



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# VÝROBA ODLITKŮ Z MANGANOVÝCH OCELÍ A JEJICH VYUŽITÍ

CASTING OF MANGANESE STEELS AND THEIR USE

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Dufka

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vítězslav Pernica, Ph.D.

BRNO 2017

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Martin Dufka**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Vítězslav Pernica, Ph.D.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Výroba odlitků z manganových ocelí a jejich využití

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Manganová ocel zvaná také často jako Hadfieldova ocel má v technické praxi významné nezastupitelné místo právě pro svou příznačnou vlastnost. Vlivem lokálního tlaku (či rázů) nastává povrchové zpevnění odlitku při zachování houževnatého jádra odlitku. Tímto je Hadfieldova ocel předurčena pro výrobu vysoce namáhaných strojních součástí, které jsou často vystavovány abrazivnímu opotřebení.

### Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je provést rešerši na téma manganových ocelí v průmyslové praxi a na jejím základě popsat současné způsoby výroby, charakteristiku chemického složení, vlastnosti materiálu, popř. tepelné zpracování. Dále zmapovat nejčastější využití odlitků z manganové oceli v technické praxi.

### Seznam doporučené literatury:

FREMUNT, P., T. PODRÁBSKÝ. Konstrukční oceli. Brno: CERM s.r.o., 1996. ISBN 80-85867-95-8.

ŠENBERGER, J. aj. Metalurgie oceli na odlitky. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Nakladatelství VUTIUM, 2008, 311 s. ISBN 978-80-214-3632-9.

ASHBY, F.M., D.R.H. JONES. Engineering Materials I, II, Pergamon Press, Ltd., 1989, England. ISBN 0-08-032532-7.

PTÁČEK, L., aj. Nauka o materiálu II. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002, 391 s. ISBN 80-7204-130-4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

DUFKA Martin: Výroba odlitků z manganových ocelí a jejich využití.

---

Austenitická manganová ocel, nazývaná často také jako Hadfieldova ocel po svém objeviteli, má ve slévárenství své nezastupitelné místo díky svým specifickým vlastnostem. Působením místních tlaků a rázů dochází k povrchovému zpevnění odlitku, při zachování houževnatého jádra oceli. Manganová ocel díky tomu nachází uplatnění pro odlitky vysoce namáhaných strojních součástí, které podléhají abrazivnímu opotřebení.

Tato bakalářská práce se zabývá způsoby výroby, chemickým složením, vlivem některých legujících prvků na vlastnosti a výslednou strukturu oceli, tepelným zpracováním, vlastnostmi materiálu, mechanismy zpevnění a typy jednotlivých deformačních zpevnění. Dále je pozornost věnována nejčastějšímu využití odlitků z manganové oceli v praxi.

Klíčová slova: austenitická manganová ocel, Hadfieldova ocel, deformační zpevnění, struktura, vlastnosti

## **ABSTRACT**

DUFKA Martin: Casting of manganese steels and their use.

---

Austenitic manganese steel, often referred as Hadfield's steel after its discoverer, has an irreplaceable place in foundry due to its specific properties. Due to local pressures and shocks, surface of castings is hardened, but the cast core retains its toughness. Thus, manganese steel is used for castings of highly stressed machine parts that are subject to abrasive wear.

This bachelor thesis is concerned about methods of production, chemical composition, influence of some alloying elements on properties and structure of steel, heat treatment, material properties, reinforcement mechanisms and types of individual deformation reinforcements. Further attention is paid to the most frequent use of manganese castings in practice.

Keywords: austenitic manganese steel, Hadfield steel, deformation reinforcement, structure, properties

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

DUFKA, Martin. *Výroba odlitků z manganových ocelí a jejich využití*. Brno, 2017. 50s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor slévárenství. Vedoucí práce Ing. Vítězslav Pernica, Ph.D.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 23.5.2017

.....  
Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu Ing. Vítězslav Pernica, Ph.D. za cenné připomínky, ochotu, trpělivost a rady týkající se zpracování mé bakalářské práce. Také bych rád poděkoval rodině za podporu, kterou mi poskytla.

## OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	8
<b>1 HISTORIE</b> .....	9
<b>2 VYUŽITÍ MANGANOVÉ OCELI</b> .....	10
<b>3 VÝROBA MANGANOVÉ OCELI</b> .....	13
<b>3.1 Použití olivínového písku</b> .....	14
<b>3.1.1 Recyklace olivínového písku</b> .....	15
<b>3.2 Výroba manganové oceli v ČR</b> .....	16
<b>4 CHEMICKÉ SLOŽENÍ MANGANOVÉ OCELI</b> .....	18
<b>4.1 Vliv prvků na strukturu a vlastnosti manganové oceli</b> .....	19
<b>4.1.1 Uhlík</b> .....	19
<b>4.1.2 Mangan</b> .....	19
<b>4.1.3 Chrom</b> .....	21
<b>4.1.4 Křemík</b> .....	21
<b>4.1.5 Fosfor</b> .....	21
<b>4.1.6 Molybden</b> .....	22
<b>4.1.7 Hliník</b> .....	23
<b>4.1.8 Titan</b> .....	23
<b>4.1.9 Nikl</b> .....	23
<b>4.1.10 Vanad</b> .....	24
<b>5 STRUKTURA MANGANOVÉ OCELI</b> .....	25
<b>5.1 Tepelné zpracování</b> .....	25
<b>5.2 Modifikace taveniny hořčíkem</b> .....	27
<b>5.3 Rovnovážný diagram</b> .....	27
<b>5.4 Vliv velikosti zrna</b> .....	28
<b>5.5 Mikrostruktura</b> .....	28
<b>6 VLASTNOSTI MANGANOVÉ OCELI</b> .....	32
<b>6.1 Odolnost proti opotřebení</b> .....	33
<b>6.2 Deformační zpevnění</b> .....	34
<b>6.2.1 Zpevňování dopadem závaží</b> .....	36
<b>6.2.2 Zpevňování výbuchem</b> .....	37
<b>6.3 Svařitelnost</b> .....	41
<b>7 ZÁVĚR</b> .....	43
Seznam použitých zdrojů .....	44
Seznam použitých symbolů a zkratek .....	47
Seznam obrázků .....	48
Seznam tabulek .....	50



## ÚVOD

Austenitická manganová ocel, kterou patentoval Robert A. Hadfield v roce 1883 má několik specifických vlastností, kvůli kterým je i dnes stále nenahraditelná. Po svém objeviteli je také nazývána jako Hadfieldova ocel a tento název je často používán v literatuře. Jedna z nejdůležitějších vlastností je schopnost zpevnění povrchové vrstvy při působení dostatečně velkých tlaků a rázů. Vysoká tvrdost povrchové vrstvy má za následek zvýšení odolnosti proti abrazivnímu opotřebení, zároveň však oblast ve středu oceli zůstává dobře houževnatá, takže součástky odolají vysokému rázovému namáhání. [1]

Manganová ocel je extrémně odolná, nemagnetická slitina, u které bylo tvrdosti dosaženo kombinací vysokého podílu manganu a velmi rychlého ochlazení z vysokých teplot místo obvyklé transformace uhlíku u nízkolegovaných ocelí. Charakteristickými vlastnostmi je vysoká pevnost, dobrá elasticita a vynikající odolnost proti opotřebení. V podobě odlitků nebo válcovaných tvarů slouží v mnoha průmyslových odvětvích a je využívána jako vynikající materiál odolávající abrazivnímu poškození a u součástí namáhaných na kontakt. Běžně se používá u železničních komponent, především výhybky a srdcovky, součástí drtičů kamene, články pásových vozidel, aj. [1], [7]

Cílem práce je provést rešerši na téma manganových ocelí v průmyslové praxi a na jejím základě popsat současné způsoby výroby, charakteristiku chemického složení, vlastnosti materiálu, popř. tepelné zpracování. Dále zmapovat nejčastější využití odlitků z manganové oceli v technické praxi.

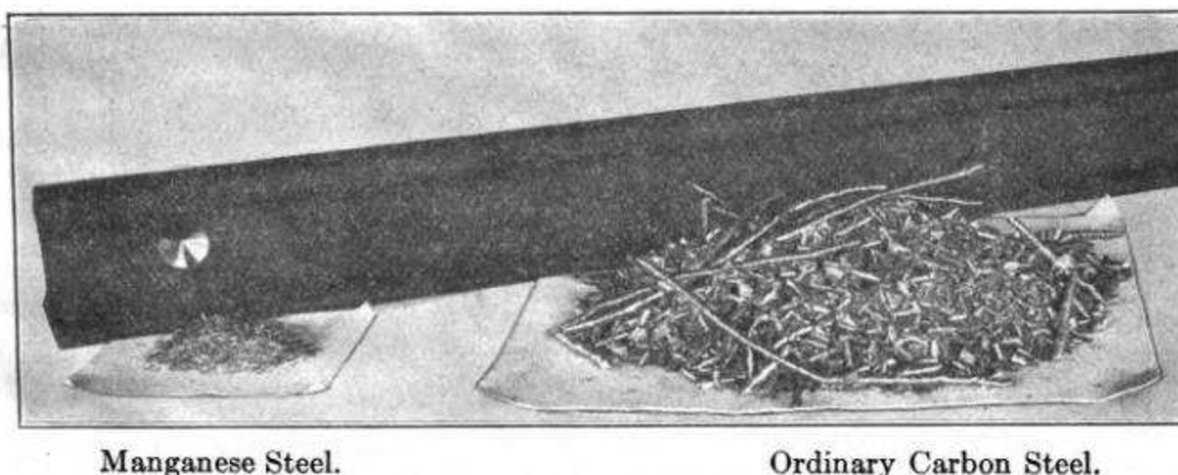
## 1 HISTORIE

První zmínky o manganové oceli pocházejí z konce 19. století a za jejím objevením stojí Sir Robert Abbott Hadfield, který se experimenty v hutnictví zabýval po studiu ve společnosti svého otce v anglickém Sheffieldu. Ve firmě otce získával zkušenosti až do roku 1882, v tomto období začal s pokusy s železo-manganovými slitinami, které vedly až k jeho nejdůležitějšímu objevu, manganové oceli. [2]

