhá vrstva s kontaktní plochou po zkoušce abrazivního opotřebení zvětšení 100x	57
Obr. 41 Druhá vrstva návaru 200 x	57
Obr. 42 Struktura první návarové vrstvy zvětšení 100x.....	58
Obr. 43 První vrstva deskový martenzit-karbid zvětšení 100x	58
Obr. 44 První návarová vrstva zvětšení 500x	59
Obr. 45 Druhá vrstva s kontaktní plochou po zkoušce abrazivního opotřebení zvětšení 25x- 59 -	59
Obr. 46 Druhá vrstva s kontaktní plochou po zkoušce abrazivního opotřebení zvětšení 200x ..- 60 -	
Obr. 47 Rozhraní prvního a druhého návaru zvětšení 50x.....	60
Obr. 48 Druhá vrstva s kontaktní plochou po zkoušce abrazivního opotřebení zvětšení zvětšení 50x.....	62
Obr. 49 Struktura návaru pod povrchem zvětšení 25x.....	62
Obr. 50 Druhá vrstva s kontaktní plochou po zkoušce abrazivního opotřebení zvětšení..... zvětšení 25x	63
Obr. 51 Střed hvězdicovitého útvaru s vpichem po indentoru zvětšení 200 x.....	63
Obr. 52 Rozmístění a velikost karbidů zvětšení 200 x.....	63

Obr. 53 Druhá vrstva s kontaktní plochou po zkoušce abrazivního opotřebení zvětšení 200x	-
64 -	
Obr. 54 Mikrostruktura oceli 12 050 zvětšení 50x.....	65
Obr. 55 Mikrostruktura oceli 12 050 zvětšení 100x.....	66
Obr. 56 Mikrostruktura oceli 12 050 zvětšení 200x.....	66
Obr. 57 Mikrostruktura oceli 12 050 zvětšení 500x.	67

Seznam tabulek

Tab. 1 Porovnání tvrdostí vybraných abraziv a kovových materiálů [5]	- 17 -
Tab. 2 Poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení vybraných ocelí a litin (zkoušeno na přístroji s brusným plátnem podle bývalé ČSN 01 5084) [5]	- 17 -
Tab. 3 Poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení kalených ocelí a litiny o tvrdosti 850 – 900 HV se zastoupením typů jejich karbidů a karbidických fází. [2]	- 21 -
Tab. 4 Základní charakteristiky karbidů [2]	22
Tab. 5 Základní charakteristiky nitridů a boridů [2]	- 23 -
Tab. 6 Vliv struktury matrice na odolnost proti abrazivnímu opotřebení u vybraných ocelí [2]- 24 -	
Tab. 7 Vliv parametrů navařování na promíšení se svarovým kovem [6]	- 34 -
Tab. 8 Směrné chemické složení přídatného materiálu PZ 6159	- 35 -
Tab. 9 Směrné chemické složení přídatného materiálu Trubrodur 14.70	- 35 -
Tab. 10 Vyhodnocení spektrální analýzy	- 36 -
Tab. 11 Vyhodnocení spektrální analýzy	- 36 -
Tab. 12 Parametry navařování jednotlivých návarů.....	- 39 -
Tab. 13 Naměřené teploty dotykovým termočlánkem	- 40 -
Tab. 14 Celková výška návaru, výška po přebroušení a změna výšky	- 41 -
Tab. 15 Naměřené hmotnosti vzorků před a po zkoušce s vyhodnocením poměrného a délkového opotřebení	- 42 -

Tab. 16 Povrchová tvrdost vzorků před zkouškou abrazivního opotřebení - 44 -

Obr. 17 Naměřené hodnoty makrotvrdosti..... - 44 -