

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojírenství
Studijní zaměření: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracování doporučení pro vývoj chemického složení u vysoce legované Mn oceli (hadfield)

Autor: **Jan Vitek**

Vedoucí práce: **Ing. Jiří Šimeček**

Akademický rok 2016/17

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou/diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské/diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Autor děkuje Ing. Jiřímu Šimečkovi a Ing. Miroslavu Hálovi, CSc. za odborné vedení při tvorbě bakalářské práce, dále Ing. Vojtěchu Průchovi za odbornou pomoc při provádění zkoušek a Katedře materiálů a strojírenské metalurgie za poskytnutí vybavení k uskutečnění experimentálního programu.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

AUTOR	Příjmení Vítek	Jméno Jan	
STUDIJNÍ OBOR	Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Šimeček	Jméno Jiří	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Vypracování doporučení pro vývoj chemického složení u vysoce legované Mn oceli (hadfield)		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2017
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	60	TEXTOVÁ ČÁST	60	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Bakalářská práce je zaměřena na vypracování doporučení pro vývoj chemického složení a komplexní analýzu předložených vzorků Mn ocelí se zaměřením na odolnost proti abrazivnímu opotřevení jakožto charakteristickou vlastnost tohoto druhu oceli.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p style="text-align: center;">manganová ocel, chemické složení, tvrdost, tribo test, impact test, metalografie</p>

SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

AUTHOR	Surname Vítek	Name Jan	
FIELD OF STUDY	Materials Engineering and Engineering Metallurgy		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Šimeček	Name Jiří	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Elaboration of recommendation for the development of chemical composition of highly alloyed Mn steel (hadfield)		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2017
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	60	TEXT PART	60	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	Bachelor thesis is focused on elaboration of recommendations for development of chemical composition and complex analysis of submitted samples of Mn steel with focus on resistance to abrasive wear as a characteristic of this kind of steel.
KEY WORDS	Manganem steel, chemici composition, hardness, tribo test, impact test, metallography

Seznam zkratek

Mn	Mangan
C	Uhlík
Cr	Chrom
Ni	Nikl
Mo	Molybden
V	Vanad
Ti	Titan
Bi	Bismut
P	Fosfor
γ	Gama
Fe	Železo
IRA	Izotermický rozpad austenitu
ARA	Anizotermický rozpad austenitu
Ms	Mareztit start
S	Síra
Si	Křemík
HV	Tvrdość podle Vickerse
$^{\circ}\text{C}$	Stupeň celsia
SFE	Stacking fault energy-energie vrstevné chyby
ε	Epsilon
HCP	Hexagonální mřížka
α	Alfa
EIP	Elektrická indukční pec
Al	Hliník
N	Dusík
H	Vodík

Obsah

1	Úvod.....	3
2	Chemické složení	4
3	Vliv chemického složení na strukturu a vlastnosti Hadfieldovy ocele	5
3.1	Vliv manganu	5
3.2	Vliv uhlíku.....	6
3.3	Vliv chromu	7
3.4	Vliv křemíku.....	7
3.5	Vliv fosforu.....	8
3.6	Vliv titanu	8
3.7	Vliv niklu.....	9
3.8	Vliv vanadu.....	9
3.9	Vliv molybdenu	10
3.10	Vliv síry	11
4	Tepelné zpracování Hadfieldovy oceli.....	12
5	Mechanismus deformačního zpevnění	15
5.1	Mechanismus deformačního zpevnění Hadfieldovy oceli.....	15
6	Otěruvzdornost.....	19
7	Obrobitelnost.....	20
8	Výroba Hadfieldovy oceli	21
8.1	Vliv přítomnosti vodíku a dusíku při výrobě Hadfield oceli.....	23
9	Použití Hadfieldovy oceli.....	24
10	Experimentální program.....	26
11	Chemické složení	27
12	Zkouška tvrdosti.....	32
12.1	Postup měření.....	32
12.2	Výpočet tvrdosti.....	33
13	Tribo test	35
13.1	.....	36
13.2	.....	38
13.3	.....	40
14	Metalografie	42

14.1	Zjištění výskytu vměstků	42
14.2	Zhodnocení a porovnání struktury a výskytu karbidů vyloučených po hranicích zrn 44	
15	Experiment deformace a zpevnění	46
15.1	Deformace	46
15.2	Zpevnění	47
16	Impact test	51
16.1	Elektornicky řízení Impact tester	52
16.2	Měření závislosti velikosti mikrotvrdości pod krátery u jednotlivých vzorků se vzrůstající vzdáleností od povrchu směrem do středu materiálu	55
17	Diskuze výsledků	57
18	Závěr.....	59
19	Bibliografie.....	60

1 Úvod

Původní austenitická manganová ocel, obsahující průměrně 1,2% C a 12% Mn, byla vynalezena sirem Robertem Hadfieldem roku 1882 a o rok později také patentována. Hadfieldova ocel je pozoruhodná v tom, že kombinuje vysokou houževnatost a tvářitelnost společně s širokými možnostmi tepelného zpracování včetně odolnosti proti abrazivnímu opotřebení. Bylo navrženo mnoho variant manganových ocelí, často v praxi nevyužitých patentech, ale jen málo z nich bylo přijato pouze jako významná zdokonalení. Ty obvykle zahrnují v litém stavu, variace obsahu C a Mn s dolegováním dalších prvků, jako je Cr, Ni, Mo, V, Ti a Bi.[1] Tento nemagnetický materiál umožňuje při rázovém zatížení nárazu až třínásobné zvýšení tvrdosti, a to za předpokladu, že současně nedojde k navýšení křehkosti, jenž je s tvrdostí obvykle úzce spjata.[2]

Rozšíření využití Mn oceli započalo již za první světové války díky vývoji válečných zbraní, jakožto výroba tankových pásů střel nebo helem. Načež následoval podrobnější výzkum na počátku 70. let 20. Století. Dodnes jsou Hadfieldovy manganové oceli stále používány s drobnými úpravami ve složení a tepelném zpracování, a to především v oblasti zemních prací, hornictví, ropných vrtů, ocelárenství, železničního svršku, při výrobě stavebních hmot a výrobků z pálené hlíny.[2]

V současné době se v oblasti manganových ocelí jedná především o výzkum, vývoj a hodnocení mechanismů zpevňování v povrchových vrstvách součástí. Cílem této práce je podat základní charakteristiky o Hadfieldově oceli, kam je řazeno především chemické složení, výroba, použití, mechanické vlastnosti, mechanismy zpevňování a další. Následný experiment bude zaměřen na podrobnou analýzu poskytnutých vzorků a celkové vyhodnocení jejích vlastností.

2 Chemické složení

Původně patentované chemické složení Hadfieldovy oceli nedoznalo doposud výraznějších změn složení. Tyto oceli obsahují C v rozmezí 0,8 až 1,25%, Mn v rozmezí 11 až 15%, do 0,1% Si a 0,100% P. V některých případech obsahují 0,7 až 1,2 % Cr. Jak tvrdost tak tažnost dosahují nejvyšší hodnoty kolem 12% manganu v závislosti na dalších legurách. Primární legujícím prvkem je C, jelikož s rostoucím obsahem C se lineárně zvyšuje i vliv manganu, společně s jeho vlastnostmi ve vzniklé slitině (viz. kapitola 3). Originální Hadfieldova ocel obsahovala asi 1,0% uhlíku. Jiné legury mohou být například Ni nebo Cr. Vyskytuje se například i varianta oceli s 18% Mn, využívaná zejména pro maximálně zatížené součásti. [2]

Tabulka 1: složení Hadfieldovy oceli různých standartů [3,5]

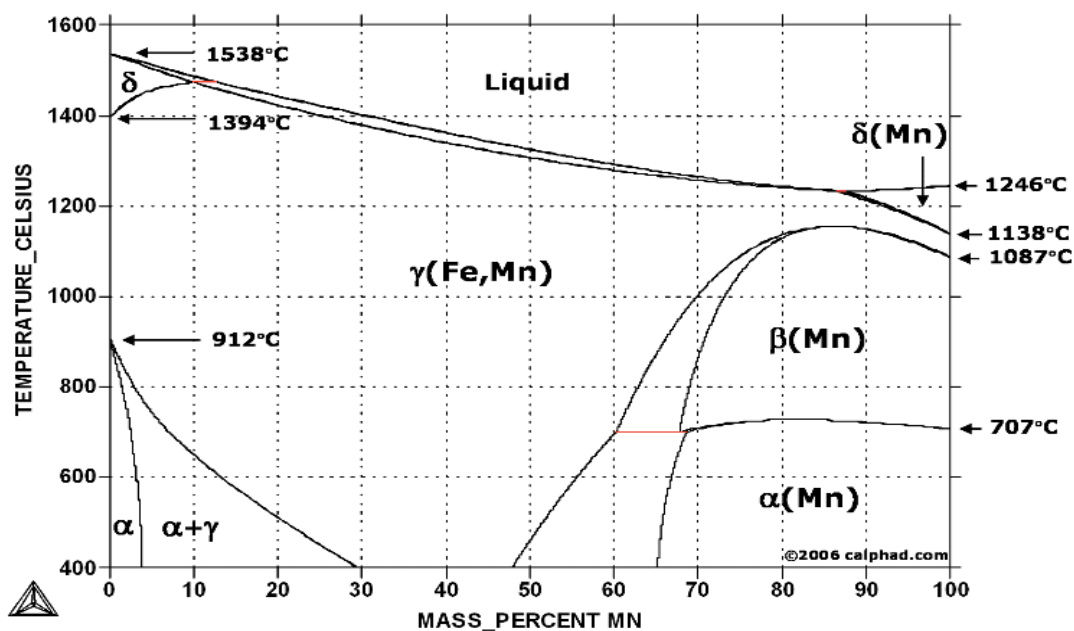
standart	Chemické složení (%)					
	C	Mn	Si	P	S	Cr
ČSN 17618	1,1-1,4	11-12	1,0	0,100	0,040	0,7-1,2
ČSN 422920	1,1-1,5	12-14	0,7	0,100	0,050	0,7-1,2
ČSN 422921	1,1-1,5	12-14	0,7	0,100	0,050	0,7-1,2
A 128, Grande C	1,05-1,35	11,5-14,0	max 1,0	0,070	-	1,5-2,5
G-X 120 Mn 12	1,1-1,3	12-13	0,3-0,5	0,100	0,040	max 1,0
STN 417618	1,1-1,4	11-13	max 1,0	0,100	0,040	-
STN 422920	1,1-1,5	12-14	0,7	0,100	0,050	0,7-1,2
STN 422921	1,1-1,5	12-14	0,7	0,100	0,050	0,7-1,2

3 Vliv chemického složení na strukturu a vlastnosti Hadfieldovy oceli

3.1 Vliv manganu

Mangan se řadí do skupiny prvků, jenž jsou austenitotvorné. Tedy rozšiřuje oblast železa γ . Z binárního diagramu Fe-Mn jasně vyplývá, že ve slitinách s obsahem manganu převyšujícím 35% zůstává austenit zachován i v podmínkách pokojové teploty a slitiny mají austenitickou strukturu. Difuzní rychlost Mn je i díky velikosti atomů tohoto prvku nízká. Difúzi lze potlačit vyšším procentem obsahu manganu a vyšší ochlazovací rychlostí. Ve slitinách Fe-Mn-C je část manganu rozpuštěna v základní kovové matici (tj. ve feritu nebo austenitu), část tvoří podvojný karbid $(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{C}$. Rozdělovací koeficient závisí na obsahu manganu a uhlíku. Mangan rozpuštěný ve feritu zvyšuje jeho pevnostní vlastnosti a snižuje tažnost. Manganové oceli jsou citlivé na zhrubnutí zrna, takže je nutné při tepelném zpracování dodržovat austenitizační teplotu.

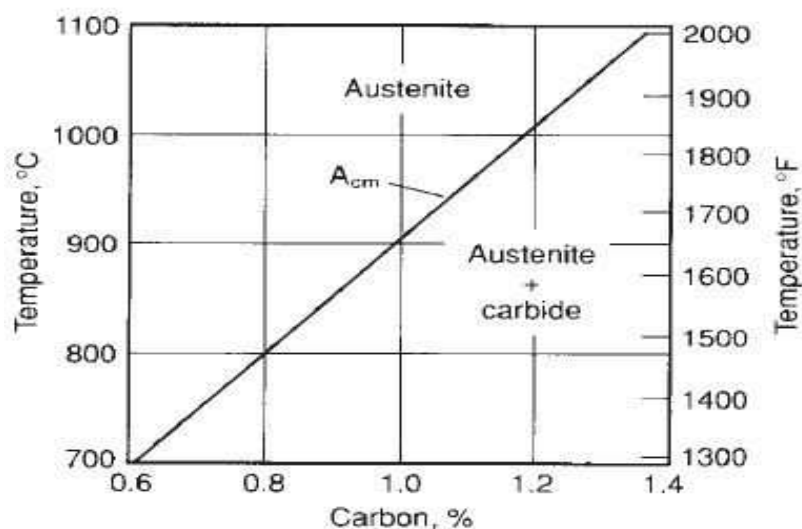
Mangan je často používán k legování konstrukčních ocelí, zejména v kombinaci s jinými prvky, protože je cenově příznivý a dostupný například oproti Ni a Ti, jenž jsou podstatně dražší. U běžných konstrukčních ocelí je využíván Mn až do 2% obsahu. Při legování oceli manganem je nutno počítat s jeho velkým sklonem k odměšování a jeho malou difuzní rychlostí. Mangan ovlivňuje také tepelné zpracování ocelí. Jeho přítomnost se v případě diagramů IRA a ARA projevuje posunutím křivky přeměn austenitu doprava. Tuto skutečnost je možné zdůvodnit tak, že kompletní průběh rozpadu austenitu je zpomalen v závislosti na značně snížené difuzní schopnosti uhlíku, kterou Mn svou přítomností ovlivňuje. Snížení rychlosti transformace je přímo úměrné rostoucímu procentu obsahu Mn v oceli. Dalším jevem se stejnou závislostí a uplatněním z praktického hlediska je i snížení teploty M_s . Její snížení však závisí nejen na růstu obsahu Mn ale i C. Současně dochází k potlačení transformace austenitu a zachování austenitické matrice dokonce i při pokojových teplotách.[6,7]



Obrázek 1: Binární diagram Fe-Mn [8]

3.2 Vliv uhlíku

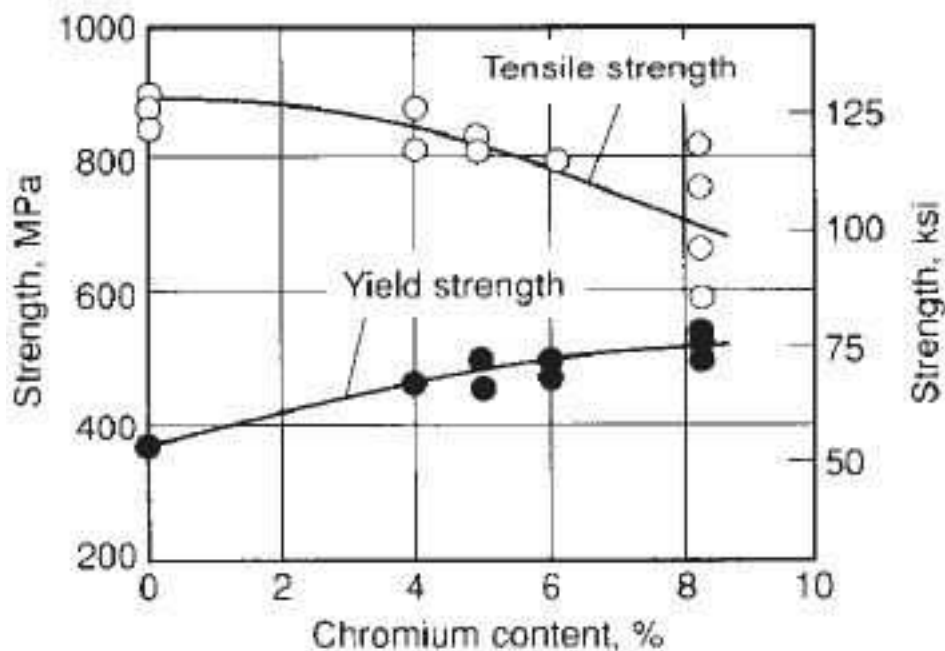
Obsah uhlíku je volen dle požadované odolnosti proti opotřebení a zároveň náchylnosti odlitků k trhlinám. Se zvyšujícím se procentem uhlíku odolnost proti abrazivnímu opotřebení stoupá. Naproti tomu oceli s vyšším obsahem uhlíku mají zvýšený sklon ke vzniku trhlin, protože v průběhu chladnutí po odlití je po hranicích zrn vylučováno větší množství karbidů. U složitých a tlustostěnných odlitků je v návaznosti na uvedené problémy doporučeno snížení obsahu uhlíku ke spodní hranici povoleného rozpětí, či přidat malé množství titanu, který zrno zjemňuje. [5]



Obrázek 2: Rozpustnost uhlíku v oceli s 13%Mn [9]

3.3 Vliv chromu

Vybraná skupina austenitických manganových ocelí je legována Cr, jehož množství se pohybuje okolo 1% hmotnosti. Dosáhne li hmotnostní procento chromu hodnoty 1,31%, mez kluzu je zvýšena cca o 11%, ovšem vrubová houževnatost mírně klesne, viz obrázek 3. Onen pokles však není zásadní, pokud je obsah chromu méně než 2%. Cr také tvoří karbidy, které snižují plastické vlastnosti dané oceli. Vše je zapříčiněno jejich úplnou rozpustností v austenitu, až při teplotách nad hodnotou 1150°C. Chrom jako takový neovlivňuje, tak zásadním způsobem, odolnost oceli proti opotřebení, zato má citelný vliv na odolnost proti korozi. Chrom v oceli reaguje s korozními činidly a tvoří na povrchu součástí pasivní vrstvičku, která pomáhá dalšímu šíření koroze.[5,9]

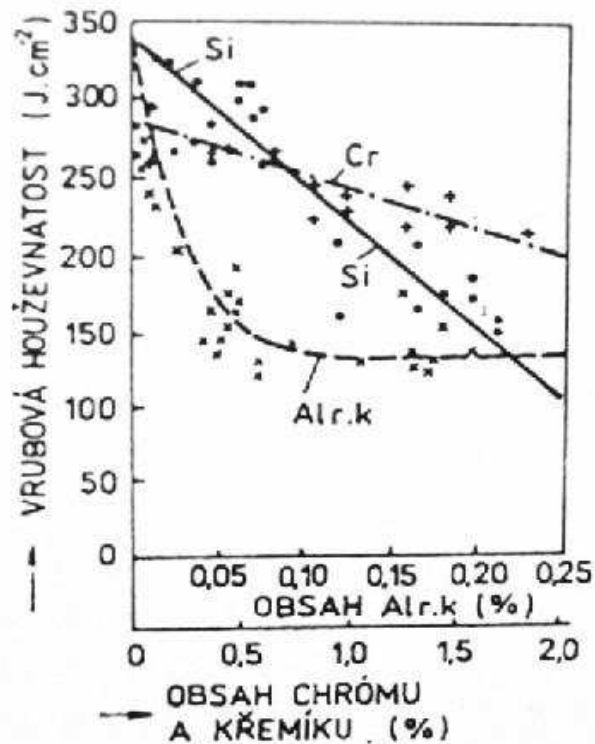


Obrázek 3: Pevnost v tahu a mez kluzu v závislosti na obsahu chromu [9]

3.4 Vliv křemíku

Hodnota koncentrace Si v oceli na odlitky je maximálně 0,7% a u tvářených ocelí do 1,0%. Křemík jako takový snižuje rozpustnost uhlíku v austenitu, čímž je navyšován počet drobných karbidů, které jsou vylučovány po hranicích zrn jako řetízky. Tento jev celkově způsobuje negativní vliv na vrubovou houževnatost, jenž dle následujícího obrázku zůstává dostatečně vysoká až do obsahu 1% Si. [5]

Obsah 1 až 2% může být použit pro mírné zvýšení meze kluzu, ale k tomuto účelu mohou být výhodné i jiné legující prvky. Na druhou stranu, ocel s hladinou křemíku pod 0,10% vykazuje sníženou tekutost při odlévání. S vyšším obsahem Si také dochází ke snížení rázové houževnatosti. [9]



Obrázek 4: Vliv hliníku, chromu a křemíku na vrubovou houževnatost austenitické manganové oceli [5]

3.5 Vliv fosforu

Manganové austenitické oceli zpravidla obsahují více fosforu, než je tomu u běžných ocelí na odlitky. Výsledkem je, fosfidické eutektikum, jehož morfologie je závislá na obsahu fosforu. Fosfidické eutektikum obsahuje převážně mangan, fosfor, železo a uhlík. Může se vyskytovat jak v interdendritických tak intergranulárních karbidech. Hodnota mikrotvrlosti tohoto eutektika je 1195 ± 9 HV.