Jeho cílem bylo nalezení oceli, která by vynikala vysokou tvrdostí, ale zároveň by si zachovala dostatečnou houževnatost. V počátku svých experimentů udělal sérii testů s přidáváním feromanganů, obsahujících 80 % manganu a 7 % uhlíku, do nízko uhlíkové oceli. Zvyšování obsahu manganu a uhlíku se projevilo vysokou tvrdostí, zároveň ale také velkou křehkostí materiálu. Postupným testováním se snažil najít nejlepší poměr obsahu manganu, až došel k závěru, že při obsahu manganu nad 10 % se ocel stává mimořádně odolnou. Při vhodném tepelném zpracování tedy získal ocel, která vynikala dostatečnou houževnatostí, ale zároveň byla unikátní v odolnosti proti abrazi a opotřebení. Slitina, která se začala používat průmyslově, obsahovala 1,2 % uhlíku a 12 % manganu v poměru 1:10 a její složení se od jejího objevení v podstatě nezměnilo a používá se i dnes. [2], [3], [4]

Využití našla manganová ocel na přelomu 19. a 20. století, přispěl k tomu rozmach a nová výstavba železnic, ale také první světová válka. Zcela první pokusy k použití této oceli byly odlitky tramvajových kol, u kterých byl vysoký předpoklad opotřebení. Ihned bylo zřejmé, že kola z manganové oceli dosahují mnohem větší životnosti a poskytují vozům lepší brzděné vlastnosti. Neprokluzují mezi brzdovými destičkami tolik jako do té doby užívané litinová kola. [3]

Hadfield napsal v těchto letech mnoho prací, jejichž výsledky a výhody použití manganové oceli prezentoval budoucím zákazníkům především v Evropě a Severní Americe. Na obr. 1 je praktická ukáзка jedné z prezentací výhod manganové oceli. Fragment jedné z kolejnic byl podroben po dobu 20 minut vrtání. Z odlitku z manganové oceli bylo odvrtno 11 g materiálu, zatímco při stejných podmínkách bylo z dosud používaných kolejnic z běžné uhlíkové oceli odebráno 750 g materiálu. Životnost těchto kolejnic byla několikanásobně delší než kolejnic, z dosud užívaných materiálů. [5]



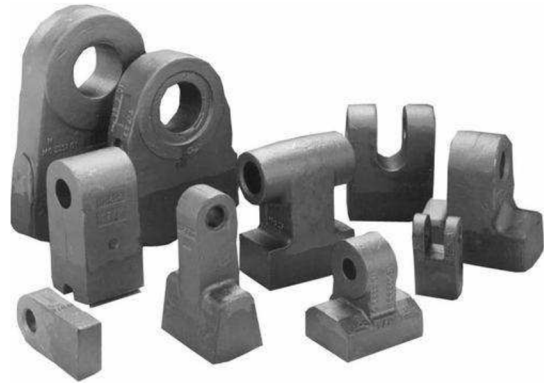
Obr. 1 Porovnání odebraného materiálu při vrtání manganové oceli a běžné uhlíkové oceli (Manganese steel – manganová ocel, ordinary carbon steel – běžná uhlíková ocel) [5].

## 2 VYUŽITÍ MANGANOVÉ OCELI

I když se složení manganové oceli od jejího objevení v podstatě nezměnilo a kromě drobných úprav v tepelném zpracování zůstává i její chemické složení téměř beze změny, stále nachází mnoho odvětví pro svoje uplatnění. V dnešní době se používá především u částí strojů vystavené abrazi, silným rázům a tlakům, bez požadavku třískového obrábění. Využití tak nachází v těžebním průmyslu, hornictví, u hloubení ropných vrtů, v ocelářství, jako součást bagrů nebo při výrobě cementu. Příklady výrobků z manganových ocelí jsou na obr. 2 až 11. [6], [7], [24]



Obr. 2 Části lžic bagrů [26].



Obr. 3 Fragментy kladiv [26].

Austenitická manganová ocel se také využívá v zařízeních pro manipulaci a zpracování zeminy, štěrku a kamení. Jako příklad lze uvést části drtičů (obr. 5 a 7), zuby lžic bagrů, čelisti rypadel, lopaty bagrů a čerpadla pro nakládání štěrku a kamení, dalšími možnostmi jsou některé části kladiv, rošty pro recyklaci automobilů nebo části pojízdných pásů u tanků. Dalším velmi důležitým uplatněním je použití v železničním odvětví, zejména na výrobu srdcovek, výhybek a přejezdů, kde jsou nároky na opotřebení obzvláště vysoké. Vzhledem k faktu, že manganové oceli velmi dobře snáší opotřebení styku kovů, používá se také pro výrobu pastorků, ozubených kol, dopravních pásů a řetězů. Příklady těchto výrobků jsou na obr. 4 a 9. [6], [7], [24]



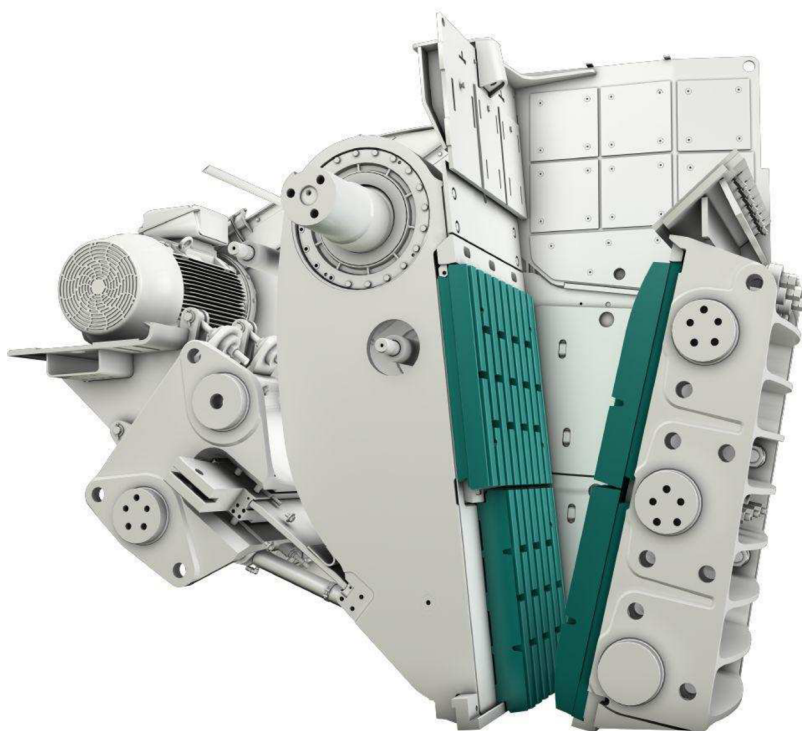
Obr. 4 Ozubené kolo [27].



Obr. 5 Drtící čelisti [26].



Obr. 6 Drtící konkáva [26].



Obr. 7 Drtič horniny [28].

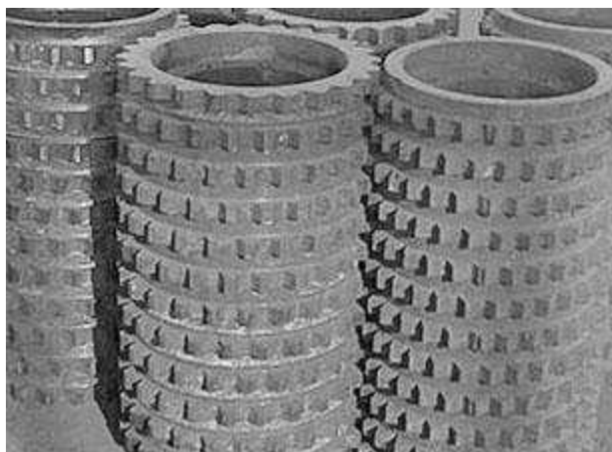


Obr. 8 Drtící kroužek [29].

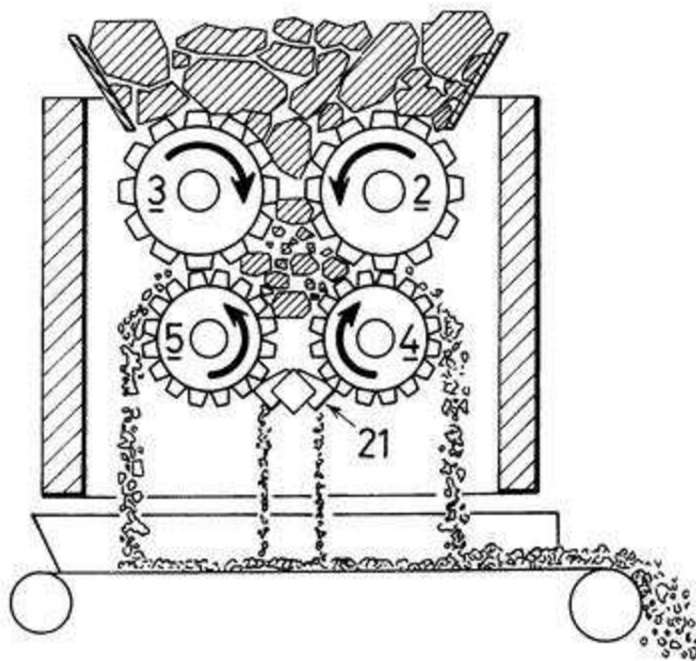


Obr. 9 Fragmenty řetězu [29].