Jelikož k hromadění fosforu dochází po hranicích zrn, kde tvoří nízkotavitelné fosfidické eutektikum, snižuje tím vrubovou houževnatost a současně i odolnost proti opotřebení. Tento jev je zvýrazněn při hodnotách obsahu nad 0,8% P. Stejně tak klesá i vrubová houževnatost manganových ocelí, ale až při obsahu nad 0,1 % P. [5]

3.6 Vliv titanu

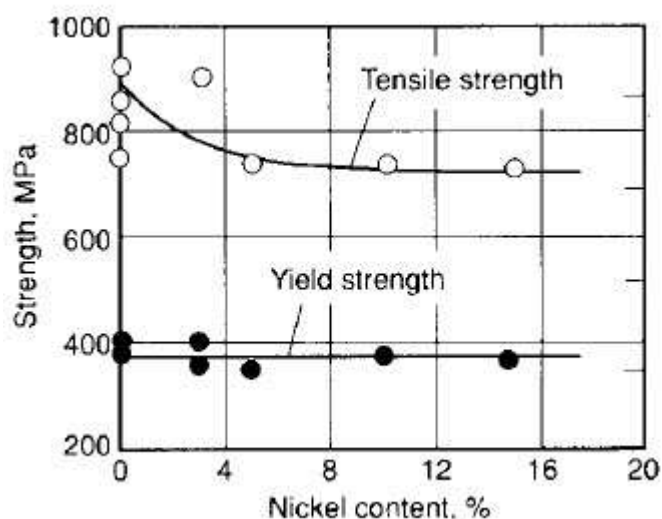
Využitím malého množství tohoto legujícího prvku lze docílit zjemnění zrna. Dalším pozitivem je snížení náchylnosti k trhlinám u komplikovanějších odlitků díky již zmíněnému

zjemnění zrn a nižšímu množství karbidů vyloučených po jejích hranicích. Obsah titanu by neměl překročit hranici 0,05%, protože při vyšších hodnotách stejně jako u fosforu klesá vrubová houževnatost.

Zajímavostí titanu jako legury je, že při jeho použití roste zároveň i obsah hliníku, a to díky ferotitanům obsahujícím až 8% hliníku. Vyšší koncentrace hliníku v tavenině způsobuje precipitaci na hranici primárních austenitických zrn a hliník spolu s dusíkem tvoří AlN (nitrid hliníku). Ten snižuje houževnatost, plasticitu a je příčinou tvorby lasturových lomů. V neposlední řadě je titan schopen tvorbou stabilních karbidů do jisté míry eliminovat koncentraci uhlíku v austenitu. [5, 9]

3.7 Vliv niklu

Ni je prvkem, který je do Hadfieldovy oceli přidáván z důvodu zvýšení přechodové teploty při teplotách v provozu pod bodem mrazu. Zároveň zvyšuje tvárnost, mírně snižuje mez kluzu a v základní matici je zcela rozpustný. Jako austenitotvorný prvek zcela otevírá oblast gama u slitin železa. Tvorbu karbidů, jež vznikají v rozmezí teplot 300°C až 550 °C Ni potlačuje. Nejčastěji je Ni přidáván do nízkouhlíkových Mn ocelí. Společně s Mo je využíván v některých případech u tvářených výrobků. Ni patří mezi nejdražší z běžných legujících prvků. [5, 9]



Obrázek 5: Vliv obsahu Ni na mez kluzu a pevnost v tahu u manganových ocelí [9]

3.8 Vliv vanadu

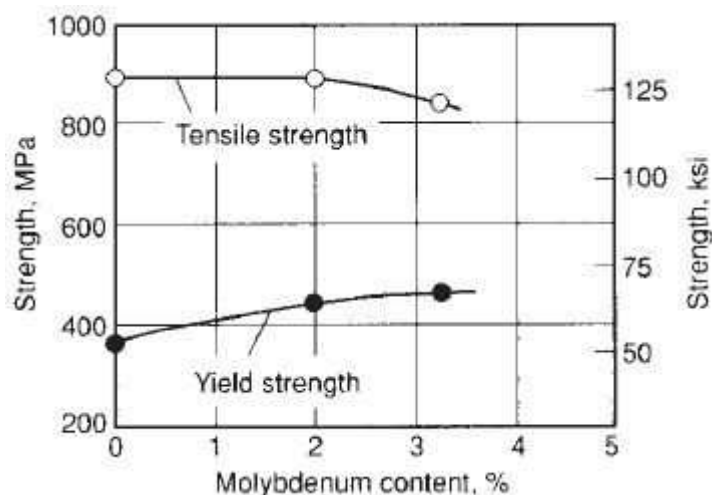
Vanad jakožto značně karbidotvorný prvek silně navyšuje mez kluzu a pevnosti, ale snižuje rázovou houževnatost. V rozmezí obsahu 0,5 % až 2 % je V využíván zejména k precipitačnímu vytvrzování Mn ocelí. Karbidy a karbonitridy jsou značně stabilní i po

rozpuštěním žíhání a teprve při teplotách v rozmezí 1120 °C -1175 °C je V v matici zcela rozpustný. Následuje stárnutí v rozmezí teplot 500 °C až 650 °C, přičemž dochází k precipitaci karbidů. [5, 9]

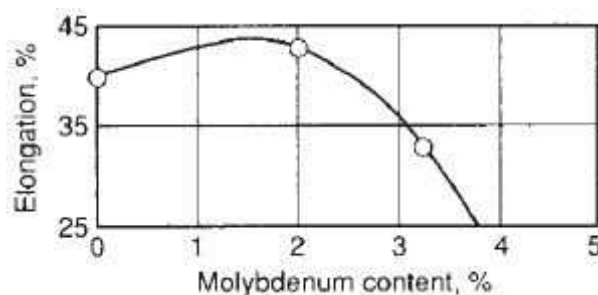
Vliv V v Mn ocelích je též rozebrán v článku [22], z něhož vyplývá následující. Austenitické manganové oceli s karbidy vanadu mají jasně lepší odolnost proti opotřebení ve srovnání se standardní austenitickou Mn ocelí, vzhledem k velmi tvrdým částicím karbidu V rozptýleným v austenitu a také posílení vlivu vanadu v tuhém roztoku.

3.9 Vliv molybdenu

V rozmezí od 0,5 % až do 2 % je Mo přidáván do manganových austenitických ocelí z důvodů zvýšení odolnosti proti abrazivnímu opotřebení, náchylnosti proti praskání odlitků v litém stavu a zvýšení meze kluzu. Jelikož zároveň roste i cena těchto ocelí, je legování Mo často otázkou priorit a požadavků zákazníka. Pevnost v tahu Mn ocelí je do 2 % Mo konstantní, posléze při dalším zvyšování obsahu Mo mírně klesá. U odlitků s velkou tloušťkou stěny po kalení zvyšuje mez kluzu. Vše je dáno jeho obsahem jak v austenitu, stejně jako v karbidech, jež vznikají při tuhnutí ocelí. Přidáním Mo, u tenkostěnných odlitků, je možné vyhnout se nutnosti tepelného zpracování.[5,9]



Obrázek 6: Pevnost v tahu a mez kluzu v závislosti na obsahu molybdenu[9]



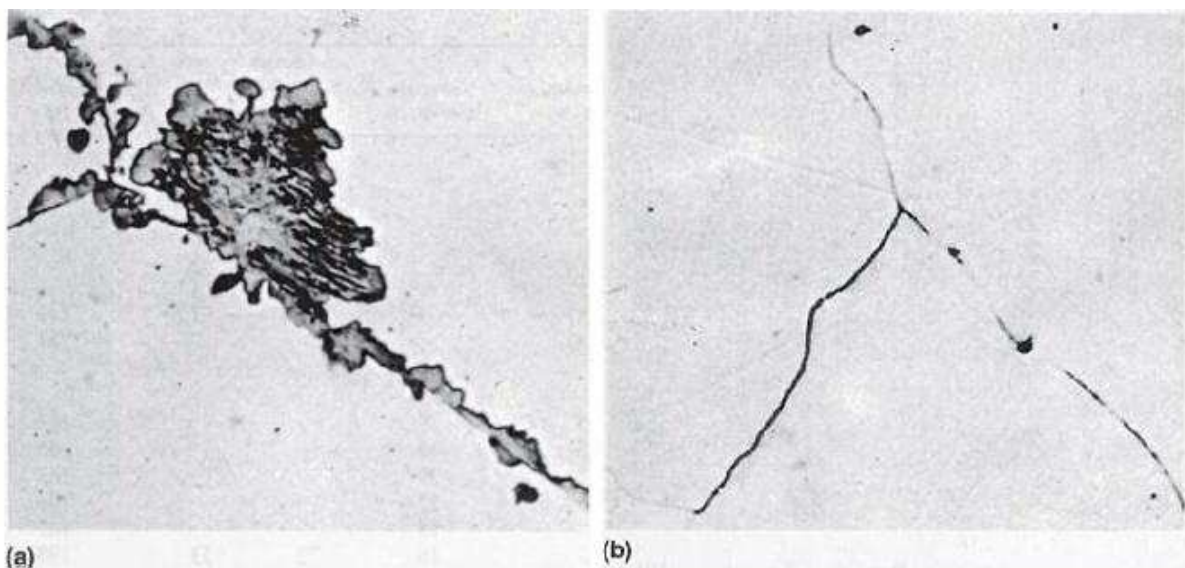
Obrázek 7: Tažnost v závislosti na obsahu molybdenu [9]

3.10 Vliv síry

Síra je v ocelích obsažena hlavně z důvodu jejího výskytu v kovové vsázce a přísadách. V souvislosti s obsahem Mn je S v austenitických Mn ocelích přítomna zejména v podobě v globulárního sulfidu manganatého MnS. Výskyt sulfidů i s ohledem na morfologii neznamená výraznější ovlivnění plastických vlastností těchto ocelí. Ovšem, stále je vhodné snižovat obsah síry na co nejnižší hodnotu, čímž je zároveň ovlivněno a především minimalizováno množství vměsků v mikrostruktuře. Následkem snížení obsahu S je i snížení pravděpodobnosti nukleace únavových trhlin. [5,9]

4 Tepelné zpracování Hadfieldovy oceli

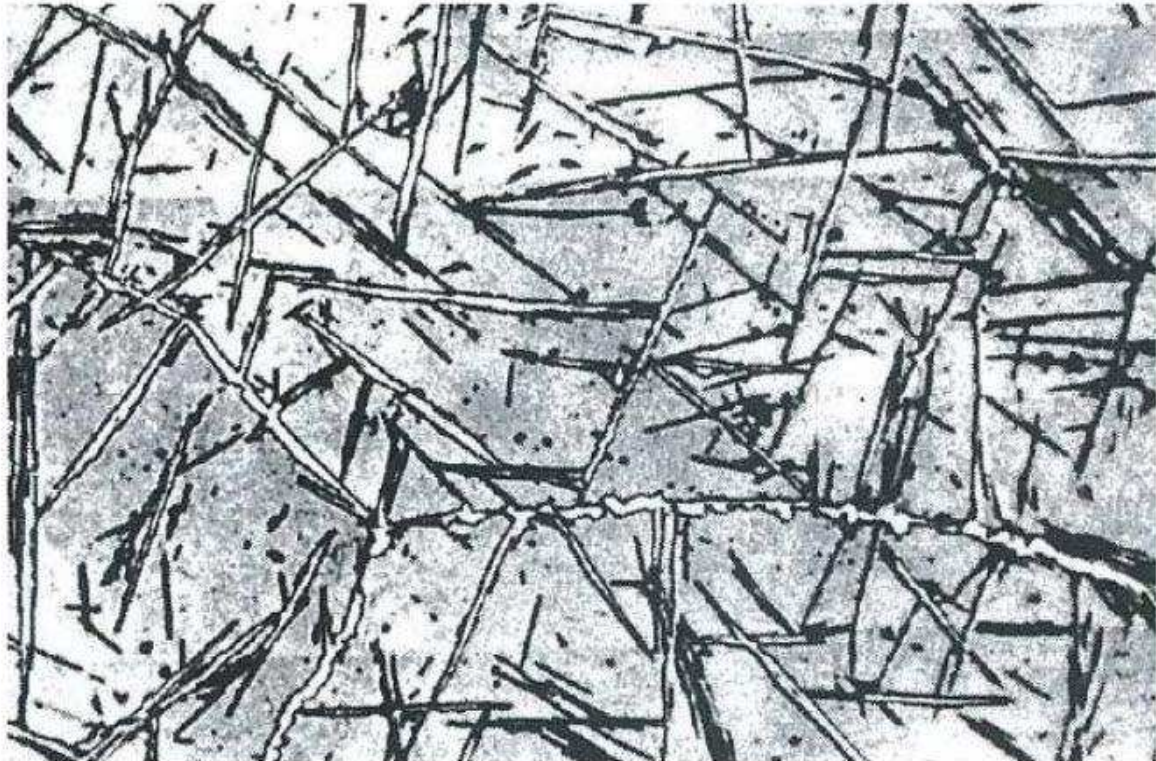
Podstatou tepelného zpracování Mn ocelí je zvýšení mechanických vlastností a bezpečného provozu tak, aby je bylo možné spolehlivě využívat. Matrice surových odlitků je tvořena austenitem, jehož součástí je vyloučený podvojný cementit vyloučený po hranicích zrn. Ten ovšem snižuje značným způsobem houževnatost. Pakliže je cílem dosáhnout homogení nemagnetické austenitické struktury, je nutné zahřátí oceli na teplotu, při které dojde k rozpuštění karbidů v základní matici. Poté musí následovat výdrž a ochlazení. Je nutné, aby ochlazení ve vodě proběhlo s dostatečnou rychlostí, která zpětnému vyloučení podvojných karbidů zabrání. Vzhledem k houževnatosti austenitické struktury nedochází při ochlazování zpravidla ke vzniku trhlin, ani k deformaci materiálu. Teplota rozpouštěcího žíhání u austenitických Mn ocelí je situována v rozmezí 1030 °C až 1080 °C. Délka výdrže na teplotě je odvozena vzhledem k tloušťce stěny odlitku. V praxi se doba ohřevu empiricky odhaduje hodinu na každých 25 mm tloušťky materiálu. Na výdrž navazuje ochlazování ve vodě, kvůli zamezení zpětného vyloučení karbidů. Výsledná struktura produktu tepelného zpracování by měla obsahovat čistě austenitickou matici, s malým množstvím karbidů a s rovnoměrným obsahem C a Mn. Za přítomné lze považovat částičky karbidické fáze v austenitických zrnech, nikoli však protáhlé útvary karbidů po hranicích zrn. [5,9]



Obrázek 8: Struktura austenitické manganové oceli: (a) Materiál ve stavu po odlití, tloušťka stěny odlitku je 76 mm, lze vidět rozsáhlé uskupen. karbidů na hranici zrna. (b) Ohřev na 1120 °C a zchlazení ve vodě. Zvětšen. 500x [9]

Jelikož má Mn ocel velkou lineární roztažnost a malou tepelnou vodivost oproti běžným konstrukčním ocelím typu S235, je důležité, aby složitější odlitky byly vloženy do pece s maximální teplotou 200°C, jelikož vyšší teploty by neumožnily rovnoměrné prohřátí celé součásti a tím by došlo k degradaci celého procesu v rámci odlitku. Následná rychlost ohřevu se pro jednotlivé odlitky pohybuje v rozmezí od 80°C/h do 100 °C/h. U součástí, jejichž tloušťka stěny má více než 100mm, je rychlost ohřevu snížena až na rozmezí 35°C/h až 55

°C/h. V okamžiku, kdy teplota při ohřevu součástek dosáhne 750°C, je možné přikročit ke zvýšení rychlosti ohřevu. V případě komplikovanějších odlitků či větší hloubky stěny, je postup o něco komplikovanější. Dle doporučení by při dosažení teploty 630 °C měla následovat výdrž, z důvodu vyrovnání napětí, jenž vzniká při ohřevu. Zbytková napětí, jakožto důsledek ochlazování složitějších odlitků s větší tloušťkou stěny, stanovila maximální přijatelnou tloušťku stěny tak, aby nedošlo k poškození či znehodnocení odlitku, v rozmezí 127 až 152cm.



Obrázek 9: Karbídové jehlice uvnitř austenitu a obálky karbidů po hranicích austenitických zrn - litá ocel [5]

Některé typy Mn austenitických ocelí vyžadují částečně upravené tepelné zpracování. U Mn oceli s obsahem 1,8% až 2,1% Mo je nejprve proveden ohřev na teplotu 595°C, s následnou výdrží 8 až 12 hodin. Výsledkem je značná tvorba perlitu. Odlitky jsou poté zahřáty na 980°C, kdy dojde k reaušteninovací struktury. Tedy perlit je transformován na jemnozrný austenit, jenž disponuje disperzí nerozpuštěných částic karbidů. Jakmile austenitizační teplota překročí 1010°C, dojde k jejich úplnému rozpuštění. Ochlazením je dokončeno tepelné zpracování oceli s charakteristickou vyšší mezí kluzu, tvrdostí a nižší houževnatostí. Využití tohoto druhu tepelného zpracování nalezneme zejména u ocelí s vyšším obsahem uhlíku.

Jednou z věcí, na které je při tepelném zpracování nutno dbát, je austenitizační teplota. Příliš vysoká teplota může způsobit oduhličení povrchu a snížení koncentrace manganu v povrchové vrstvě. Příčinou jsou nežádoucí difuzní procesy. Zmíněné oduhličení je schopno proniknout až 3 mm pod povrch odlitku. Vzniklá vrstva disponuje převážně martenzitickou

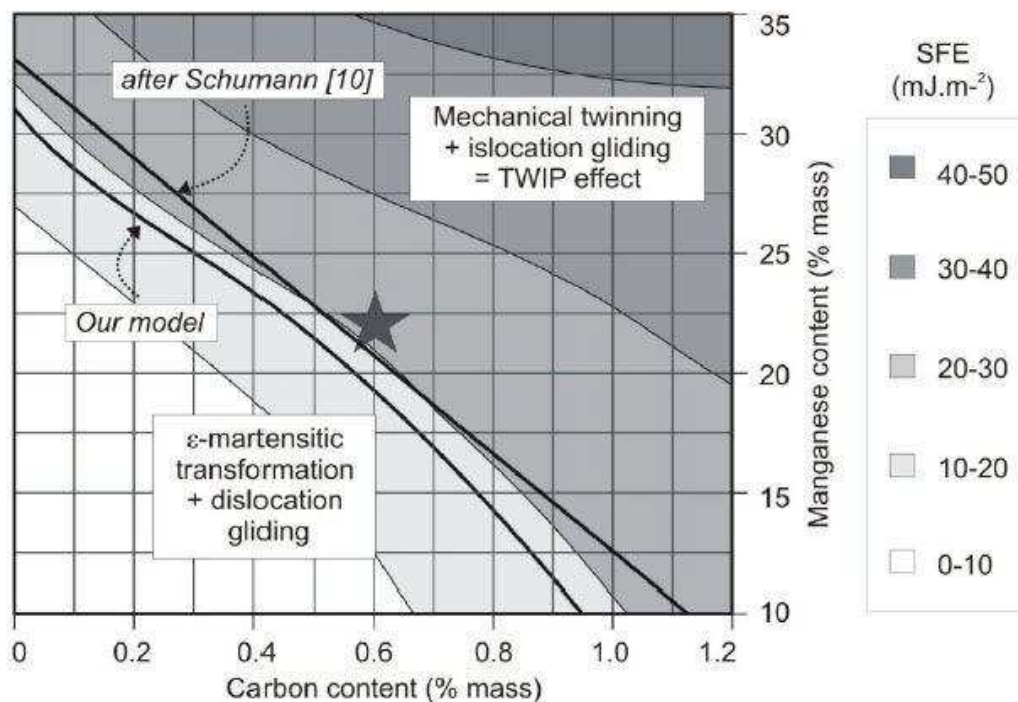
matricí s výrazně horšími vlastnostmi. To však není příliš rozhodující pro součásti, jež jsou určeny k mletí nebo drcení, během kterého dochází k samovolnému oduhličené martentické vrstvy vlivem opotřebení. Namáhání a deformace za provozu vyvolává v oduhličeném povrchu vznik prasklin, jež jejich řízení je zastaveno jakmile narazí na houževnatou austenitickou matici. V současné době je možné oduhličení povrchu předejít prakticky u kteréhokoli tepelného zpracování, a to za použití inertní popřípadě redukční pecní atmosféry. K dalším možnostem lze přiřadit zásypy z ocelových třísek či organické a anorganické povlaky.[5,9]

5 Mechanismus deformačního zpevnění

K jedné z nejzásadnějších vlastností Mn austenitických ocelí je řazena schopnost zpevnění za působení dostatečných tlaků, nebo rázů. Je-li namáhání oceli pouze abrazivního charakteru, pak odolnost proti obotřebením je značně nízká. Se zpevňováním povrchu je třeba počítat také zejména u obrábění, které se tímto jevem samo o sobě značně komplikuje, jelikož při obrábění dochází k mechanickému působení na daný materiál především za pomoci tlaků a rázů, a tím zároveň i ke zpevňování materiálu. [5,10]

5.1 Mechanismus deformačního zpevnění Hadfieldovy oceli

Historie výzkumu samotného deformačního mechanismu zpevnění čítá několik názorů a teorií. Příkladem budiž teorie transformace austenitu na alfa nebo epsilon martenzitu. Na vzniku zpevněného povrchu, s nímž je úzce spjata i otěruvzdornost, má podíl energie vrstevné chyby SFE (Stacking fault energy). Její hodnotu lze v určitých mezích jistým způsobem regulovat, jelikož značně souvisí s chemickým složením. Primárně je SFE ovlivněna především objemovým zastoupením Mn a C viz obrázek. [5,10, 28]

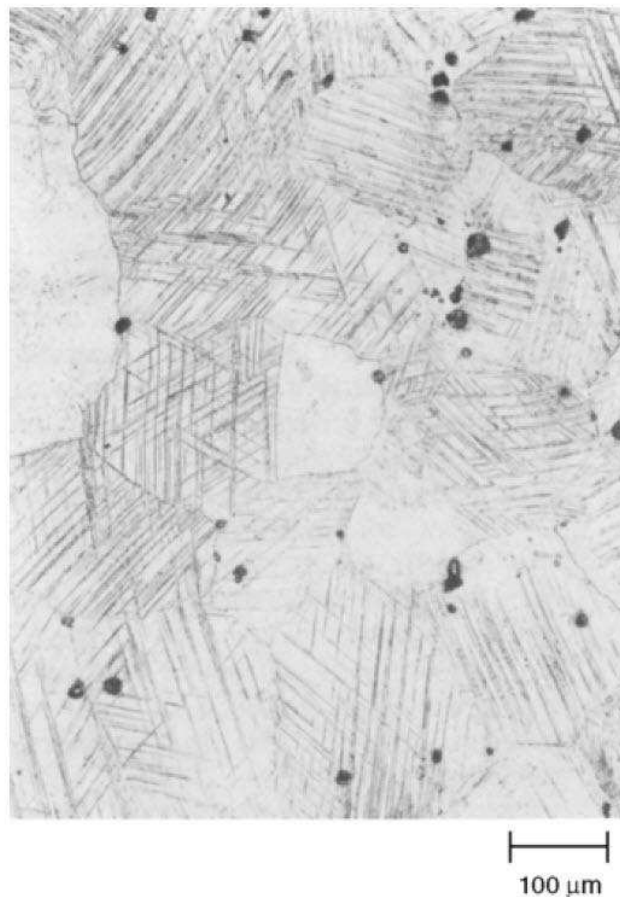


Obrázek 10: Energie vrstevné chyby SFE v závislosti na obsahu uhlíku a manganu [17]

Cílového zpevnění součástí, nástrojů a dílů z Mn ocelí lze dosáhnout pomocí dvou mechanismů. V první řadě je to dvojčatění a zadruhé jde o takzvanou indukovanou martenzitickou transformaci. Stěžejním bodem samotného uskutečnění kteréhokoliv z obou mechanismů je velikost vrstevné chyby, a to konkrétně hodnota $18 \text{ mJ}/\text{m}^2$. Samozřejmě je

zapotřebí konstatovat, že v případě, kdy hodnota SFE kolísá kolem předešlé hodnoty, může dojít k současnému uplatnění obou mechanismů zároveň.

K mechanismu dvojčatění dochází u Mn ocelí v případě, je-li $SFE > 18 \text{ mJ/m}^2$. V dané situaci je zapotřebí, aby při zvoleném chemickém složení uhlík setrval v tuhém roztoku a výchozí austenit doznal žádoucí stability. Precipitací karbidů dochází ke snížení procenta uhlíku v austenitu. Důsledkem tohoto jevu je snížení hodnoty SFE. Z čehož plyne následující závislost. Čím je počet vyloučených karbidů vyšší, tím klesá hodnota SFE a v návaznosti na to může být mechanismus dvojčatění částečně či úplně nahrazen deformačně indukovanou martenzitickou transformací. To je důvodem, proč je zapotřebí tepelného zpracování, které počet vyloučených karbidů snižuje. Samotná dvojčata jsou dílem vzniku skluzu parciálních dislokací $a/6 \langle 112 \rangle$ podél roviny $\{111\}$. Krystalografická struktura je typem orientace shodná se základním austenitem. Počet mechanických dvojčat lineárně roste se stupněm deformace, což v konečném důsledku znamená více bariér pro pohyby dislokací a roste napětí potřebné k další plastické deformaci. [5,10,28]

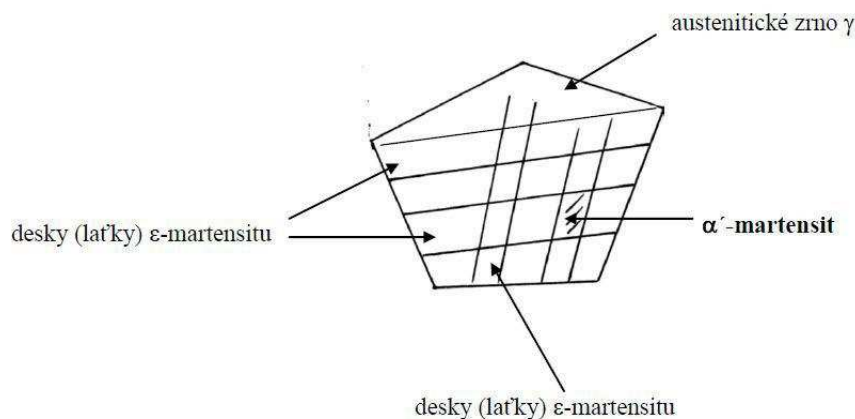


Obrázek 11: Deformační dvojčata uvnitř austenitických zrn -ocel s 1,15% C, 12,8% Mn [18]

Pro deformačně indukovanou martenzitickou transformaci je význačný nižší obsah C a Mn a hodnota $SFE < 18 \text{ mJ/m}^2$. Charakter zpevnění souvisí s transformací austenitu na martenzit ve spojitosti s přivedenou energií, jež ve většině případů pochází z provozu samotného

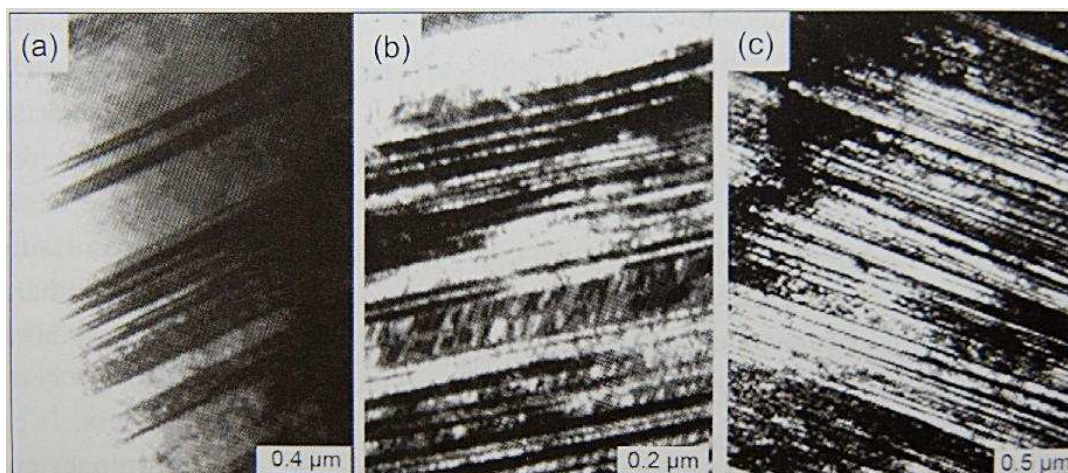
stroje, či součásti, nebo z nekonvenčních metod zpevňování ještě před samotným uvedením do provozu.[9,10]

Se vzrůstající deformací austenitických zrn roste i jejich energie a tím pádem je vyvolána martenzitická transformace. Z austenitu vzniká přechodový ϵ martenzit, jehož mřížka je HCP. Transformace martenzitu je vyvolána dislokačním skluzem podobně jako u dvojčatění ovšem s malým rozdílem, tento děj probíhá pouze v každé druhé rovině. Takto vznikají laťky martenzitu. S růstem zatížení stoupá i počet laček ϵ martenzitu a následuje jejich protínání. V bodě protnutí je ϵ martenzit transformován na α' martenzit a to do úplného vyčerpání plasticity. [5,10,28]



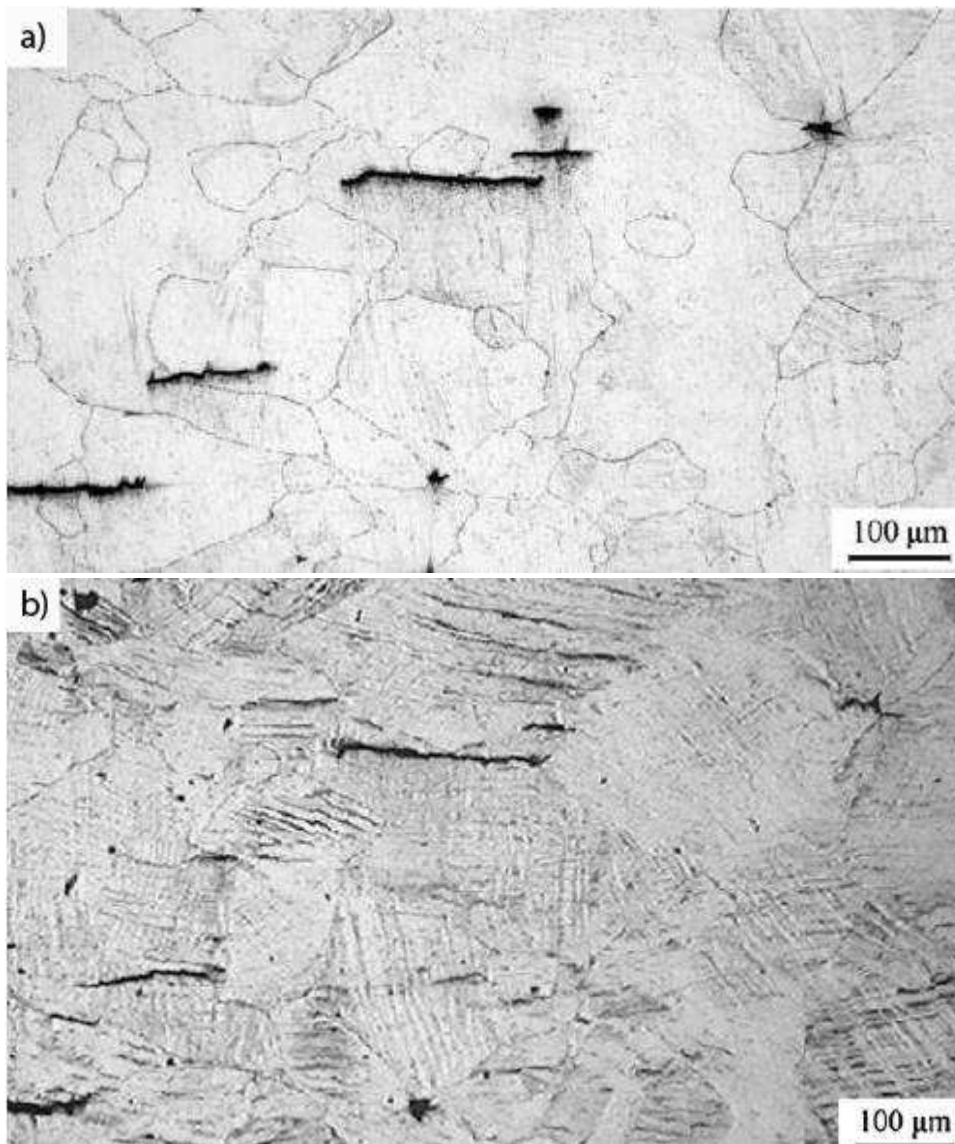
Obrázek 12: Vznik α' martenzitu interakcí laček ϵ martenzitu[17]

Zpevňování s pokračující deformací je uskutečněno tak, že nově vzniklé poruchy struktury vytvářejí překážky, jež zabraňují pohybu soustav dislokací a jejich hustota narůstá. Samozřejmě konstantně v závislosti s vyšším stupněm deformace roste i hustota dvojčatových lamel. Lamely jsou nerovnoměrně uspořádány. Nerovnoměrné uspořádání lamel dělí matici na stále menší strukturální části čímž je zjemňována struktura. [5,10]



Obrázek 13 : Dvojčatové lamely[29]

Produktem procesu plastické deformace jsou nové dislokace. Ty nejsou schopné ve své původní formě přejít dvojčatovou lamelu. Díky tomu vzniká tzv. „interface“ dislokace, jenž je schopna pohybu, při splnění podmínky působení vyššího napětí. S jemností zvourodělené matrice dvojčatovými lamelami roste i hustota zmíněných „interface“ dislokací. Zpevňování je dále ovlivněno i uhlíkem. Atomy uhlíku jsou vtahovány do míst, kde koncentrace dislokací dosahuje maxim. Celkový stupeň zpevnění tedy zahrnuje vrstevní chyby, dvojčaté lamely, skluzové dislokace a závisí na celkovém množství poměru těchto strukturních poruch.[5,10]



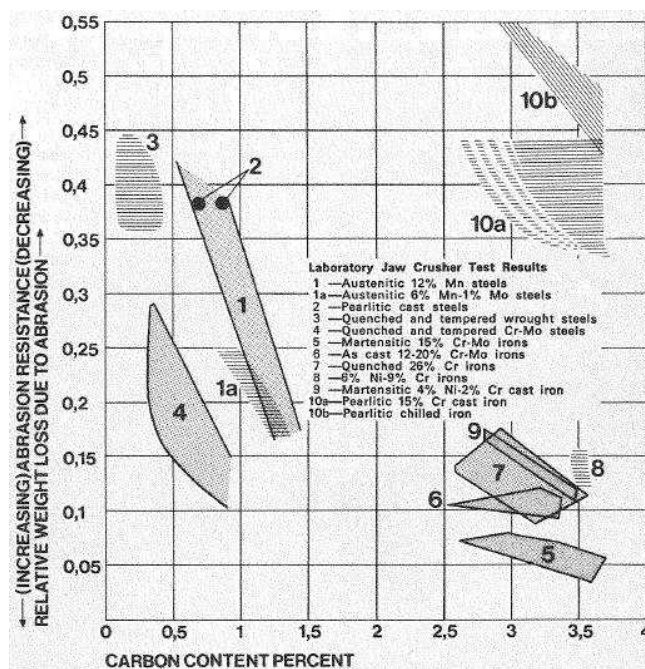
Obrázek 14: Struktura Hadfieldovy oceli před (a) a po (b) deformačním zpevnění [11]

6 Otěruvzdornost

Otěruvzdornost úzce souvisí s mechnismy deformačního zpevňování. Pakliže je Mn ocel porovnána například s martenzitickou ocelí s vysokým obsahem uhlíku, či martenzitickou litinou, je její otěruvzdornost nižší. Naproti tomu je jejich otěruvzdornost porovnatelná, ba dokonce vyšší než u bílé perlitické litiny a třeba Cr-Mo ocelí. [9] Z komplexního hlediska, je neméně důležité zahrnout do hodnocení také houževnatost, a to je důvodem, proč je Mn ocel považována za nejlepší material z výše jmenovaných. Z nadcházející tabulky 2 je patrné porovnání otěruvzdornosti a houževnatosti daných ocelí a litin. Experiment a následné hodnocení bylo provedeno na mlecích koulích 127 mm. Pro širší pohled na danou věc je na obrázku 15 k dispozici ještě další porovnání. [9]

Tabulka 2: porovnání otěruvzdornosti daných materiálů [9]

Material	Nominal composition, %					Hardness, HB	Relative wear rate	Order of toughness
	C	Mn	Cr	Mo	Ni			
Martensitic Cr-Mo white iron	2.8	1.0	15.0	2.0	...	740	89	7
Martensitic high-chromium white iron	2.7	1.0	26.0	...	...	705	98	8
Martensitic high-carbon Cr-Mo steel (type 3)	1.0	0.8	6.0	1.0	...	615	100	6
Martensitic high-carbon Cr-Mo Steel (type 2)	0.7	0.7	2.0	0.4	...	560	110	5
Martensitic Ni-Cr white iron	3.2	0.8	2.0	...	4.0	650	112	9
Austenitic 6Mn-1Mo steel	0.9	6.0	...	1.0	...	490	114	3
Martensitic medium-carbon Cr-Mo steel (type 1)	0.4	1.5	0.8	0.4	...	560	120	2
Pearlitic high-carbon Cr-Mo steel (type A)	0.8	0.8	2.5	0.4	...	380	127	4
Austenitic 12% Mn steel	1.2	12.0	...	...	...	410	138	1



Obrázek 15: porovnání relativní ztráty hmotnosti vybraných materiálů za podmínek erozivního opotřebení [20]

7 Obrobitelnost

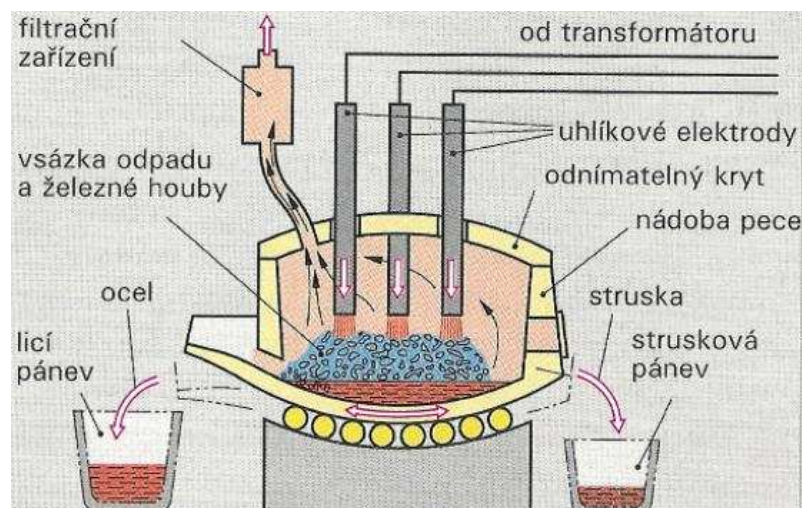
Při kontaktu obráběcího nástroje s obráběným povrchem z Mn ocelí nastává zpevňování povrchu, a to takovým způsobem, že Mn oceli jsou považovány za v podstatě neobrobitelný materiál. Ovšem, za určitých okolností a jsou-li dodrženy obecně přijatelné postupy, je možné tyto oceli obrábět. A v neposlední řadě lze počítat s nově vyvinutými Mn oceli, jež disponují vysokým stupněm obrobitelnosti a tak je nasnadě jejich uplatnění v odpovídajících aplikacích. I když z praxe různých podniků vyplývají odlišnosti, postup obrábění Mn ocelí je obecně shodný. [5,9]

- Dobrý stav a tuhost obráběcích nástrojů
- Vysoká ostrost nástroje, jelikož tupé a opotřebované nástroje jsou příčinou zpevnění obráběného povrchu
- Doporučené rychlosti třískového obrábění se pohybují v rozmezí 9 až 12mm/min. V případě vyšších rychlostí je zvyšováno riziko poškození nástroje
- K nejvhodnějším materiálům, z nichž jsou obráběcí nástroje vyrobeny, patří rychlořezné kobaltové oceli nebo slinuté karbidy s keramickými vložkami
- Tvar součásti by v ideálním případě měl vycházet pouze z odlitku, tak aby se předešlo jakékoli potřebě po úpravách typu obrábění a frézování a tím i nechtěnému zpevňování povrchu

S přihlédnutím k tomu, že obrábění obvykle doprovází vznik tepla na řezné hraně, je nutné jakoukoli obráběcí operaci doprovodit odpovídajícím chlazením. Jinak samotnou obrobitelnost je možné zvýšit zahřátím materialu v rozmezí teplot 540 až 650 °C. [20]

8 Výroba Hadfieldovy oceli

Pro výrobu vysokolegované Mn oceli je v současnosti nejhojněji využíváno obloukové elektrické pece. Je nutné, aby vyzdívka pece byla zásaditého charakteru. U dna a stěn je tomu tak díky zásaditým tvárniciím na bázi magnezitu, jelikož během samotného procesu tavení dochází k tvorbě oxidů manganu (MnO) a je nasnadě jejich reakce s vyzdívkou pece. V peci dochází k tavení elektrickým obloukem, jenž hoří mezi třemi grafitovými elektrodami a právě samotnou tavenou vsázkou. V místě styku elektrod a vsázky dochází k přenosu tepla z obloukového výboje, čímž je za průtoku silného elektrického proudu vsázka roztavena. V blízkém okolí bodu dotyku posléze vnikají plyny v rozmezí teplot $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $4000\text{ }^{\circ}\text{C}$, jenž zabezpečují hoření elektrického oblouku, i v případě dojde-li k oddálení elektrod. Pec je obvykle napájena ze sítě, a to napětím o velikosti 22 kV . [16]



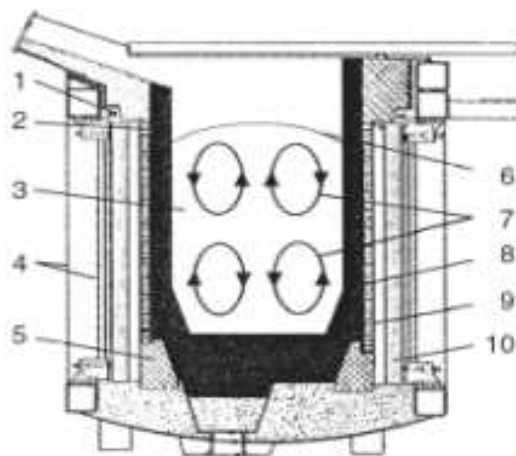
Obrázek 16: Schéma elektrické obloukové pece [12]



Obrázek 17: elektrická oblouková pec [13]

Z ekonomických důvodů v menších slévárnách je výhodnější provoz elektrických indukčních pecí, oproti již zmíněným obloukovým. Zmíněné ekonomické důvody zahrnují výrazně nižší náklady na výstavbu, provoz či modernizaci EIP oproti elektrickým obloukovým pecím. Je to způsobeno zejména velkým pokrokem v oblasti elektrotechniky a konstrukce. Zlomovým bylo nahrazení rotačních měničů polovodičovými měniči, řízených procesorem. Důsledkem je výrazné zkrácení doby tavení, z čehož vyplývá i zvýšená hospodárnost (úspora energie a nákladů za grafitové elektrody) přetavby potažmo celého procesu.