Austenitická manganová ocel se nehodí do prostředí, kde probíhá klasická abraze, jako jsou úpravny rud za mokra nebo keramické úpravny surovin. Další nevýhodou je složitá obrobiteľnosť a její mez kluzu se většinou pohybuje pouze mezi 345 až 415 MPa. V důsledku toho, není vhodná pro díly, které vyžadují provedení s minimálními tolerancemi nebo musí být odolné vůči plastické deformaci. Naopak velmi pozitivní dopad má lisování, tlučení, válcování za studena nebo zpevňování výbuchem. Výsledkem těchto operací je zvýšení tvrdosti na povrchu při zachování houževnatého jádra a podrobněji je tento efekt vysvětlen v kapitole 6.2, která se podrobněji věnuje deformačnímu zpevňování. Na obr. 10 je drtící válec a na obr. 11 je schéma přístroje, kde jsou tyto válce použity. [7], [30]



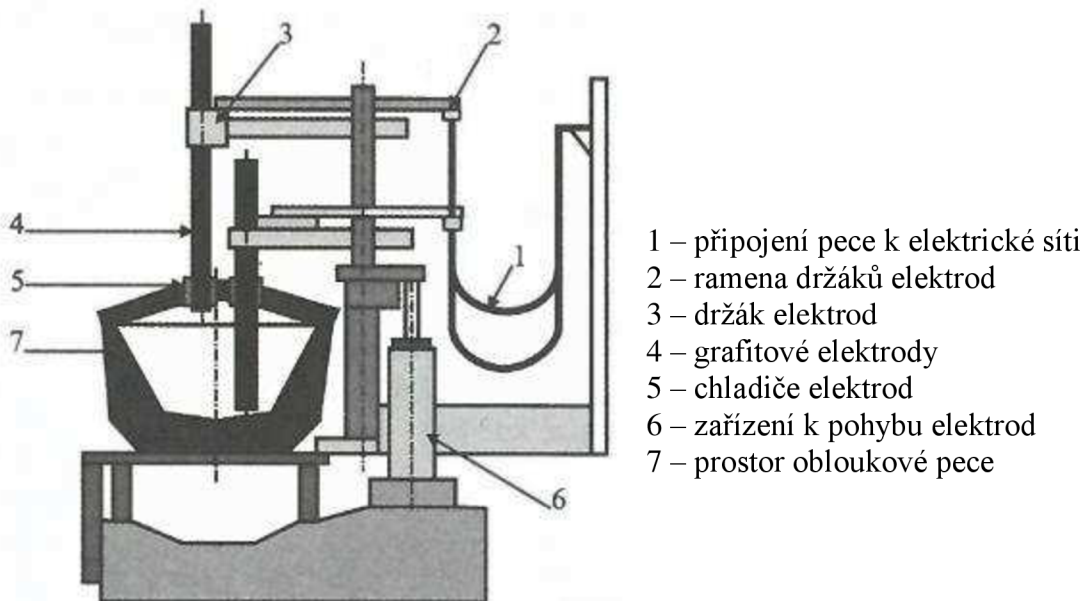
Obr. 10 Drtící válce [29].



Obr. 11 Schéma válcového drtiče horniny [29].

### 3 VÝROBA MANGANOVÉ OCELI

Manganová austenitická oceli se vyrábí odléváním a technologické zásady při tomto procesu jsou podobné jako u výroby vysokolegovaných chromových ocelí. Suroviny, které se vkládají do vsázky, by měly být zbaveny fosforu, protože odfosfoření v oxidačním údobí vzhledem k vysokému obsahu manganu není možné. Nejčastěji tavení vsázky probíhá v elektrických obloukových pecích se zásaditou vyzdívkou, její schéma je na obr. 12. Plášť pece je tvořen z oceli a je vyzděn žáruvzdorným materiálem na bázi magnezitu nebo dolomitu. Víko pece a většinou i stěny jsou chlazené vodou. Zdroj tepla zajišťují elektrické oblouky, které hoří mezi vsázkou a grafitovými elektrodami. Při tavení přesahují teploty v elektrickém oblouku 3000 °C, což způsobuje, že i po vzájemném oddálení elektrod zůstává plyn hořet. Je to způsobeno působením vysoké teploty plynů v okolí místa dotyku. [7], [8], [9]



Obr. 12 Schéma elektrické obloukové pece [8].

Po roztavení vsázky proběhne první zkouška a z povrchu se stahuje struska. Na základě zkoušky se určí doba dmýchání a obsah uhlíku, manganu, fosforu a síry. Při dmýchání je důležité, aby probíhalo za dostatečného tlaku kyslíku. Oxidace má vliv na obsah manganu a výsledkem je snížení jeho obsahu o 1 až 2 %. Srovnání mezi obsahem manganu a uhlíku při oxidaci manganových ocelí můžeme lépe pozorovat na těchto rovnicích:

1.  $[Mn] + [O] = (MnO)$
2.  $\{CO\} = [C] + [O]$
3.  $[Mn] + \{CO\} = (MnO) + [C]$