EIP je využívána pro tavení ocelí, litin, Al i jiných neželezných kovů. Tavení je nutně podmíněno přítomností elektricky vodivého materiálu. Proces tavení je založen na elektromagnetické indukci, která je zdrojem vířivých proudů indukovaných v kovu. Při tomto způsobu ohřevu taveniny nedochází k přímému převodu tepla. Jeho zdrojem jsou již zmíněné vířivé proudy. Množství taveného materiálu se pohybuje v rozmezí od jednotek kilogramů až po tuny. V případě vysocelegované Mn oceli je tavení co se týče maloobjemové výroby za pomoci EIP s neutrální vyzdívkou výhodnější než EOP. Upřednostnění vyzdívky neutrálního charakteru u EIP vyplývá z vysoké míry koroze vyzdívky kyselého charakterem při reakcích s Mn.[19]



- | | |
|------------------------------|------------------------------|
| 1 - kroužek spojený nakrátko | 6 - kopulovitá horní hladina |
| 2 - vodou chlazený prstenec | 7 - pohyb taveniny |
| 3 - tavenina | 8 - kelímek |
| 4 - ocelová kostra | 9 - induktor |
| 5 - betonový prstenec | 10 - svazek plechů |

Obrázek 18: Elektronická indukční pec [19]

8.1 Vliv přítomnosti vodíku a dusíku při výrobě Hadfield oceli

Pro přetavbu Hadfieldovy oceli je typický výskyt vodíku ve vyšší koncentraci. Rozdíl přetavby a samostatné mateřské tavby spočívá především ve vsázce. U přetavby je tvořena jak ocelovým odpadem (šrot), tak i vratným materiálem původní mateřské tavby. Obě dvě možnosti však probíhají v elektrické obloukové peci opatřené zásaditou vyzdívkou. V procesu přetavby Hadfieldovy oceli je vodík svázán zejména s náchylností k tvorbě bublin u odlitků. S rostoucím opakováním přetavení oceli roste i výskyt dusíku, jenž sdílí s vodíkem vliv na tvorbu bublin v odlitcích při odlévání, a to v případě, že je překročena hranice rozpustnosti dusíku při tuhnutí taveniny. Vodík v tavenině pochází z vlhkých přísad a současně pecní atmosféry. Zejména díky vyšším teplotám, zásaditosti strusky a klesajícímu obsahu kyslíku je usnadněna absorpce N a H do taveniny. [14,15,16]

9 Použití Hadfieldovy oceli

Hadfieldova ocel je často využívána především v oblasti zemních prací, hornictví, ropných vrtů, výstavby železničních tratí, kolejového svršku, zubů lžic bagrů, při výrobě cementu a výrobků z hlíny.

Austenitické manganové oceli jsou používány v zařízeních pro manipulaci a zpracování zeminy (například drtičů, mlecích mlýnů, eskalátorů kbelíků, posilovače lopatových kbelíků a čerpadel pro manipulaci se štěrkem a kamením). Další aplikace zahrnují fragmentizační kladiva nebo rošty pro recyklaci automobilů a vojenské aplikace, jako jsou pásy pro tanky. Dále je také používáno v prostředí s vysokým abrazivním zatížením, jako uvnitř kuličkovacího stroje. Nově jsou tyto oceli využívány jako kryogenní oceli, kvůli jejich vysoké pevnosti při velmi nízkých teplotách.[2]



Obrázek 19: Příklady odlitků Hadfieldovy oceli [4]

Jelikož jednou z jejích hlavních vlastností je vysoká odolnost proti opotřebení při styku kov na kov, lze se setkat také s použitím u výroby ozubených kol a pastorků, jež vznikají obráběním nástroji z rychlořezné oceli při teplotách štěpení třísky nad 300 °C, nebo řetězů. Stejných vlastností je zapotřebí i pro výrobu železničních srdcovek, kde je dosažen i nízký koeficient tření a odolnost proti rázům, jimiž dochází ke zpevňování. U povrchových vrstev železničních srdcovek lze dosáhnout tvrdosti až 500 HV. [2]



Obrázek 20: Železniční srdcovka jako výrobek z Hadfieldovy oceli

Mezi další aplikace Mn oceli patří například vyložení vnitřní dutiny tryskacích zařízení, skříně turbín, tělesa ventilů, dále potrubí pro lodní kotle, tepelné výměníky nebo tlaková potrubí. Konkrétně u lodních kotlů je použití možné do maximální teploty 450 °C . Díky vysoké odolnosti je Mn ocel vhodná ke zhotovení zámků a opláštění bezpečnostních trezorů. Mn ocel je, kromě přesných odlitků a výrobků na míru, vyráběna v širokém množství polotovarů všech tvarů a rozměrů jako například ve formě silných či tenkých plechů, kruhových tyčí, drátů nebo šestiúhelníkových tyčí.

10 Experimentální program

Hadfieldova ocel je všeobecně známá a ceněná především díky svým komplexním vlastnostem, jejichž podstatou je austenitická struktura zajišťující houževnatost jádra společně s vysokou odolností povrchu proti abrazivnímu opotřebením a možností vysokého stupně zpevnění povrchu, čehož je v praxi hojně využíváno.

Podstatou experimentálního programu, potažmo celé bakalářské práce je za pomoci mechanických zkoušek a dostupných technologií analyzovat, porovnat, vyhodnotit a podat informace o jednotlivých vzorcích předložených firmou, vyhodnotit, které z nich vykazují nejlepší vlastnosti pro případnou následnou aplikaci v praxi, či další možné zpracování daného materiálu. Experiment je složen z klasických metod a zkoušek, jako například měření tvrdosti, metalografie, analýzy chemického složení, ale současně i primárně zaměřených na odolnost a zpevnění povrchu, kam lze zařadit impact test nebo tribo test.

10.1 Výčet zkoušek a testů:

-chemické složení

Tento test proběhne z důvodu zjištění výčtu všech prvků v daném materiálu a jejich podílového zastoupení.

-tvrdost

Na vzorcích bude vykonána statická zkouška tvrdosti podle Brinella, která spočívá ve vniknutí zkušební tělesa (kulového indentoru) do materiálu a následně zjištění průměru vtisku.

-metalografie

V plánu je zhotovení metalografických výbrusů, z nichž bude vyhodnocena struktura a výskyt vměstků.

-tribo test

Tribo test ukáže, k jakému výslednému ovlivnění a jak se budou chovat dotýkající se povrchy při vzájemném pohybu.

-impact test

Tento test stanoví odezvu na dynamické rázové kontaktní namáhání a rázové kontaktní únavy.

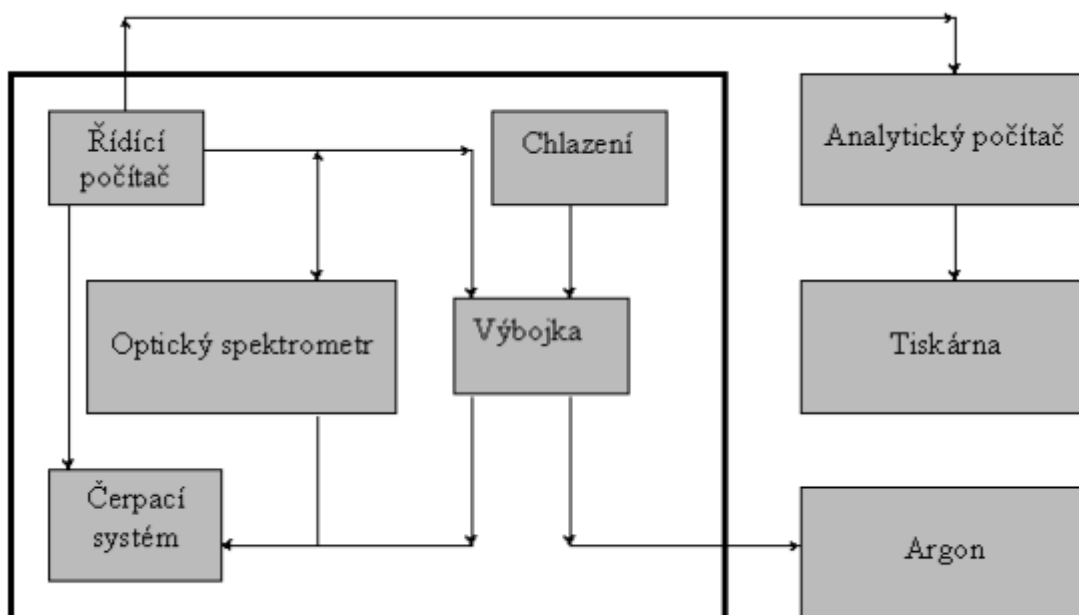
-deformace a zpevnění

Porovnání deformace a zpevnění po seriích dynamického zatěžování

11 Chemické složení

Chemické složení je obecně jednou z nejdůležitějších charakteristik hodnocení kovových materiálů, protože na něm přímo závisí další vlastnosti materiálu jako struktura tvrdost houževnatost a podobně. Co se týče zjištění chemického složení předložených vzorků Mn ocelí, bylo provedeno za pomoci metody GDOES resp. optického emisního spektrometru buzeného doutnavým výbojem. Konkrétně tedy na přístroji GDS-500, jenž dokáže principiálně měřit všechny prvky. Pro tento přístroj jsou kompatibilní elektricky vodivé ploché vzorky, jejichž průměr dosahuje velikosti 13 až 100 mm. Přístroj se skládá ze zdroje doutnavého výboje, optického disperzního členu s možností záznamu záření, pomocných a vyhodnocovacích zařízení.

Záření je vybuzeáno díky doutnavému výboji. K měření je použito tzv. abnormálního doutnavého výboje v závislosti růstu proudu společně s napětím. Povrch analyzovaného vzorku je odprašován v prostoru Grimmovy lampy, následně pak uvolněné atomy a atomové klastry excitovány v atomovém výboji a přechodem do základního stavu emitují fotony. Dané záření je poté ve spektrometru rozloženo na jednotlivé vlnové délky a registrováno detektory. Ze sestavené kalibrace je následně možné přidělit konkrétní hodnotě výstupního proudu detektoru požadovanou hodnotu chemického složení. [24]



Obrázek 21: Blokové schéma GDOES [25]

Protože při měření na přístroji GDOES byl změřený obsah C nedostatečně vysoký, byly ty samé vzorky odeslány na chemický rozbor na kvantometr v laboratoři Pilsen Steel. Následující tabulky zobrazují výsledky chemického složení ze dvou nezávislých měření, jež proběhly na dvou různých přístrojích.

Tabulka 3: chemické složení jednotlivých vzorků GDOS

Vzorek	Chemické složení [hm.%]					
	C	Mn	Si	P	S	Cr
A	0,883	12,300	0,213	0,008	0,0052	0,140
B	0,455	12,100	0,215	0,008	0,0035	0,162
C	0,464	11,800	0,436	0,018	0,0129	0,260
J	0,475	12,400	0,249	0,009	0,0041	0,0525

Vzorek	Chemické složení [hm.%]					
	Ni	W	Mo	V	Cu	Ti
A	0,0758	0,000	0,0658	0,0010	0,1460	0,000
B	0,178	0,000	0,0799	0,0000	0,2690	0,000
C	0,105	0,000	0,0729	0,0030	0,1210	0,000
J	0,0003	0,000	0,0315	0,0003	0,0072	0,000

Tabulka 4: chemické složení jednotlivých vzorků kvantometr

Vzorek	Chemické složení [hm.%]					
	C	Mn	Si	P	S	Cr
A	0,93	9,93	0,23	0,005	0,001	0,19
B	0,65	10,5	0,25	0,007	0,001	0,2
C	0,79	10,3	0,48	0,015	0,006	0,28
J	0,63	10,59	0,29	0,008	0,001	0,09

Vzorek	Chemické složení [hm.%]					
	Ni	W	Mo	V	Cu	Ti
A	0,09	0,022	0,04	0,064	0,15	0,003
B	0,09	0,023	0,04	0,065	0,16	0,003
C	0,08	0,023	0,04	0,065	0,16	0,003
J	0,1	0,022	0,01	0,67	0,03	0,003

Z těchto výsledků je patrné, že při měření chemického složení značně záleží na stavu zařízení a jeho nastavení. Z výsledků, které ukazují nižší udávanou hodnotu uhlíku vyplývá možná skutečnost, že povrch vzorků mohl být oduhlíčený, tudíž bylo přikročeno k dalšímu měření, tentokrát po odbroušení vrchní vrstvy vzorků.

Tabulka 5: Chemické složení jednotlivých vzorků GDOS po odbroušení oduhličené vrstvy

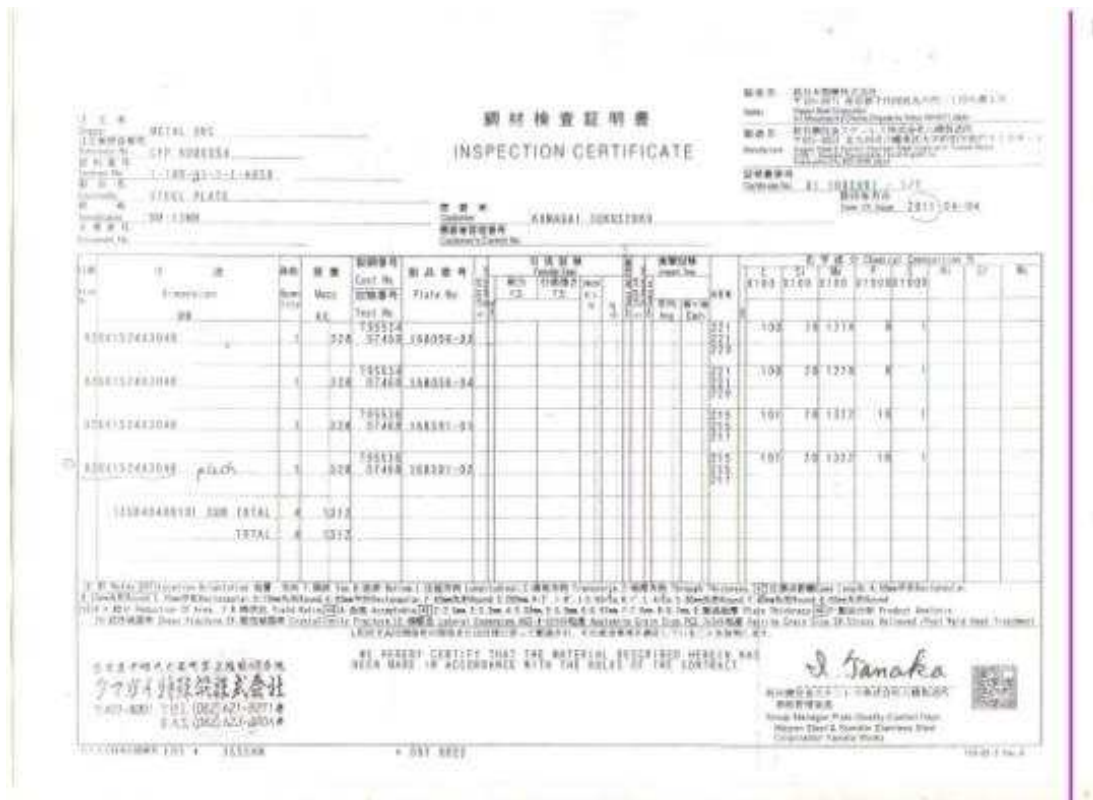
Vzorek	Chemické složení [hm.%]					
	C	Mn	Si	P	S	Cr
A	1,05	12,1	0,454	0,025	0,014	0,352
B	0,90	12,6	0,242	0,015	0,004	0,234
C	0,91	12,4	0,285	0,167	0,004	0,305
J	0,88	13,1	0,276	0,015	0,004	0,097

Vzorek	Chemické složení [hm.%]					
	Ni	W	Mo	V	Cu	Ti
A	0,109	0,023	0,073	0,009	0,115	0,0008
B	0,114	0,018	0,071	0,006	0,154	0,0005
C	0,116	0,013	0,072	0,007	0,167	0,0003
J	0,016	0,010	0,029	0,004	0,013	0,0002

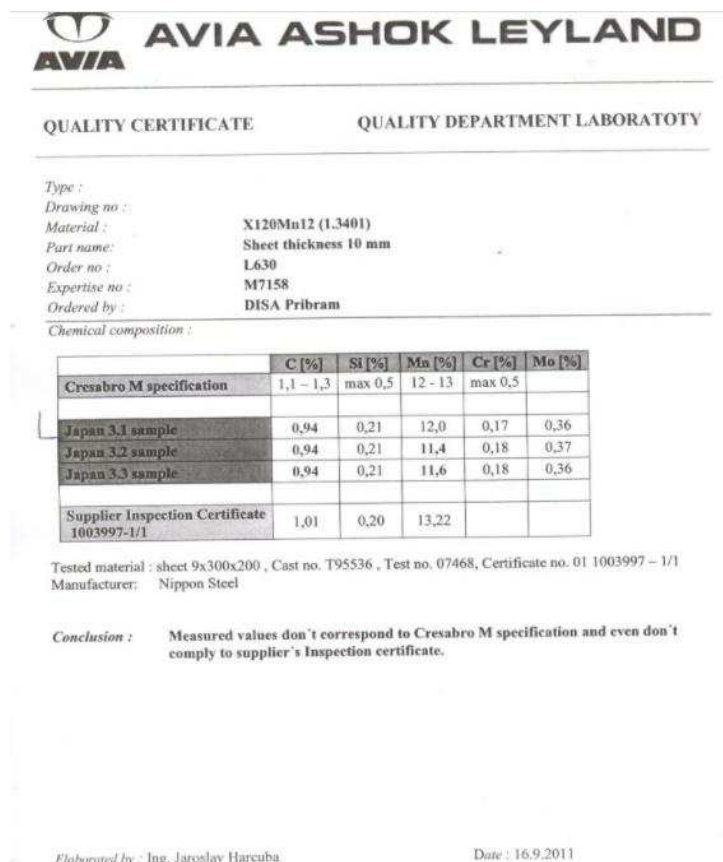
Vzorky byly odebrány z místa, kde byla povrchová vrstva odbroušena. Tedy oduhličení by v tomto případě nemělo hrozit. K vzorkům byly dodány certifikáty od čínského výrobce.



Obrazek 22: certifikát vzorek B



Obrázek 23: certifikát vzorek J



Obrázek 24: certifikát vzorek A

Z dodaných podkladů je patrné, že orientace podle certifikátů od výrobců je problémová. Chemické složení na testech dodaných výrobcem nesouhlasilo se změřenými hodnotami. Na testech vykazovaly jednotlivé dodané šarže zcela stejné chemické složení ve všech prvcích, což je velmi nepravděpodobné.

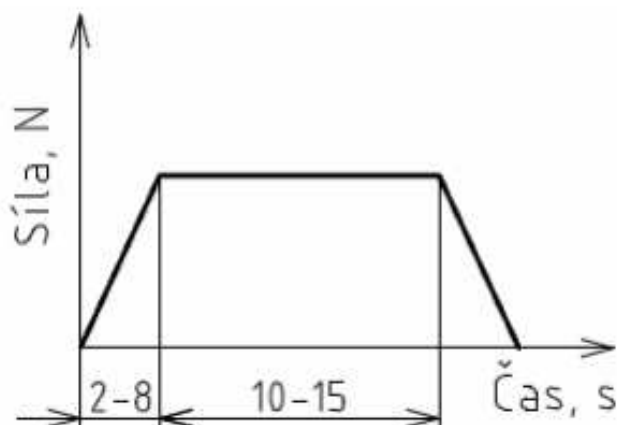
Díky více měření a odbroušení bylo prokázáno značné oduhličení povrchu, které bylo odstraněno po odbroušení 0,5 mm vrstvy. Je patrné, že k tomuto dochází při rozpouštěcím žíhání na vysokou teplotu. Oduhličení změní zásadně vlastnosti materiálu, zřejmě je schopno ovlivnit rychlost transformace austenitu na martenzit, výslednou tvrdost a otěruvzdornost. Zabránit tomuto nežádoucímu jevu není jednoduché. Manipulace s materiálem při umělé atmosféře není příliš operativní. Uskutečnitelnou možností by bylo provedení zásyvu ohřívaného materiálu litinovými třískami, což by technologický proces příliš nezatížilo. Jinou možností je využití poznatků z patentu [33], kdy pro tenkostěnné odlitky stačí do austenitické manganové oceli se sníženým obsahem uhlíku přidat 0,5 až 2% Mo. Výsledkem jsou odlitky dosahující převážně austenitické struktury, které obsahují minimální podíl vyloučených karbidů a s plně dostatečnou houževnatostí pro aplikaci v provozu.

12 Zkouška tvrdosti

Tvrdot je jednou z nerozšířenějších základních mechanických charakteristik kovových železných, ale i neželezných slitin v technické praxi, a to zejména pro svoji jednoduchost. Ke stanovení příslušných hodnot tvrdosti jednotlivých předložených vzorků byla zvolena zkouška tvrdosti podle Brinella, jelikož je vhodná k měření tvrdosti měkkých a středně tvrdých materiálů. Zkoušku popisuje norma ČSN EN ISO 6505. Konkrétně se jedná o makroskopickou statickou, vnikací zkoušku tvrdosti. Brinellova zkouška vyjadřuje tvrdost jako poměr působícího zatížení F k ploše povrchu A kulovitého vtisku. Samotná zkouška vychází z podstaty vtlačení ocelové kalené leštěné kuličky o průměru D do zkušební vzorku za pomoci síly F , jež působí směrem kolmo k měřenému povrchu po stanovenou dobu a následného změření průměru vtisku d , které následuje po odlehčení zatížení.[23]

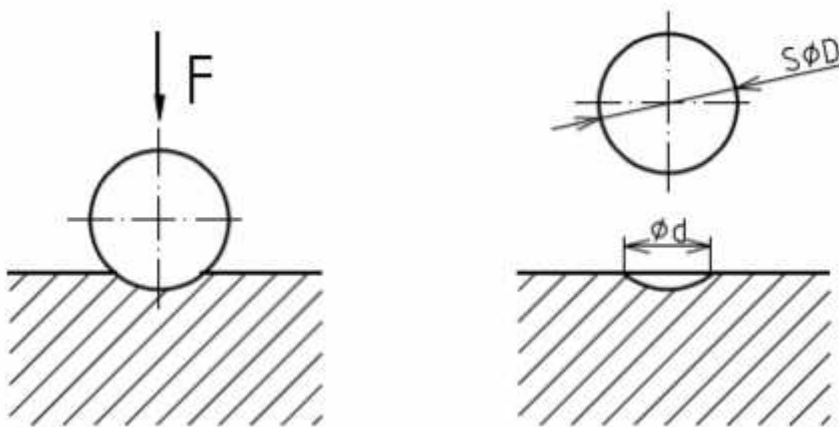
12.1 Postup měření

Před samotným započítím měření je potřeba zhotovit odpovídající povrch vzorků pro vtisky. Jelikož samotné vtisky jsou větších rozměrů, postačí jednoduché zarovnání povrchů tak, aby bezpečně dosedl na zkušební stroj, zkušební povrch musí být bez přítomnosti jakýchkoli cizích těles, okují a mazadel. Náběh zatížení z nuly do jeho nominální hodnoty musí být v rozmezí 2 s až 8 s. Doba trvání plného zatížení je pro slitiny železa stanovena na 10 s až 15 s. [23]



Obrázek 25: Průběh zkušebního zatížení [23]

Požadavek na minimální tloušťku zkušební materiálu musí odpovídat alespoň desetinásobku hloubky vtisku, aby bylo zaručeno, že plastická deformace proběhne ve zkušebním tělese. Průměr kuličky a dané zatížení je nutné volit tak aby vtisk odpovídal rozmezí 0,25-0,6 D . Vtisk je měřen na mikroskopu a ve dvou na sebe vzájemně kolmých směrech a výsledná hodnota odpovídá jejich aritmetickému průměru. Ještě je třeba dbát na minimální vzdálenost zaprvé středu vtisku a okraje zkušební vzorku, která nesmí být menší než 2,5 d , a zadruhé středů dvou sousedních vtisků, jež musí odpovídat alespoň 4 d . [23]



Obrázek 26: Princip zkoušky dle Brinella[23]

12.2 Výpočet tvrdosti

Pro účely této mechanické zkoušky byl zvoleno zatížení 750 kg a velikost kuličky 5 mm. Doba trvání vtisku byla 10 sekund

$$F = m \cdot g = 750 \cdot 9,81 = 7357,5\text{N}$$

$$D = 5 \text{ mm}$$

Pro 1. měření:

$$d_1 = \frac{2,16116 + 2,17116}{2} = 2,166\text{mm}$$

$$HB_1 = \frac{0,102 \cdot 2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d_1^2})} = \frac{0,102 \cdot 2 \cdot 7357,5}{\pi \cdot 5 \cdot (5 - \sqrt{5^2 - 2,166^2})} = 193,6\text{HB}$$

Pro 2. měření:

$$d_2 = \frac{2,14719 + 2,15105}{2} = 2,149\text{mm}$$

$$HB_2 = \frac{0,102 \cdot 2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d_2^2})} = \frac{0,102 \cdot 2 \cdot 7357,5}{\pi \cdot 5 \cdot (5 - \sqrt{5^2 - 2,149^2})} = 196,8\text{HB}$$

Pro 3. měření:

$$d_3 = \frac{2,15441 + 2,1469}{2} = 2,150\text{mm}$$

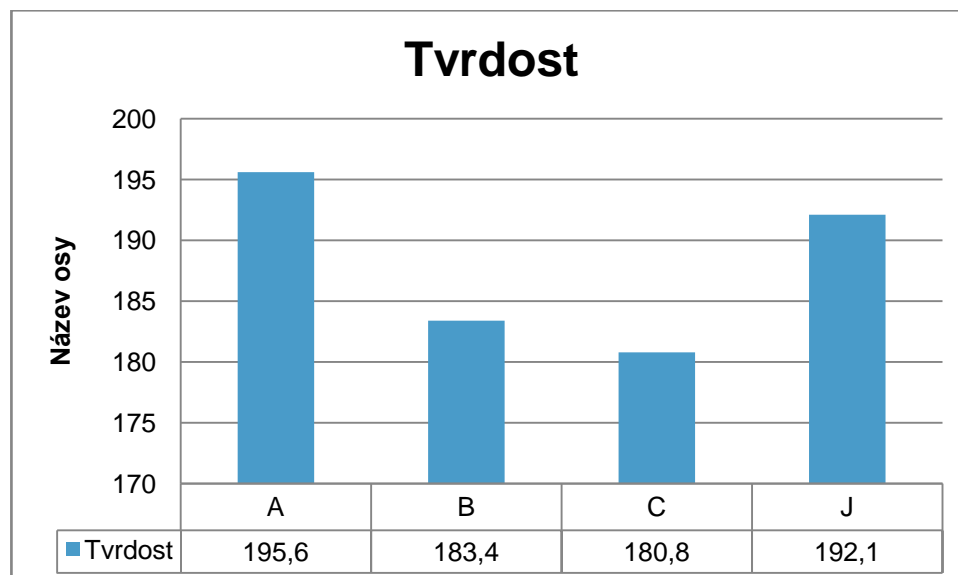
$$HB_3 = \frac{0,102 \cdot 2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d_3^2})} = \frac{0,102 \cdot 2 \cdot 7357,5}{\pi \cdot 5 \cdot (5 - \sqrt{5^2 - 2,150^2})} = 196,6\text{HB}$$

Tabulka 6 Tabulka výsledných hodnot tvrdosti z ukázkového výpočtu vzorku A

Statistické vyhodnocení metody Brinell A			
Měření	Hodnoty	Průměr	Směrodatná odchylka
1.	193,6 HB	195,6 HB	2,1 HB
2.	196,8 HB		
3.	196,6 HB		

Tabulka 7: Vypočtené hodnoty tvrdosti všech vzorků dle Brinella [HB]

Vypočtené hodnoty tvrdosti všech vzorků dle Brinella [HB]				
Vzorek	A	B	C	J
Vtisk 1	193,6	181,5	177,9	193,2
Vtisk 2	196,8	186,4	180,3	192,1
Vtisk 3	196,6	182,4	184,3	191,1
průměr	195,6	183,4	180,8	192,1
Směr. Och.	2,1	4,5	6,9	0,7

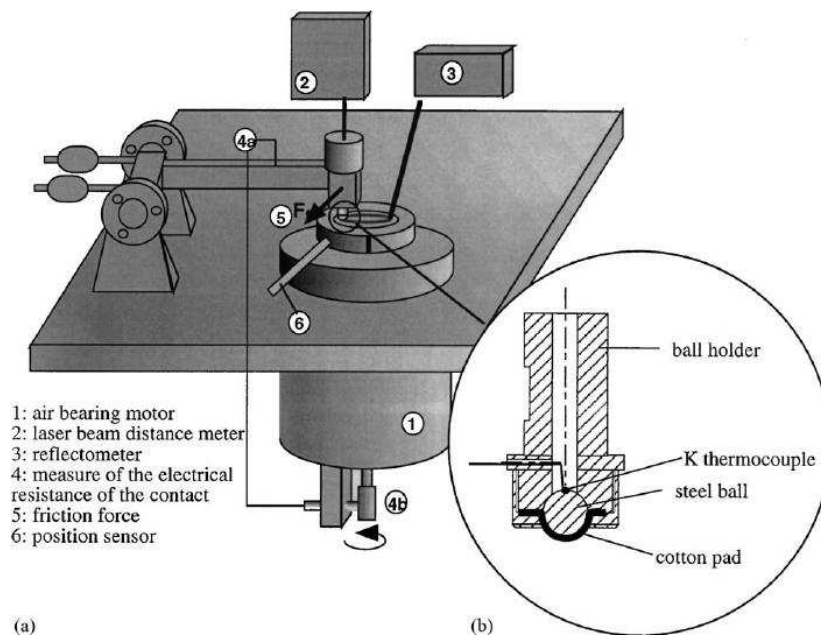


Obrázek 27: Graf porovnání průměrných hodnot tvrdosti jednotlivých vzorků

Z testování tvrdosti vyplývá, že vzoreky A a J mají nejvyšší tvrdost, což vyplývá i z chemického složení.

13 Tribo test

Jelikož jednou z nejpodstatnějších mechanických vlastností Hadfieldovy oceli je odolnost proti abrazivnímu opotřebení a zpevňování povrchu, pak jednou z možností jak dané vlastnosti interpretovat na předložených vzorcích je tribologické testování. Tribologie se v obecném pojetí zabývá chováním dvou povrchů ve vzájemném pohybu. Samotné testování bylo provedeno za pomoci standardní metody měření opotřebení Pin-on-Disc.



Obrázek 28 schéma Pin-on-Disc [27]

Tato metoda spočívá v tom, že pevně uchycené zkušební tělísko ve tvaru kuličky na pákovém rameni, daného materiálu, působí zvolenou silou na zkušební vzorek, který je pevně uchycen ve sklíčidle, jenž se otáčí zvolenou rychlostí typicky v rozmezí 0,3 až 3 rad /s ; (60 až 600 ot / min). Bezprostředně před samotným testováním a vážením je nutné zajistit, aby se na vzorku nenacházela cizí tělesa ani nečistoty, jelikož by mohlo dojít ke zkreslení či znehodnocení výsledků měření. Přístroj musí být vybaven otáčkoměrem či jiným zařízením schopným vypnutý přístroje po uplynutí přesně daného počtu otáček. [26]

Testování proběhlo pomocí tribologického zařízení vyvinutého na KMM ZČU jenž byl zhotoven pracovníky katedry. Nejedná se o standardizované zařízení, tudíž vyhodnocení proběhlo jednoduchým porovnáním získaných výsledků, přičemž pro všechny testované vzorky byly nastolené totožné podmínky. Byla použita 6 mm kulička z Al_2O_3 , přičemž je uvažováno její prakticky zanedbatelné nulové opotřebení, $n=252$ ot/min, 10000cyklů, závaží 1,5 kg a z důvodu přesnosti měření váhového úbytku zbrúšený a leštěný povrch vzorků. Na každém vzorku byly provedeny 3 stopy.



Obrázek 29: Zařízení pro tribologii na KMM ZČU

13.1 Metoda váhových úbytků

První metodou hodnocení jednotlivých vzorků je porovnání váhových úbytků materiálu. Jelikož v mnoha případech jsou váhové úbytky takřka neměřitelné, jedná se méně užívaný způsob hodnocení. K měření hmotnosti byla využita váha s přesností měření na desítitisícinu 0,0001 gramu. Vzorky byly zváženy a údaje jsou v následující tabulce.



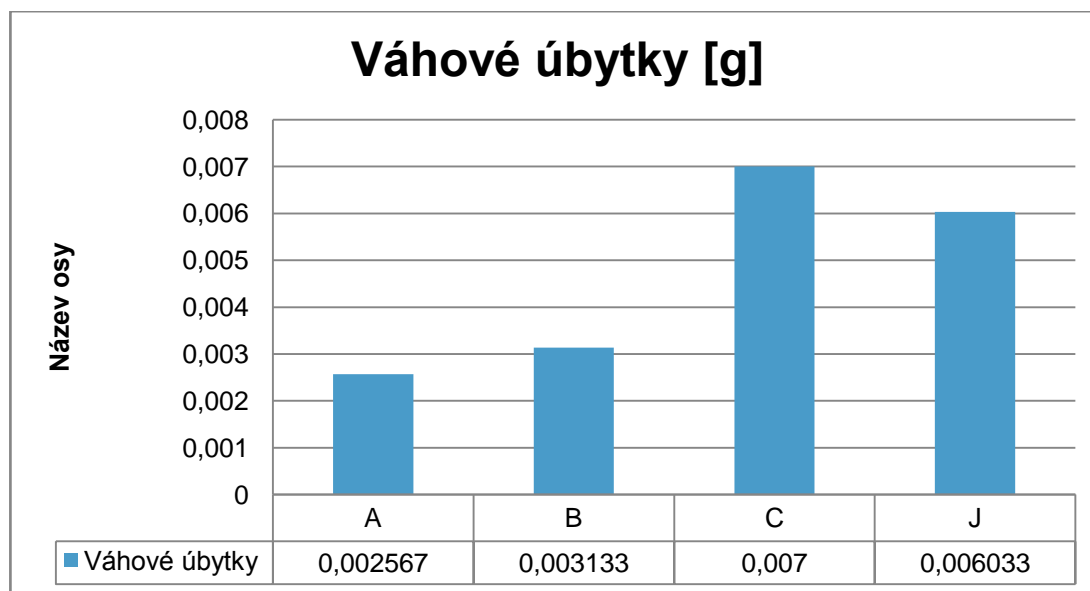
Obrázek 30: Váha, jež byla využita k měření váhy a váhových úbytků u jednotlivých vzorků

Tabulka 8: Tabulka vah vzorků po provedení jednotlivých stop v gramech

Vzorky				
stopa	A	B	C	J
0	69,6865	193,7515	85,3461	162,4302
1	69,6831	193,7479	85,3391	162,4235
2	69,6811	193,7445	85,3321	162,419
3	69,6788	193,7421	85,3251	162,4121

Tabulka 9: Tabulka váhových úbytků materiálu a jejich průměru po provedení jednotlivých stop v gramech

Vzorky				
stopa	A	B	C	J
1	0,0034	0,0036	0,007	0,0067
2	0,002	0,0034	0,007	0,0045
3	0,0023	0,0024	0,007	0,0069
průměr	0,002567	0,003133	0,007	0,006033



Obrázek 31: Graf porovnání průměrných váhových úbytků jednotlivých vzorků

13.2 Metoda odebraných objemů

Druhou metodou je hodnocení pomocí odebraného objemu na základě normy ASTM G99. Ten se spočítá z následujícího vzorce.

$$V = \frac{\pi * r [mm] * (u [mm])^3}{6 * r_{kuličky} [mm]} [mm^3]$$

V... odebraný objem [mm³]

r...poloměr stopy[mm]

u.....šířka stopy[mm]

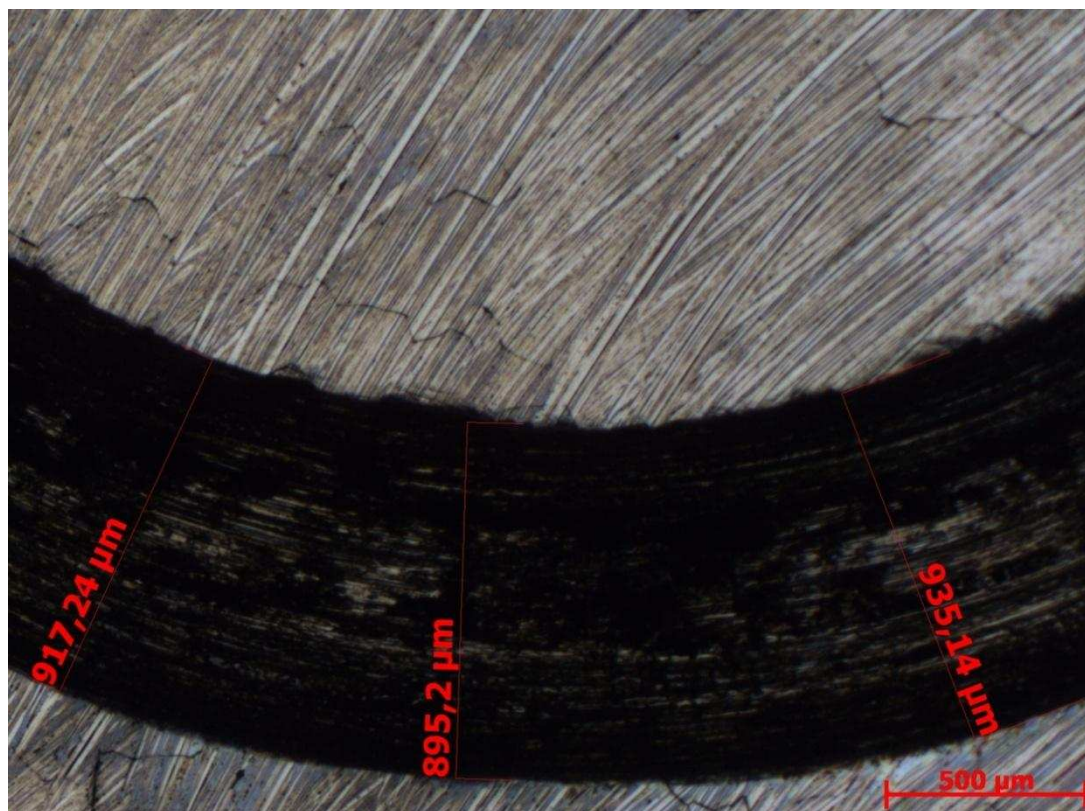
r_{kuličky} ... poloměr kuličky [mm]

Příklad výpočtu odebraného objemu pro 1 stopu vzorku A

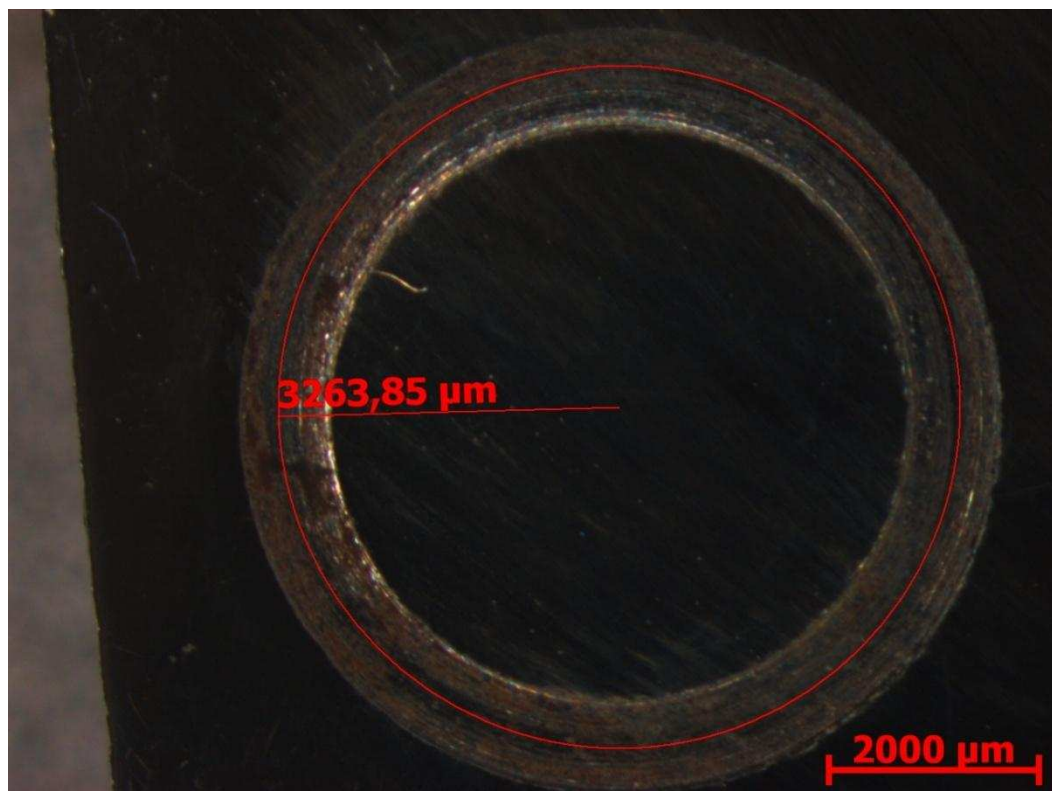
$$V = \frac{\pi * 3,263 * (0,930917)^3}{6 * 6} = 8,26569 [mm^3]$$