[Mn] – mangan obsažený v tavenině

[O] – dmýchaný kyslík

{CO} – bubliny oxidu uhelnatého

Při dmýchání kyslíku do lázně dochází ihned po vstupu do lázně ke sloučení s manganem a vzniká tak oxid manganatý (rovnice 1.), který se částečně vyloučí ve strusce a část přejde do atmosféry v peci. S navyšující se teplotou vzrostou rovnovážné koncentrace složek u reakce 1. rychleji, než u reakce 2. Pokud dojde k úplnému nasycení strusky oxidem manganatým, bude naopak uhlík, který je obsažen v oceli, redukovat právě oxid manganatý. Teplota při

dmýchání kyslíku dosahuje až na 1700 °C. Vodík a dusík, který se nachází volně v lázni, postupem času proniká do bublin oxidu uhelnatého. Jejich aktivita postupně klesá, což má za následek zvyšující se tlak vodíku a dusíku v bublinách oxidu uhelnatého. Po dosažení určitého tlaku bubliny CO vyplouvají na hladinu a unikají do pecní atmosféry, tento poslední krok je doprovázen reakcí na hladině taveniny a jinak se také nazývá uhlíkový var. Uhlíkový var je více účinný pro odstranění vodíku než dusíku, je to způsobeno především menší pohyblivostí dusíku v tavenině. Konec dmýchání se určí na základě doby, po kterou v peci probíhá uhlíkový var. [8], [9]

Po ukončení dmýchání následuje dezoxidace strusky, což je vhodné provést silikomanganem a koksem. Jeho množství se volí dle obsahu křemíku. Křemík dodaný silikomanganem by měl odpovídat zvýšení obsahu křemíku o 1 až 2 %. Po dezoxidaci následuje druhá zkouška, která umožňuje dolegování oceli. V peci zůstane jen potřebné množství strusky a část strusky se stáhne. Po této operaci se podle výsledků chemického rozboru přidává feromangan, ten obsahuje asi 80 % manganu a 7 % uhlíku. Pokud je obsah uhlíku příliš velký, je použit nízkouhlíkový feromangan, který obsahuje asi 1 % uhlíku. Pokud je i po přidání feromanganu teplota oceli příliš vysoká, řeší se to přidáním nelegovaného odpadu nebo vratného materiálu. [8]

Při výrobě odlitků vzniká velké množství vratného materiálu (vtoky, nálitky, apod.), který se dále zpracovává. Při procesu použití vratného materiálu do vsázky se tavenina obohacuje dusíkem. Vznik dusíkových bublin v odlitcích je nežádoucí a jejich vzniku se snažíme zabránit. K zabránění vzniku těchto bublin, je doporučeno při použití vratného materiálu oxidovat kyslíkem nejméně 0,3 % C. [7], [8]

Jestliže teplota roztavené oceli dosáhne tzv. odpichové teploty, odlévá se ocel do pánve a následují procesy jako dezoxidace a dolegování. Elektrické obloukové pece mohou pracovat se vsázkou až 300 t. Mezi výhody proti indukčním pecím je možnost zařadit menší požadavky na kusovitost, sypanou hmotnost vsázky a možnost volby chemické struktury oceli. [8]

### 3.1 Použití olivínového písku

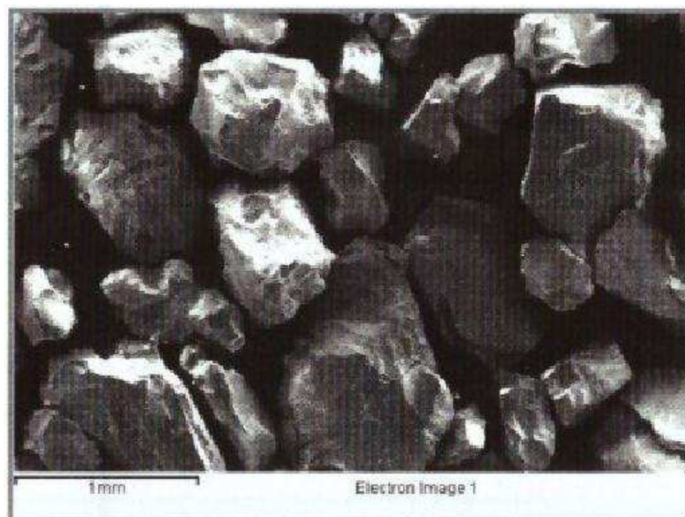
V posledních letech je možné u producentů odlitků sledovat snahu především o lepší efektivitu provozu a snížení výrobních nákladů. Likvidace slévárenských písků se stává velmi obtížnou především kvůli větším nárokům k ochraně životního prostředí a větším nákladům na transport písků. Cena písků se navíc každý rok zvyšuje kvůli zvedání cen energie a snižují se zásoby kvalitního materiálu v regionu. Toto vše vedlo ke snaze zlepšit systém formování a hlavně omezit nutnost použití nového písku, a co nejlépe recyklovat již ten použitý. Olivínový písek je ideální pro výrobu odlitků z manganové oceli, protože chemicky mnohem méně reaguje než písky křemičité. Jeho chemické složení je uvedeno v tab. 1. SiO<sub>2</sub> (oxid křemičitý) reaguje s MnO (oxid manganatý) a vytváří strusku z MnSiO<sub>3</sub> (rhodonit), který má za následek připečeniny a vady. Další výhodou oproti křemičitým pískům je nízká míra tepelné roztažnosti a velmi dobrá odolnost proti tepelným šokům. [10]

Tab. 1 Typické chemické složení olivínového písku [10].