Tabulka 10: Tabulka změřených šířek stop a jejich výsledná průměrná hodnota použitá pro výpočet

pozice	u(šířka stopy) [mm]
1	0,917
1	0,895
1	0,935
2	0,953
2	0,959
2	0,959
3	0,917
3	0,906
3	0,907
4	0,937
4	0,951
4	0,935
průměr	0,930917



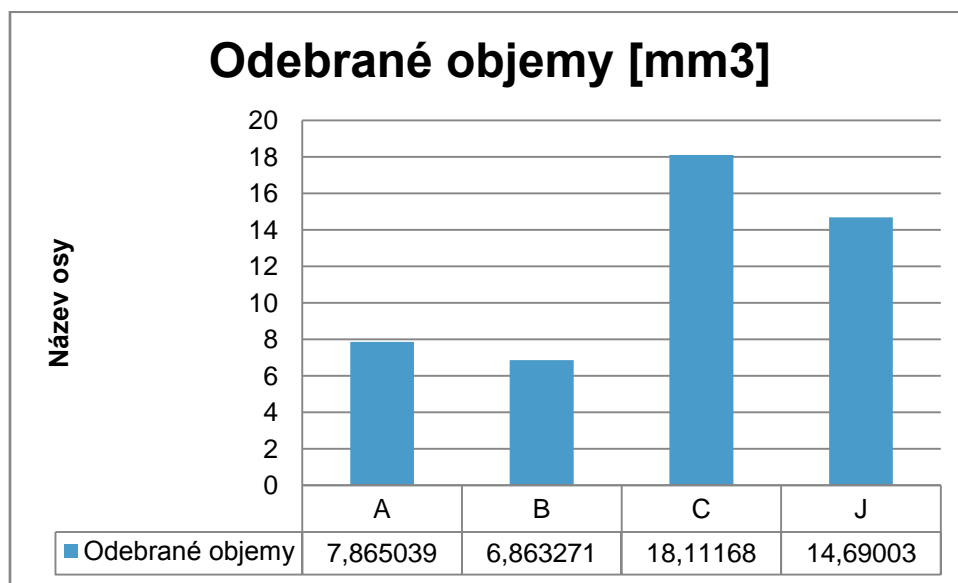
Obrázek 32: Příklad z měření šířek stopy na 1 pozici 1 stopy vzorku A



Obrázek 33: Příklad z měření poloměru 1 stopy vzorku A

Tabulka 11: Tabulka odebraných objemů po provedení jednotlivých stop a jejich průměr v [mm³]

Vzorky				
stopa	A	B	C	J
1	8,26569	6,857758	18,60546	17,38555
2	7,542278	7,203656	17,66026	13,13678
3	7,787148	6,528398	18,06932	13,54776
průměr	7,865039	6,863271	18,11168	14,69003



Obrázek 34: Graf porovnání průměrných odebraných objemů jednotlivých vzorků

13.3 Metoda velikosti koeficientu opotřebení

Třetí metodou je hodnocení pomocí velikosti koeficientu opotřebení W, který se jednoduše vypočte z následujícího vzorce.

$$W = \frac{V}{S * L} \left[\frac{mm^3}{N * m} \right] * 10^{-4}$$

V... objem vypočtený v předchozí kapitole 13.2 [mm³]

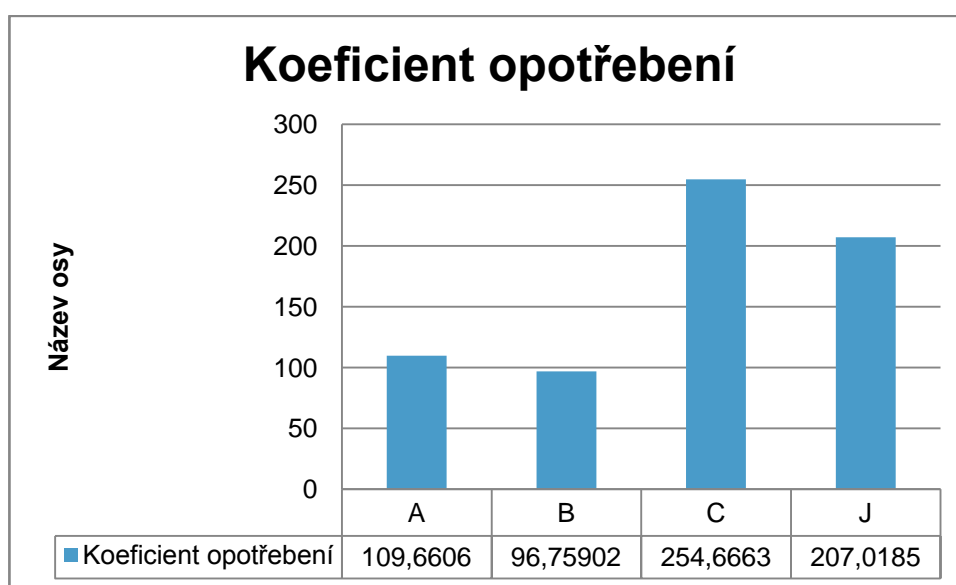
S... dráha kterou indentor urazí $S = 2 * \pi * r_{kruhu} * (\text{počet cyklů})$ [m]

L... zatížení $L = m * g$ [N]

$$W = \frac{8,26569}{2 * \pi * 3,263 * 10000 * 1,5 * 9,81} = 115,2228 * 10^{-4} \left[\frac{mm^3}{N * m} \right]$$

Tabulka 12: Tabulka vypočtených koeficientů opotřebení v jednotkách $\left[\frac{\text{mm}^3}{\text{N}\cdot\text{m}} \right]$

Vzorky				
Stopa	A	B	C	J
1s	115,2228	96,9447	261,5041	244,8037
2s	105,1708	101,7415	248,2946	185,314
3s	108,5883	91,59085	254,2002	190,9379
průměr	109,6606	96,75902	254,6663	207,0185



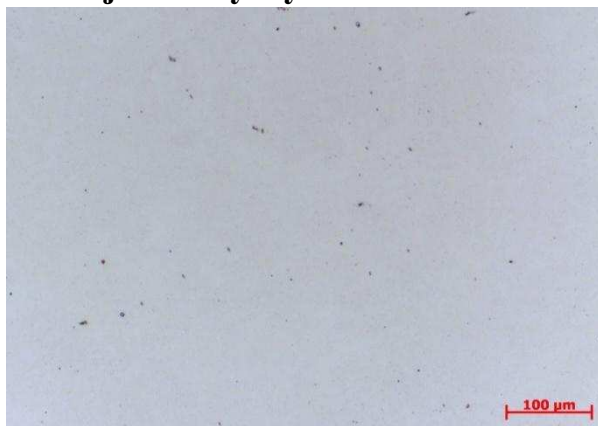
Obrázek 35: Graf průměrné velikosti koeficientů tření jednotlivých vzorků v jednotkách $\left[\frac{\text{mm}^3}{\text{N}\cdot\text{m}} \right]$

U všech vzorků proběhlo také měření a porovnání mikrotvrdomosti vždy pod vzniklou stopou a uprostřed materiálu. Naměřené hodnoty byly ovšem víceméně shodné, tudíž nedošlo k žádnému zpevnění povrchu materiálu. Tribologické testování tedy nebude zřejmě pro vyhodnocení tohoto material příliš vhodné.

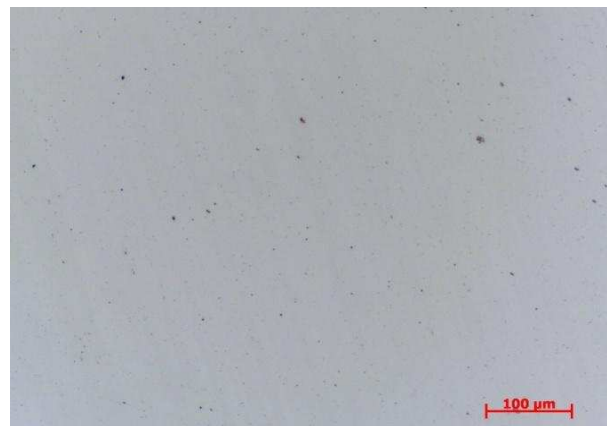
14 Metalografie

Zhotovení fotografií z metalografických výbrusů jednotlivých vzorků společně s chemickým složením dokáže podat rozšířenou představu o makrostruktúře a vnějších vlastnostech, jež jsou ovšem stále projevem jejich mikrostruktury. Pro každý z pěti předložených vzorků plechů Mn ocelí byly zhotoveny výbrusy v příčném a podélném směru. Z těchto výbrusů byly pořízeny fotografie jak v nenaleptaném stavu, z důvodu zjištění případného výskytu většího počtu vměstků, tak po naleptání a vyniknutí samotné struktury vzorků. Co se týče leptání, byly vyzkoušeny dvě varianty leptadel, Nital a leptadlo dostupné z literatury o složení (50ml HCl+50 ml denaturovaného etanolu+ pár kapek H₂O₂), z nichž ta druhá vykázala znatelně lepší výsledky. Ačkoli i tak bylo leptání a pořízení fotografií značně obtížné z důvodu rychlé koroze vzorků po naleptání, tudíž v mnoha případech utrpěla kvalita výsledných fotografií zhotovených na mikroskopu Zeiss Observer.Z1m na KMM ZČU. Všechny fotografie v této kapitole jsou pořízeny ve 200 násobném zvětšení a naleptány pomocí sloučeniny HCl denaturovaného etanolu a H₂O₂, pokud není uvedeno jinak.

14.1 Zjištění výskytu vměstků



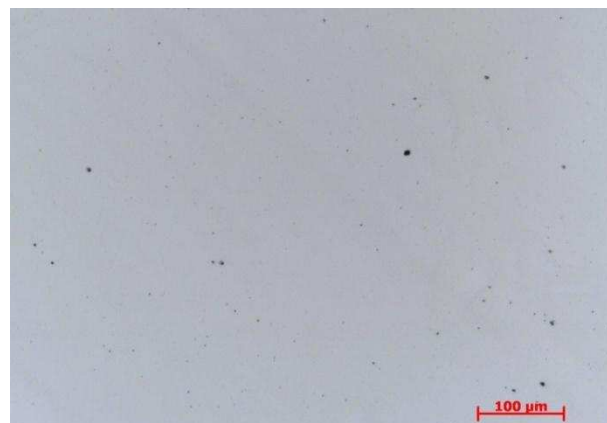
Obrázek 36: Vzorek A v podélném řezu, vyleštěný



Obrázek 37: Vzorek A v příčném řezu, vyleštěný



Obrázek 38: Vzorek B v podélném řezu, vyleštěný



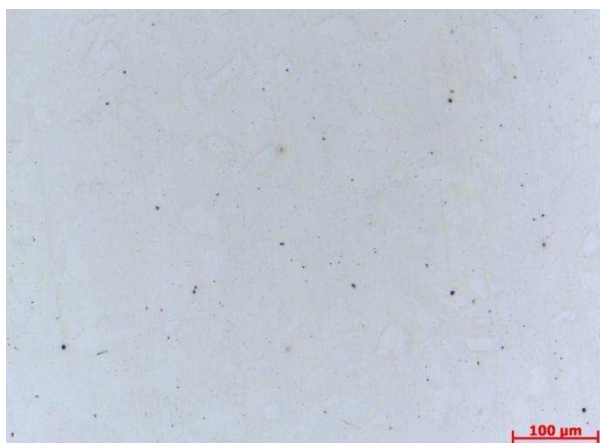
Obrázek 39: Vzorek B v příčném řezu, vyleštěný



Obrázek 40: Vzorek C v podélném řezu, vyleštěný



Obrázek 41: Vzorek C v příčném řezu, vyleštěný



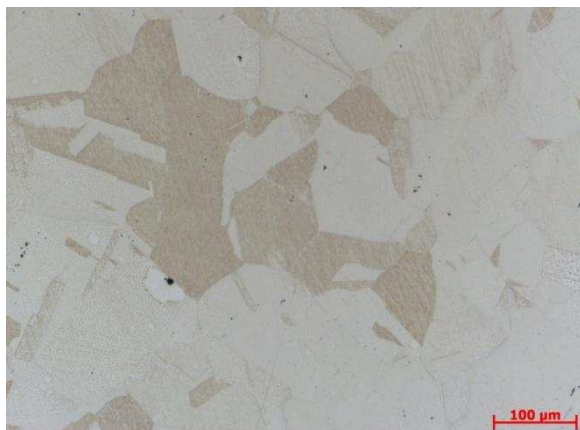
Obrázek 42: Vzorek J v podélném řezu, vyleštěný



Obrázek 43: Vzorek J příčně, vyleštěný

Z přiložených fotografií všech vzorků, jenž byly cíleně pořízeny v místech s největší koncentrací nehomogenit struktury vyplývá, že jejich velikost a hustota výskytu žádným zásadním způsobem neovlivňuje mechanické vlastnosti jednotlivých materiálů a nebrání tak jejich využití pro výrobní účely.

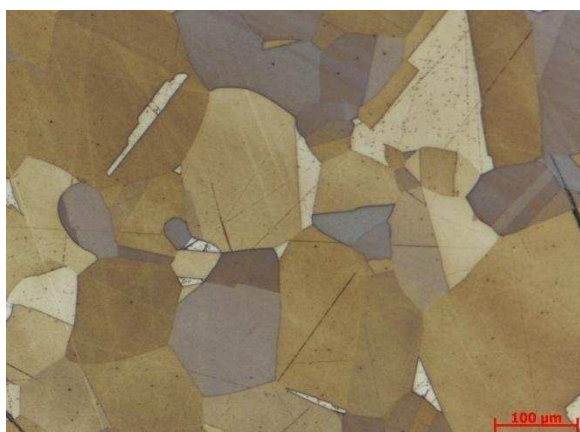
14.2 Zhodnocení a porovnání struktury a výskytu karbidů vyloučených po hranicích zrn



Obrázek 44: Vzorek A v podélném řezu, naleptaný



Obrázek 45: Vzorek A v příčném řezu, naleptaný



Obrázek 46: Vzorek B v podélném řezu, naleptaný



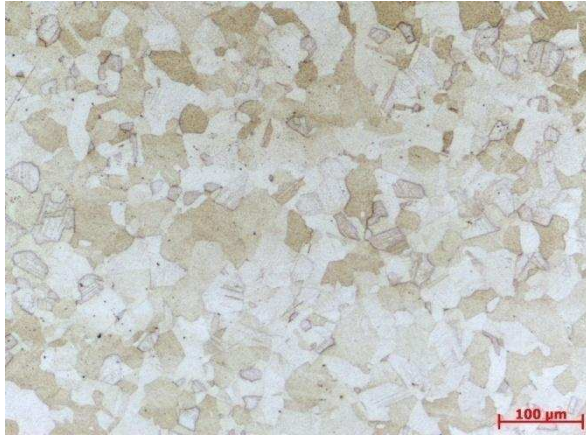
Obrázek 47: Vzorek B v příčném řezu, naleptaný



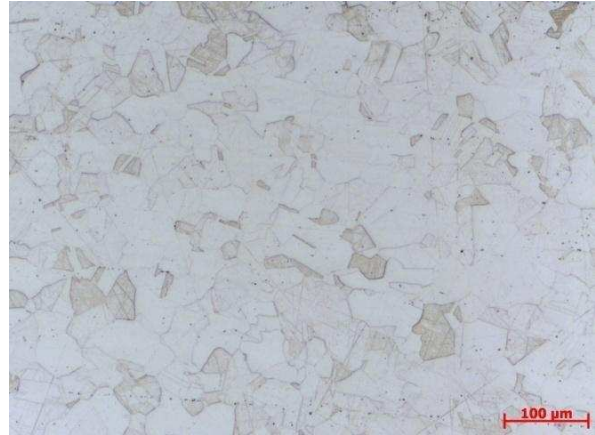
Obrázek 48: Vzorek C v podélném řezu, naleptaný



Obrázek 49: Vzorek C v příčném řezu, naleptaný



Obrázek 50: Vzorek J v podélném řezu, naleptaný



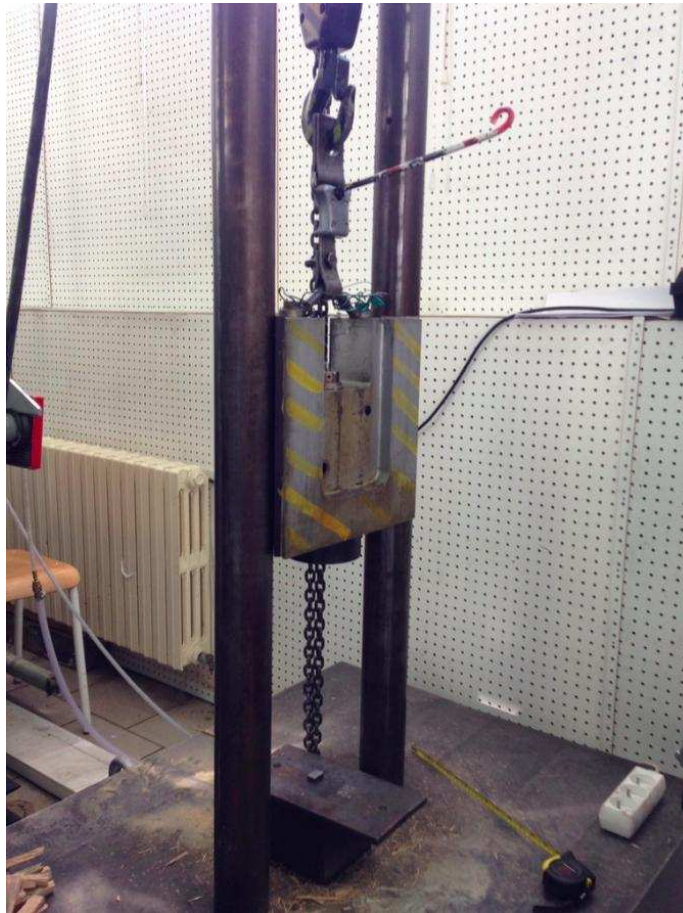
Obrázek 51: Vzorek J v příčném řezu, naleptaný

U všech vzorků předložených ocelí je zcela zřejmá austenitická struktura oceli a současně je ze struktury patrný velmi slabý výskyt vyloučených karbidů po hranicích austenitických zrn, tudíž lze konstatovat, že vzorky byly podrobeny tepelnému zpracování, během něhož došlo k rozpuštění karbidů a homogenizaci struktury. Dále z velikosti zrn u vzorku J, která je znatelně menší, než u ostatních vzorků vyplývá, že tento vzorek byl podroben nějakému druhu tepelně mechanického zpracování na zjemnění austenitického zrna, pravděpodobně řízenému válcování za tepla s dostatečně vysokými teplotami, aby mohla probíhat rekrytalizace.

Jednou z praktických zkušeností je také fakt, že zhotovení kvalitního vyleštěného a naleptaného povrchu daných výbrusů doprovázely značné komplikace. Mn oceli jsou velmi obtížným materiálem k dokonalému vyleštění, což podtrhuje i skutečnost, že po naleptání dále vyniknou dříve neviditelné rýhy a škrábance a současně prakticky ihned po naleptání dochází ke korozi povrchu. Bylo tedy nutné pracovat velmi rychle k pořízení ucházejících snímků.

15 Experiment deformace a zpevnění

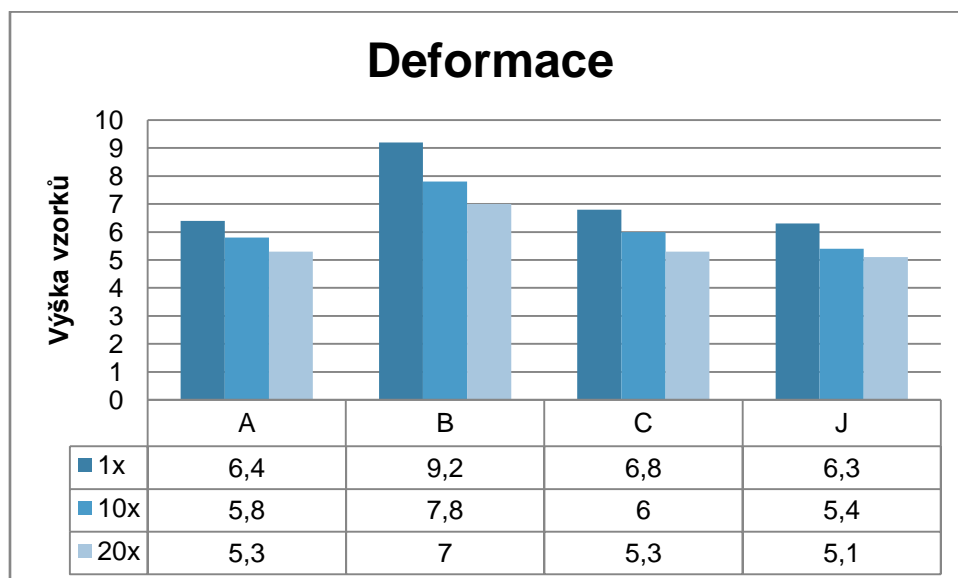
Cílem tohoto experimentu je zhodnotit následky dynamického zatěžování u jednotlivých vzorků. Tedy o kolik bude daný vzorek zdeformován, porovnat strukturu pod povrchem který byl zatěžován v závislosti na zpevnění povrchu. Z každého materiálu A,B,C a J byly pro experiment zhotoveny 3 vzorky o totožných rozměrech tedy 1,5x1,5x1 [cm] na které bylo z výšky 30 cm puštěno závaží o hmotnosti 45 kg (viz následující obrázek) s postupně rostoucím počtem opakování a to 1x, 10x a 20x.



Obrázek 52: Zařízení použité pro experiment porovnání velikostí zpevnění a deformace

15.1 Deformace

Z následujícího grafu je patrné porovnání poklesu výsledných výšek jednotlivých vzorků po daném počtu opakování dynamických úderů závažím z počáteční výšky 10 [mm]. Hodnoty byly naměřeny za pomoci posuvného měřítka.



Obrázek 53: Graf výšky jednotlivých vzorků v závislosti na počtu úderů závaží

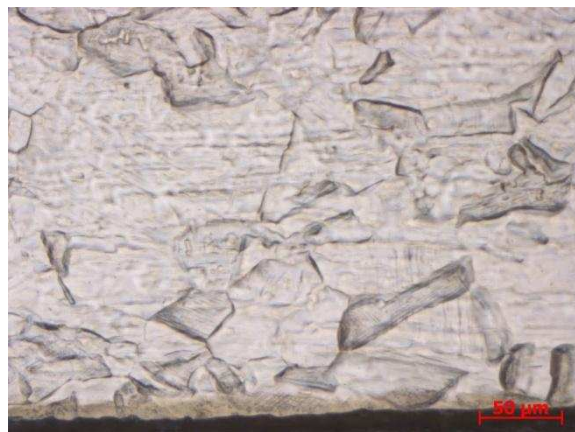
Z hodnot grafu vyplývá, že k nejmenší deformaci došlo u vzorku B, oproti tomu nejvíce zdeformovaný byl vzorek J, ovšem rozdíly v deformaci v porovnání se vzorky A a C jsou minimální.

15.2 Zpevnění

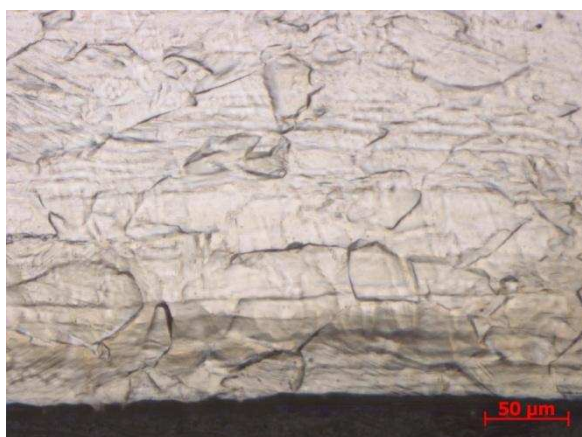
Na následujících snímcích jsou vyobrazeny struktury pod zatěžovaným povrchem jednotlivých vzorků. V tomto případě bylo vyniknutí struktury dosaženo tak, že vybroušený vzorek byl podroben procesu chemického leštění, jehož předlohu tudíž samotný postup bylo pro dané vzorky značně náročné optimalizovat. Benefitem toho procesu bylo zároveň naleptání a vyniknutí daných struktur. Každý vzorek ponořen do roztoku 28ml kyseliny šťavelové, 80ml destilované vody a 4 ml H_2O_2 po dobu 7 minut při teplotě 35-40 °C a za občasného očištění leptaného povrchu vatou. Bylo tak docíleno znatelně kvalitnějšího povrchu pro pořízení fotografií s nižším výskytem škrábanců. Problémem byl ovšem členitý reliéf povrchu, způsobený leptadlem, který byl následně korigován za pomoci mikroskopu a počítače. Všechny následující snímky jsou pořízeny s 200 násobným zvětšením, není-li uvedeno jinak. [30]



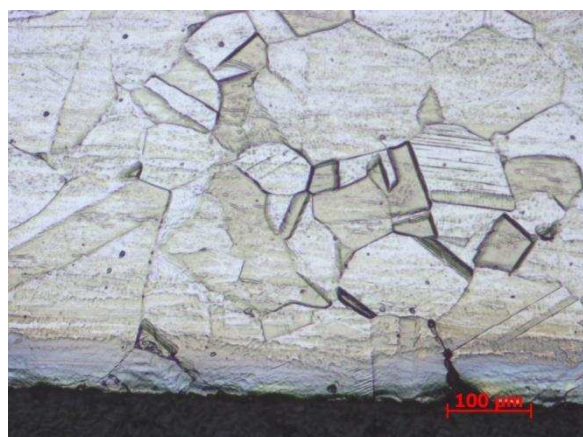
Obrázek 54: Vzorek A, zatížení 1x



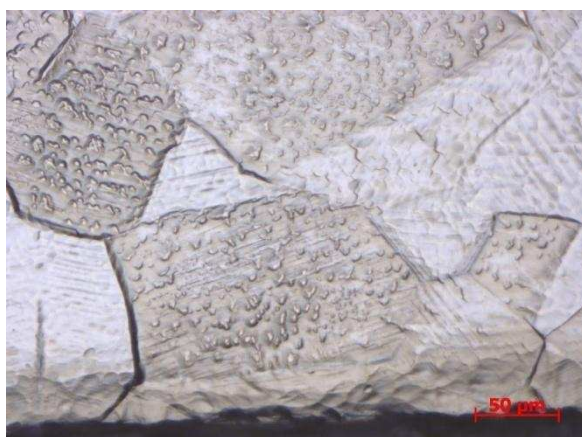
Obrázek 55: Vzorek A, zatížení 10x



Obrázek 56: Vzorek A, zatížení 20x



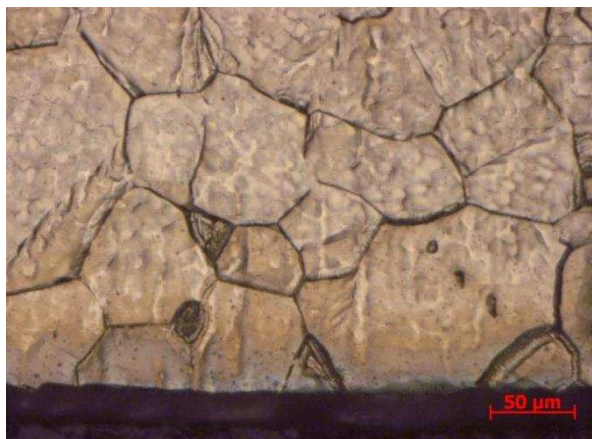
Obrázek 57: Vzorek B, zatížení 1x zvětšení 1x



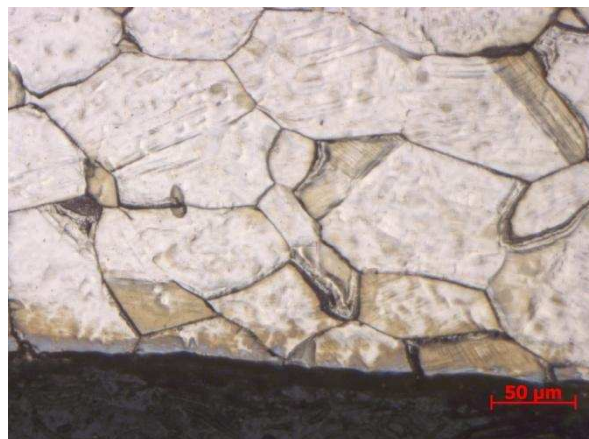
Obrázek 58: Vzorek B, zatížení 10x



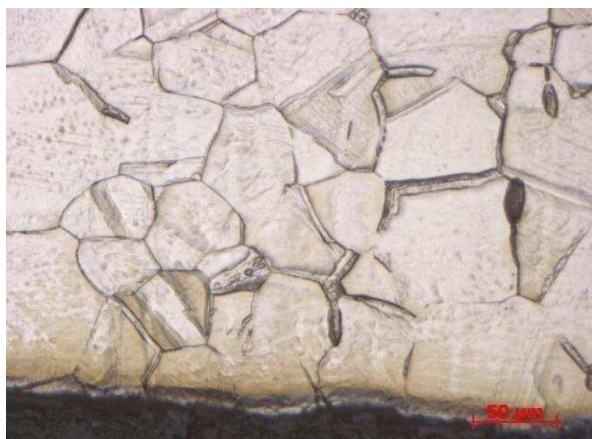
Obrázek 59: Vzorek B, zatížení 20x



Obrázek 60: Vzorek C, zatížení 1x



Obrázek 61: Vzorek C, zatížení 10x



Obrázek 62: Vzorek C, zatížení 20x



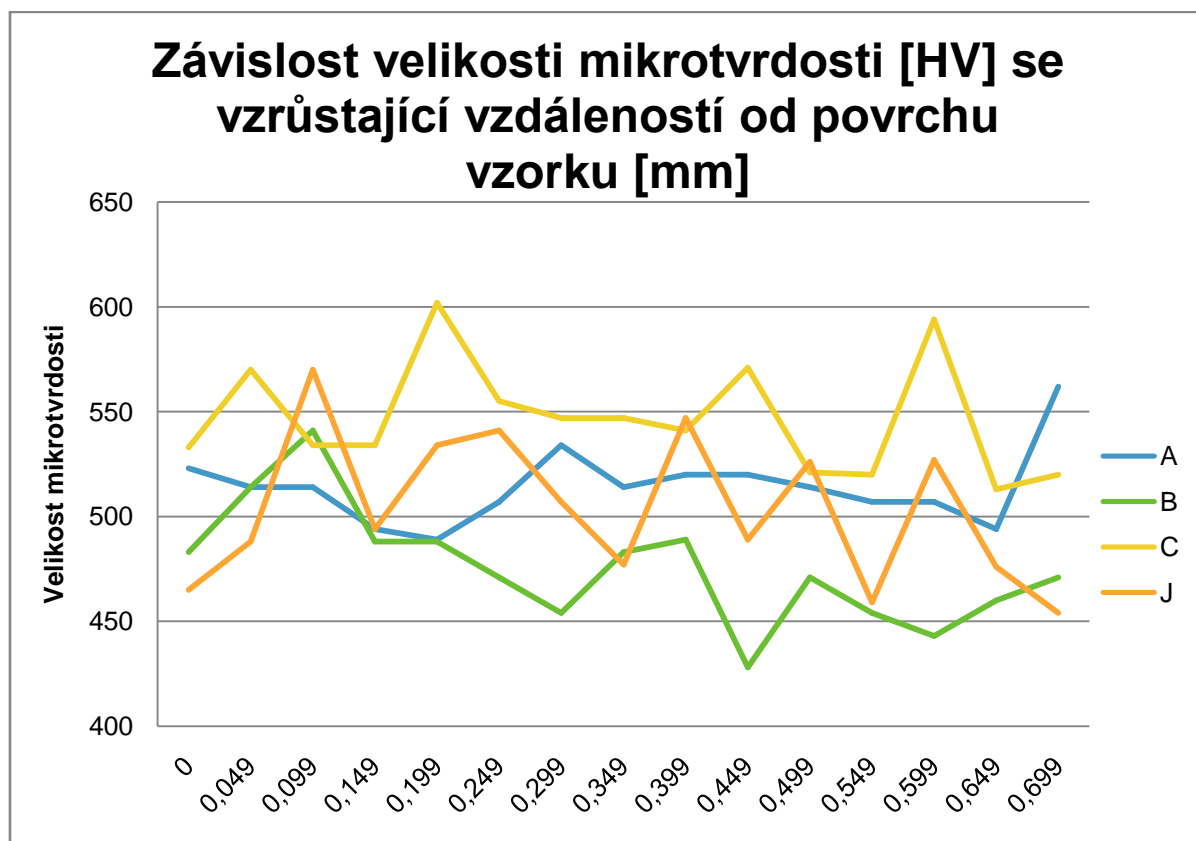
Obrázek 63: Vzorek J, zatížení 1x



Obrázek 64: Vzorek J, zatížení 10x



Obrázek 65: Vzorek J, zatížení 20x

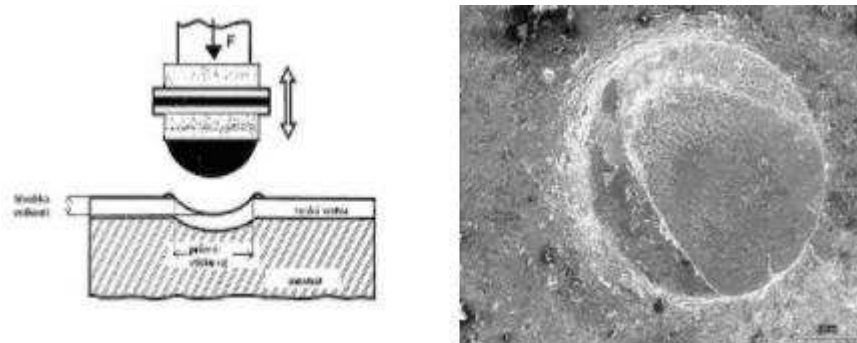


Obrázek 66: Graf závislosti velikosti mikrotvrdosti [HV] se vzrůstající vzdáleností od povrchu vzorku [mm]

16 Impact test

Je progresivní metoda zkoumání povrchových vlastností materiálů. Je založena na opakovaném kumulativním rázovém zatížení povrchových vrstev rázovou energií. Předpoklad je ten, že se materiál při rázovém zatížení chová charakteristickým způsobem. Základní princip je, že indentor, který je zpravidla tvořen karbidovou kuličkou opakovaně naráží do zkoumaného vzorku do jednoho přesně stanoveného místa. Zatížení je v tomto případě lokální.

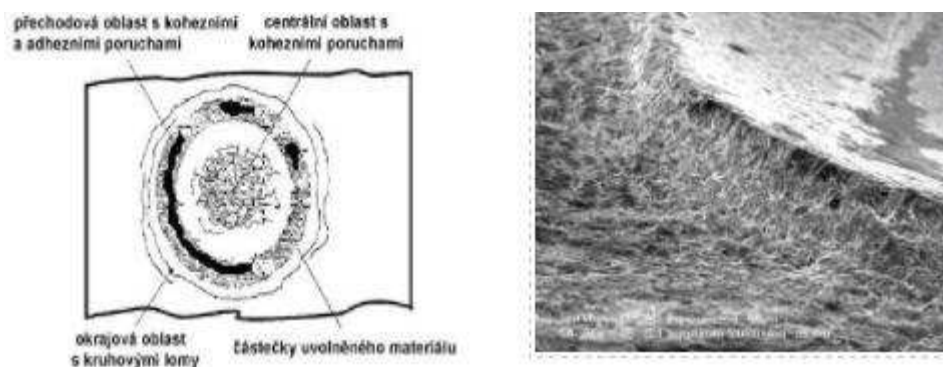
Rázové zatížení působí zpravidla na namáhané povrchy velmi negativně. Může poměrně snadno způsobit celkovou destrukci strojní součásti a je zde značné riziko vzniku zárodků budoucího únavového poškození, zejména pokud je součást namáhána ještě jinými způsoby (tah-tlak).



Obrázek 67: Impact test, impact kráter[31]

Vytváření impact testu vykazuje nejčastěji 3 fáze.

- V první fázi kdy ještě povrch není ovlivněn dochází k značné plastické deformaci v místě působení, kdy indentor působí na relativně malou plochu a kráter se rychle rozšiřuje.
- V druhé fázi je styková plocha mezi indentorem a kuličkou značná, z tohoto důvodu kráter již roste malou rychlostí. Zde dochází zejména k vyčerpávání plasticity v nejbližším okolí stěn vzniklého kráteru.
- Ve třetí fázi dochází ke tvorbě trhlin a vylamování zpevněných částí. Další rozšiřování kráteru je už možné jen díky tomuto mechanismu.



Obrázek 68: degradační jevy v impact kráteru [31]

Při tomto způsobu testování je možno napodobit např. podmínky, při kterých vznikají poškození na nástrojích, nebo na oběžných drahách valivých ložisek, kde vznikají pettingy zamezující posléze jejich řádnou funkci.

Jedním z nejdůležitějších výsledků získatelných z impact testu jsou rozměry vytvořeného kráteru. Každý materiál se vyznačuje různou mírou tvrdosti, houževnatosti, které se při porušení povrchu jinak projevuje.

Měření je vzhledem k rozměrům kráteru (desítky až stovky μm) prováděno na metalografických mikroskopech. Přesnost měření je ovlivňována zejména navaleninami na okraji kráterů, jelikož vytlačený materiál vytéká směrem ven z kráteru.

Výsledkem jsou závislosti rozvoje únavového poškození v závislosti na energii úderů při konstantním počtu cyklů, nebo na vzrůstajícím počtu cyklů při konstantní energii.[31,32]

16.1 Elektornicky řízení Impact tester

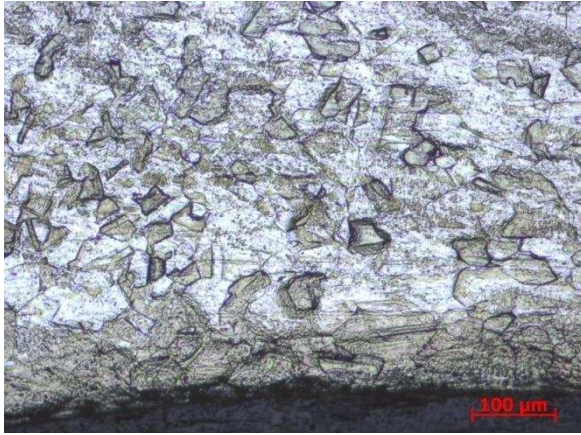


Obrázek 69: Elektronicky řízený Impact tester

Přístrojů umožňujících testování impact test není příliš mnoho a jedná se spíše o individuální konstrukci vzniklou na jednotlivých pracovištích. Přístroj použitý v tomto experimentu pracuje na následujícím principu: Vzorek je pevně připevněn ke stolu. Nad vzorkem je umístěno rameno na konci s indentorem, v tomto případě s karbidovou kuličkou o průměru 6 mm. Rameno je střídavě přitahováno elektromagnetem a po úderu je hnací síla vypnuta, v návaznosti se vrací do původní polohy pomocí pružin. Přítlačná síla je regulována pomocí omezovače proudu a pomocí vzduchové mezery mezi elektromagnetem a kotvou. Pod vzorkem je umístěn piezoelektrický tenzometrický snímač Kistler, který zaznamenává zatížení s frekvencí 17 kHz. Signál je posléze zpracován pomocí počítačového programu LabView.