MgO	50.12 %	Na <sub>2</sub> O	0.02 %
SiO <sub>2</sub>	41.53 %	K <sub>2</sub> O	0.03 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.50 %	CaO	0.15 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.42 %	MnO	0.09 %

Pro úspěšné použití olivínového písku ve slévárenském odvětví je ovšem nutné poradit i s některými negativy tohoto materiálu. Má vysoké hodnoty pH, v rozmezí od 9 do 10, což znesnadňuje jeho použití kvůli možné reakci při některých chemických procesech. Jednotlivá

zrna písku mají hranatý tvar a rozdílné velikosti zrn vedou ke špatné pojivosti. Další nevýhodou jsou omezené zdroje těchto písků a s tím i související vyšší cena oproti křemičitým pískům. Na obr. 13 je detailní snímek struktury a velikosti zrna olivínového písku. [10]



Obr. 13 Detailní snímek struktury a velikosti zrna olivínové písku [10].

Pro přípravu formovací směsi je písek smíchán ve speciálním mixéru, kde jsou chemické přísady přísně monitorovány, aby bylo dosaženo ideálního výsledku. Pro stanovení zásaditosti byla nalezena metoda založená na elektrické vodivosti. Elektrická vodivost slouží jako měřítko pro zjištění koncentrace rozpuštěných solí ve vodě. Při rozpouštění solí ve vodě dochází k vydávání elektricky nabitých iontů, které vodí elektřinu, takže čím více se soli rozpustí, tím je vodivost větší. Tato metoda zjištění zásaditosti je velmi rychlá a přesná. [10]

### 3.1.1 Recyklace olivínového písku

Funkce systému recyklace písku má za úkol hrudky již použitého písku uvést do stavu, aby se vlastnostmi co nejvíce podobal původnímu písku. Aby bylo dosaženo co nejlepšího výsledku, je využito tří dílného systému, založeném na primární suché abrazi, sekundární abrazi a tepelném ohřevu. V první části jsou hrudky a hrubé částice rozbíjeny na jednotlivá zrna působením intenzivních vibrací. Vibrace pomáhají rozbít vazby mezi jednotlivými zrny, ale v písku zůstává velké množství prachu. Ve druhé části je písek vehnán do komory, kde prochází mezi rotujícími válci a stěnou komory. Poté je pomocí studeného vzduchu písek zbaven prachu a je připraven pro další použití. Část tohoto písku je ovšem třeba upravit poslední částí recyklace, kterou je tepelné zařízení. Teplota v plynové komoře je udržována kolem teploty až 600 °C, aby bylo zajištěno odstranění organických složek. Aby písek nezměnil vlastnosti, je použito speciálních přísad, díky kterým odolá i při těchto teplotách. [10]



Tab. 2 Ukázka spotřeby písků za roky 2013 a 2014 [10].

Rok	Nový olivínový písek	Recyklovaný písek	Tepelně recyklovaný písek	Celkem
2013	942 t (3.7 %)	20591 t (82 %)	3634 t (14.3 %)	25167 t
2014	250 t (0.6 %)	39752 t (87 %)	5774 t (12.4 %)	45776 t

Pro většinu forem je vyhovující poměr 85 % recyklovaného a 15 % tepelně recyklovaného písku. Tato metoda se tedy ukázala jako velmi efektivní a je dosahováno velmi dobrých výsledků, které jsou shrnuty v tab. 2. Použití nového olivínového písku je minimální a množství využití recyklovaného písku je přes 95 %. [10]

### 3.2 Výroba manganové oceli v ČR

Mezi největší výrobce odlitků z oceli v České republice patří Slévárny Třinec, Viadrus, Libenia Plzeň, VÚHŽ, Unex, ŽŽAS, PBS Velká Bíteš, Královopolská slévárna, Vítkovické slévárny, METSO Czech Republic, Focam, Slévárna Chomutov a HAMAG. Všechny tyto slévárny jsou schopné odlévání manganové oceli, slévárny vypsané níže se odléváním manganových ocelí zabývají více.