Vzhledem k tomu, že se jedná o měření dynamických veličin, měření síly je tedy zatíženo chybou, kterou není možno jednoduše stanovit, pro měřenou veličinu je užívána jednotka daN – dynamický Newton. Přístroj je kalibrován na statickou zátěž pomocí závaží. Důležité je při testování zejména dodržovat konstantní podmínky zatěžování, které pomáhají

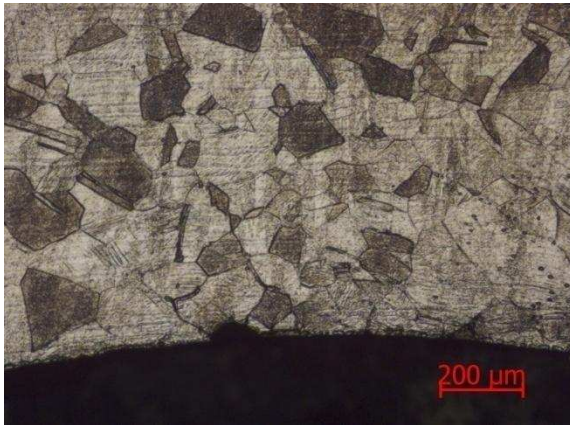
ovlivnění výsledku charakterem testování udržovat v konstantní velikosti. Jedná se tedy o měření poměrové. Velikost vzniklého kráteru je jedním z důležitých výsledků. Není však nejdůležitější absolutní velikost vzniklého kráteru, avšak zejména rozvoj jeho průměru při různé energii úderu, nebo zvyšujícímu se počtu cyklů. [31,32]



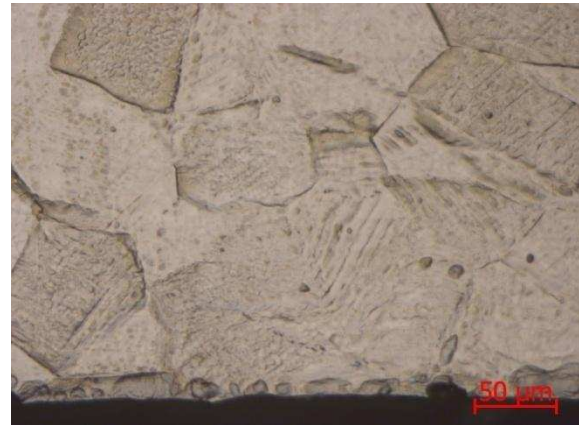
Obrázek 70: Vzorek A zvětšení 10x



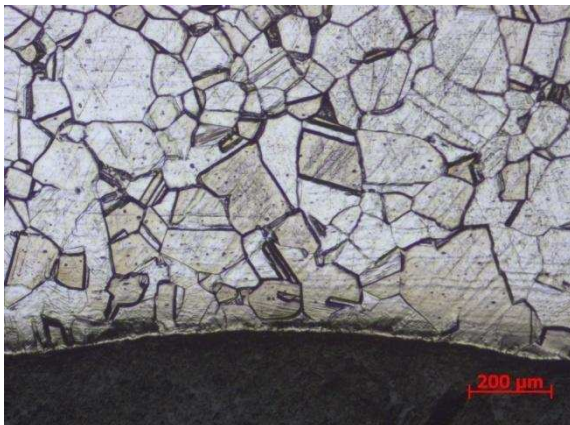
Obrázek 71: Vzorek A zvětšení 20x



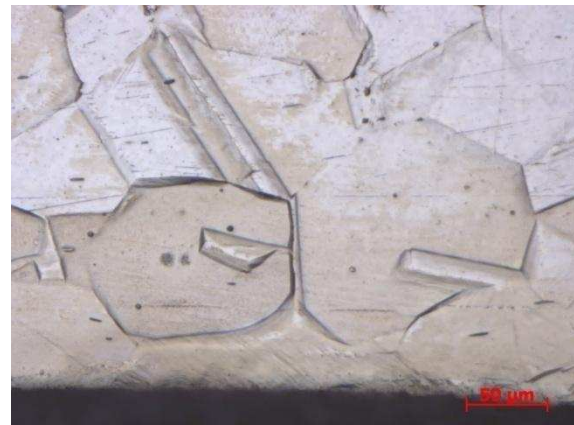
Obrázek 72: Vzorek B zvětšení 5x



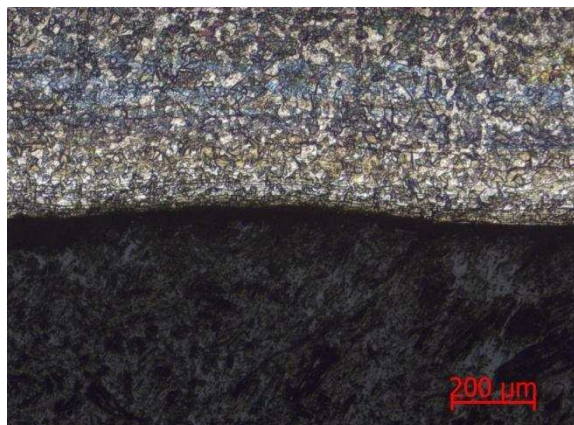
Obrázek 73: Vzorek B zvětšení 20x



Obrázek 74: Vzorek C zvětšení 5x



Obrázek 75: Vzorek C zvětšení 20x



Obrázek 76: Vzorek J zvětšení 5x



Obrázek 77: Vzorek J zvětšení 20x

16.2 Velikost vtisků při různé velikosti zatížení. [mm]

Tabulka 13: průměrů vtisků vzorku A [mm]

Vzorek A				
stopa	zatížení	A	B	průměr
1	1000	1,735	1,852	1,7935
2	800	1,203	1,104	1,1535
3	700	0,676	0,648	0,662
4	500	0,641	0,633	0,637

Tabulka 14: průměrů vtisků vzorku B [mm]

Vzorek B				
stopa	zatížení	1	2	průměr
1	1000	1,647	1,553	1,6
2	800	1,38	1,338	1,359
3	700	0,973	1,037	1,005
4	500	0,704	0,684	0,694

Tabulka 15: průměrů vtisků vzorku C [mm]

Vzorek C				
stopa	zatížení	1	2	průměr
1	1000	1,37	1,357	1,3635
2	800	1,079	1,025	1,052
3	700	0,864	0,903	0,8835
4	500	0,714	0,762	0,738

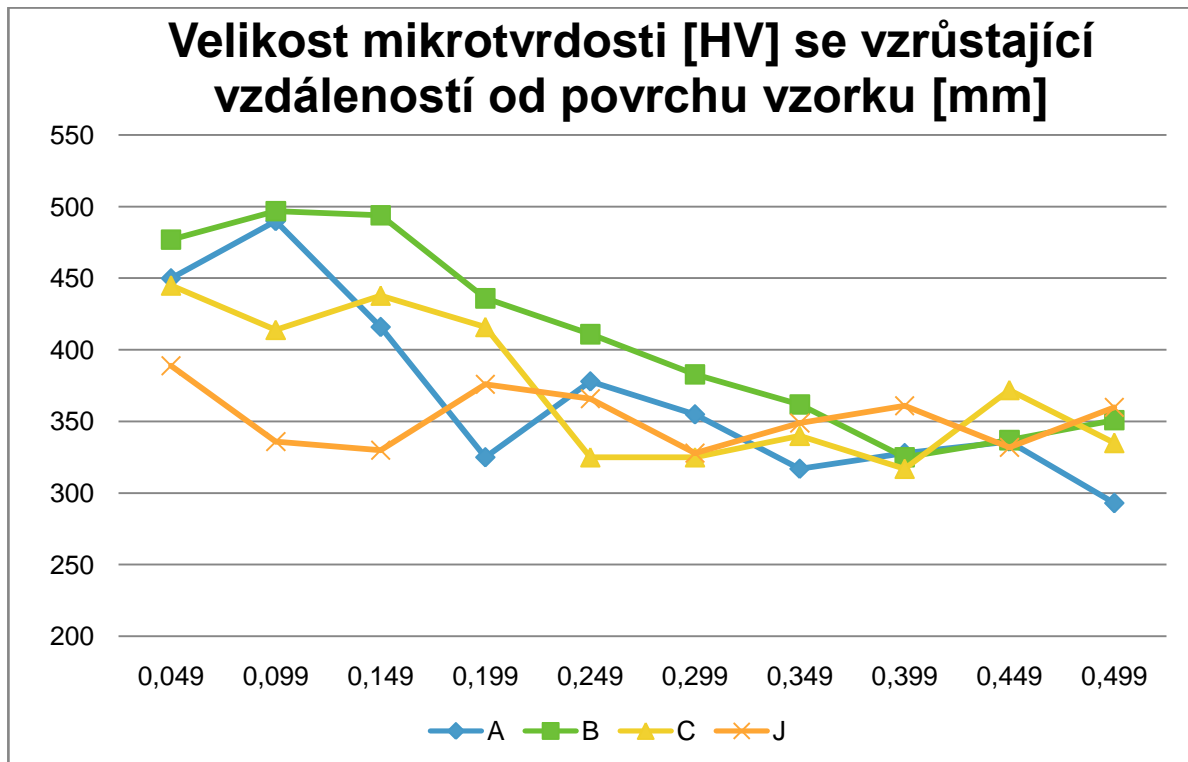
Tabulka 16: průměrů vtisků vzorku J [mm]

Vzorek J				
stopa	zatížení	1	2	průměr
1	1000	0,963	1,054	1,008
2	800	0,734	0,774	0,754
3	700	0,766	0,720	0,743
4	500	0,641	0,505	0,573

16.3 Měření závislosti velikosti mikrotvrdosti pod krátery u jednotlivých vzorků se vzrůstající vzdáleností od povrchu směrem do středu materiálu

Tabulka 17 Velikost mikrotvrdosti [HV] se vzrůstající vzdáleností od povrchu vzorku [mm]

Vzdálenost od počátečního bodu [mm]	A	B	C	J
0,049	450	477	445	389
0,099	490	497	414	336
0,149	416	494	438	330
0,199	325	436	416	376
0,249	378	411	325	366
0,299	355	383	325	328
0,349	317	362	340	349
0,399	328	325	317	361
0,449	336	337	372	332
0,499	293	351	335	360
0,549	273	330	286	366
0,599	247	328	344	404



Obrázek 78: Graf závislosti velikosti mikrotvrlosti se vzrůstající délkou od povrchu zatěžovaného při impact testu

Z předešlého grafu je patrné, že k největšímu progresu velikosti změřených mikrotvrdotí, a tudíž největšímu zpevnění povrchu při tomto daném druhu zatížení z předložených vzorků došlo u vzorků A a B.

17 Diskuze výsledků

Na základě dvou nezávislých měření chemického složení jednotlivých vzorků je jednoznačně patrné, že u vzorků B, C a J je obsah uhlíku mírně nižší než minimální hodnota udávaná literaturou 0,9% C. U měření kvantometrem, jsou též viditelné mírně nižší hodnoty podílu Mn v daných vzorcích. Při hodnocení je třeba také přihlédnout k faktu, že zařízení nemusí být vždy bezchybně kalibrována. Největším problémem u předložených vzorků je jejich nízký obsah uhlíku tedy oduhličení, jenž lze řešit přidáním Mo. Nejlepší výsledky v porovnání s literaturou vykazuje vzorek A.

Z měření a vypočtených výsledků zkoušky tvrdosti dle Brinella vyplývá, že nejvyšší hodnoty tvrdosti mají vzorky A a J respektive 195,6 a 192,1 HB. Nižší tvrdost vykázaly vzorky B 183,4 HB a C 180,8 HB. Výsledky potvrzují, že Mn oceli jsou považovány jako středně tvrdé.

Za pomoci tribologického testu došlo k testování opotřebení povrchu metodou Pin-on-disc. Metoda hodnocení dle váhových úbytků určila jako nejodolnější vzorky A a B. Jejich váhové úbytky se pohybovaly od 0,0025 do 0,0031 g. Téměř dvojnásobný váhový úbytek vykázal vzorek J. Jednoznačně nejhorší výsledek zaznamenal vzorek C, jehož váhový úbytek byl průměrně 0,007 g na jednu vytvořenou stopu při totožných podmínkách. Výsledky metody porovnání odebraných objemů korespondují s metodou váhových úbytků, jenž může být méně přesná, ovšem v tomto případě vykazuje nejnižší odebraný objem vzorek B oproti předchozí metodě hodnocení, kde byl nejlepší vzorek A. Třetí a poslední metodou hodnocení je velikost koeficientu opotřebení daného materiálu. Pořadí vzorků je zde shodné s metodou odebraných objemů, tudíž nejnižší koeficient opotřebení má vzorek B a nejvyšší opět vzorek C. Ještě je třeba zopakovat, že pod vytvořenými stopami nedošlo k nikterak dramatickému zpevnění což vyplynulo z takřka nulových rozdílů mikrotvrdosti, jenž byla změřena právě pod stopami tribologického testování a na místech, která nepodléhala žádnému zatížení.

K objasnění struktury jednotlivých vzorků byly zhotoveny metalografické výbrusy. Na žádném z vyleštěných vzorků před naleptáním není zjevná vyšší koncentrace vměstků a nehomogenit, které by svou přítomností snižovaly kvalitu materiálu tudíž i jeho mechanické vlastnosti. Samotný proces broušení leštění a leptání, byl určitě nejsložitějším úkolem experimentálního programu. Vzorky lze při klasickém leptání v Nitalu či sloučenině 50ml HCl+50 ml denaturovaného etanolu+ pár kapek H₂O₂ velmi snadno přeleptat a po leptání jsou velmi náchylné k zreznutí. Až s průběhem programu bylo dosaženo zvýšené kvality snímků díky metodě podrobně uvedené v kapitole Experiment zpevnění a deformace. Z porovnání struktur a velikostí zrn jednotlivých vzorků vyplývá. Vzorek J má jemnozrnnou homogenní austenitickou strukturu, s minimálním množstvím vyloučených karbidů po hranicích zrn s téměř poloviční velikostí zrn, a to cca 50μm, oproti vzorkům A,B a C jejichž velikost zrna je průměrně větší než 100 μm.

Výsledky deformačního testování jsou téměř shodné, až na vzorek B, jehož deformace byla nižší, než u ostatních vzorků. U žádného ze vzorků nebyl zaznamenán výskyt vzniku značně viditelné zpevněné vrstvy na povrchu zatěžovaného vzorku, což koresponduje i s výsledky měření mikrotvrdomosti v závislosti na vzdálenosti od povrchu zatěžovaných vzorků.

Za v praxi využitelnou a efektivní lze považovat, optimalizaci netradičního způsobu získání vyleštěného a naleptaného povrchu metodou chemického leštění, jejíž postup je uveden v kapitole Experiment deformace a zpevnění. Díky ní došlo k eliminaci negativních důsledků tradičního způsobu přípravy metalografických výbrusů např. rychlé koroze nebo velmi snadného přepleptání vzorků z materiálu, který je pro zhotovení výbrusů značně obtížný.

Z porovnání všech vzorků, jež byly podrobeny impact testu za totožných podmínek ,vyplývá, že nejmenší rozměry kráteru, tudíž nejvyšší odolnost materiálu vůči danému druhu zatížení vykazují vzorky J a C. U vzorku B a především vzorku A jsou patrné bezmála dvojnásobné rozměry kráterů pro určitá zatížení

Nejlepších komplexních výsledků po vyhodnocení všech provedených zkoušek, testů i měření a zároveň doporučení pro případnou aplikaci v praxi či vývoj vysoce legované Mn oceli typu Hadfiel dosáhly vzorky A a J. Celkové výsledky vzorků B a C jsou ve srovnání se vzorky A a J horší, ovšem nikterak zásadním rozdílem. Případný další vývoj těchto vzorků je na zvážení interních pracovníků zadavatelské firmy. Naopak nejhorší výsledky v konečném zúčtování vykázal vzorek D, jež nelze považovat za Hadfieldovu ocel a není možné jej tedy v žádném případě doporučit pro případný další vývoj.

Tabulka 18: Souhrnné zobrazení výsledků jednotlivých vzorků pro konkrétní metody testování

Pořadí	1	2	3	4
Chemické složení	A	J	C	B
Tvrdomost	A	J	B	C
Tribo test	B	A	J	C
Metalografie	J	A,B,C		
Deformace	B	A,C,J		
Zpevnění	A	B	C	J
Impact test	J	C	B	A

18 Závěr

Podstatou a konečným výstupem rešeršní části této práce bylo podat přehled základních informací ohledně všeobecných, mechanických a strukturních vlastností Mn ocelí. Dále o příležitostech reálné aplikace materiálu, nebo jeho vlastností v praxi popřípadě potencionální možnosti jejich vylepšení.

Experimentální program, tedy samotná analýza jednotlivých předložených vzorků měla za úkol vyhodnotit a porovnat zjištěné, naměřené a vypočtené hodnoty nebo údaje ze zvolených metod či zkoušek, jimž byly vzorky podrobeny. Zaměření experimentálního programu cílilo, kromě standartních, především na charakteristické mechanické vlastnosti Mn ocelí, a to zejména odolnost proti abrazivnímu opotřebení a schopnosti zpevnění povrchu při působení různých druhů namáhání.

Výsledné doporučení pro vývoj vysoce legované Mn oceli typu Hadfield získaly vzorky A a J, ovšem je nutné zde zahrnout fakt oduhličení vzorků. Řešením může být přidání malého množství Molybdenu. Zbylé vzorky B a C jsou možná v konečném důsledku klasifikovány jako méně kvalitní, ovšem jednoznačně nikterak zásadním způsobem.

19 Bibliografie

- [1.] Austenitic Manganese Steels. Total Materia. [Online] [Citace: 6. 10. 2016.]
<http://www.totalmateria.com/articles/Art69.htm>.
- [2.] *Chemické-listy.cz*. [Online] [Citace: 6. 10. 2016.] http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2011_16_s430-s438.pdf.
- [3.] Mangalloy. Wikipedia. [Online] [Citace: 6. 10. 2016.]
<https://en.wikipedia.org/wiki/Mangalloy>.
- [4.] Náhradní díly. edb.cz. [Online] [Citace: 8. 10. 2016.] <http://www.edb.cz/firma-313407-renomag-rosice/nahradni-dily-pro-stavebni-stroje-oteruvzdorne-materialy>.
- [5.] **Kuzickin D., Fremundt P., Míšek B.** *Konštrukčné ocele tvarené a na odlitky*. Bratislava : Alfa, 1988. MDT 669.18.018.29.
- [6.] Legury. Svanda.webz.cz. [Online] [Citace: 8. 10. 2016.]
<http://svanda.webz.cz/vyuka/legury.htm>.
- [7.] knife.cz. [Online] [Citace: 8. 10. 2016.]
<http://www.knife.cz/Knifecz/tabid/36/ctl/Details/mid/1122/ItemID/40/Default.aspx>.
- [8.] calphad.com. [Online] [Citace: 8. 10. 2016.] <http://www.calphad.com/iron-manganese.html>.
- [9.] **G., AGGEN.** Properties and eslection: Irons, Steels, and Highh Performance. allaboutmetallurgy.com. [Online] 1. [Citace: 8. 10. 2016.]
<http://allaboutmetallurgy.com/wp/wp-content/uploads/ASM%20Handbook%20Volume%201%20-%20Properties%20and%20Selection%20Irons%20Steels%20and%20High%20Performance%20Alloys%20-%201990.pdf>.
- [10.] **DEKE, S. a JUNHAI, L.** Deformation and work hardening of Hadfield manganese steel. 1990. Sv. 3. ISSN 1006-7191.
- [11.] **LV, B. a ZHANG, M.** Micro-mechanism of rolling contact fatigue in Hadfield steel crossing. místo neznámé : International Journal of Fatigue. ISSN 0142-1123.

- [12.] uvp3d.cz. [Online] [Citace: 13. 10. 2016.] http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=2787.
- [13.] Výroba železa. geologie.vsb.cz. [Online] [Citace: 13. 10. 2016.] http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/vyroba_zeleza.html.
- [14.] **ŠENBERGER, J., a další.** Metalurgie oceli na odlitky. Brno : Vutium, 2008. ISBN 978-80-214-3632-9.
- [15.] **STRÁNSKÝ, K., PANT, E. a KOŠTÁL, L.,.** *Přetavoání 12% manganové oceli v zásaditých el. obloukových pecích s dmýcháním kyslíku.* 1969. Sv. Slévárenství., ročník XVI.
- [16.] **LEVÍČEK, P., MIČKA, R. a STRÁNSKÝ, K.** *Metalurgické vady ocelových odlitků (příčiny a odstraňování).* Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1984.
- [17.] **MAZANCOVÁ, E.** *Technické materiály 1. - kovové materiály.* Ostrava : autor neznámý, 2012.
- [18.] **ADAMS, L.** Metalllography and microstrucutes, ASM Handbook, Volume 9.
- [19.] **Brušník, Josef.** Elektrické indukční pece ve slévárnách. *Bakalářská práce.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jaroslav Šenberger, CSc., 2012.
- [20.] **FAIRHURST, W.** The Use of abrasion - resistant high chromium molybdenum cast irons in minerals processing. místo neznámé : MINE and QUARRY, 1976.
- [21.] **SUBRAMANYAM, D.K.** Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys, Specialty Steels and Heat-Resistant Alloys, Austenitic Manganese Steels. 10. místo neznámé : ASM International ed. Materials Park, 2005. ISBN 161503827223..
- [22.] **E.G. Moghaddama, N. Varahrama, P. Davamia.** On the comparison of microstructural characteristics and mechanical properties of high-vanadium austenitic manganese steels with the Hadfield steel. Materials Science and Engineering A. 2011.
- [23.] **Doc. Ing. Jana Skálová, Csc., Prof. Ing. Rudolf Kovařík, Csc., Ing. Vladimír Benedikt, Csc.,.** *Základní zkoušky kovových materiálů.* Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2005. ISBN 80-7082-623-1.
- [24.] **R, Payling.** Glow Discharge Optical Emission spectrometry (GDOES), Materials. 1994. stránky 195-213.
- [25.] **E., Sýkora.** *Hodnocení kalibračních křivek přístroje GDOES, Bakalářská práce ZČU.* 2000.

[26.] lopezva.files.wordpress.com. [Online] 5. 2000. [Citace: 15. 2. 2017.]
<https://lopezva.files.wordpress.com/2011/09/g99.pdf>.

[27.] www.researchgate.net. [Online] 26.. 3. 2017.
https://www.researchgate.net/figure/222004933_fig2_Fig-2-Schematic-view-of-the-ball-on-disc-tribometer-a-detail-on-the-cotton-pad-fixed.

[28.] *Technické materiály 1. - kovové materiály*. MAZANCOVÁ, E. Ostrava : Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012.

[29.] **Li Xiaoyun, Wu Wei, Zu Fangqiu, Liu Lanjun, Zhang Xianfeng**. Influence of impact energy on workhardening ability of austenitic manganese steel and its mechanism. místo neznámé : China foundry, 2012. 1672-6421.

[30.] **Johnson, Cornelius A.** *Příprava metalografických vzorků*. místo neznámé : Leco corporation.

[31.] The inclined impact test, an efficient method to characterize coatings; cohesion and adhesion properties. **Bouzakis K.-D., Asimakopoulos A., Kompogiannis S., Maliaris G., Giannopoulos G., Michailidis N., Skordaris G., Erkens G.** San Diego, California, USA : International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films (ICMCTF), 2004.

[32.] The Concept of an Advanced Impact Tester Supported by Evaluation Software for the Fatigue Strength Characterization of Hard Layered Media. **Bouzakis K.-D., Vidakis N., David K.** S. Diego, California, USA : International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films, 1999. Duben 12-16.

[33.] **JURSA, J. a MITURA, K. et al.** *Austenitická manganová ocel*. 276 028 1991.