#### Viadrus

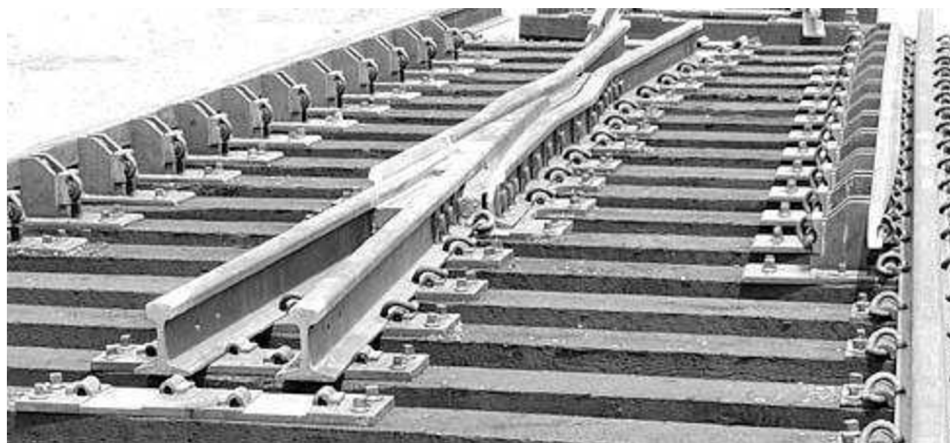
Z manganové oceli vyrábí díly namáhané velkými rázy (např. drtící kladiva, čelisti, pancéřové desky, zuby, atd.). Hmotnost odlitků při ručním formování se pohybuje od 0,5 do 800 kg, při použití formovacího stroje od 0,5 do 50 kg.

#### Libenia Plzeň

Zaměřují se především na výrobky z ořezavých materiálů jako lopatky, ramena, náhradní díly pro zemědělské stroje, betonárny.

#### Slévárny Třinec

Z manganové oceli vyrábí komponenty a součásti strojů a zařízení na drcení kamene, drtiče a mlýny, ořezavé manganové desky, příslušenství stavebních strojů jako desky pásů a zuby rypadel, odlitky pro zemědělské stroje, podkladnice a železniční srdcovky, která je zobrazena na obr. 14.



Obr. 14 Železniční srdcovka [31].

## **Unex**

Zaměřují se především na výrobu příslušenství pro těžební zařízení, jako jsou kolesová rypadla, pásové dopravníky, základové desky pro čerpadla, kompresory, lopatková rypadla, a důlní stroje.

## **Slévárna Chomutov**

Zabývají se výrobou vyměnitelných částí strojů, které jsou vystavené abrazi, silným rázům a tlakům, u kterých není požadavek na třískové obrábění. Jsou stroje zejména pro zemní práce. Z odlitků zde vyrábí čelisti drtičů, kuželové a odstředivé drtiče v kamenolomech, kladiva a tlukadla rotačních drtičů, ostří radlic buldozerů, apod.

## 4 CHEMICKÉ SLOŽENÍ MANGANOVÉ OCELI

Chemické složení manganové oceli neprodělalo od jejího objevení v 19. století žádnou zásadní změnu, i když v průběhu let se lidé snažili zlepšit její vlastnosti drobnými změnami v obsahu uhlíku a manganu nebo přidáním dalších prvků jako je chrom, nikl, molybden, vanad, titan a další. Vliv jednotlivých prvků na vlastnosti manganové oceli je popsán v dalších kapitolách. Obsah dominantních prvků se pohybuje v rozsahu 1,0 až 1,5 % uhlíku, 11,5 až 14,5 % manganu, maximálně 1,0 % křemíku a maximálně 0,06 % fosforu. Někdy se dle požadavků může složení lišit od těchto hodnot, varianta s 18 % manganu se používá u nejvíce namáhaných součástek. U některých typů ocelí může být jako přísada zvoleno 0,7 až 1,2 % chromu. Složení manganové oceli dle některých norem je uvedeno v tab. 3. [1], [9]

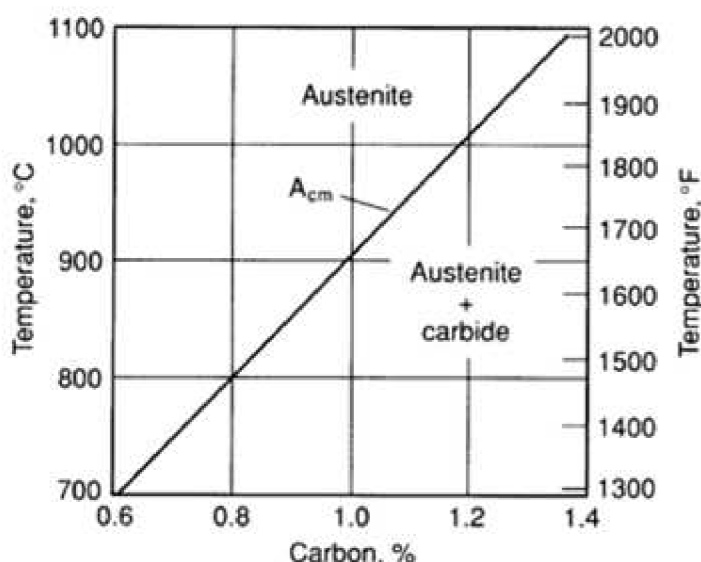
Tab. 3 Chemické složení manganové oceli dle některých norem. [1], [7], [8], [30]

Norma	Značka	Chemické složení v %								
		C	Mn	Si max.	P max.	S max.	Cr	Zr	Mo	Ni
	17618	1,10–1,40	11,0–13,0	1,00	0,10	0,04				
ČSN	42 2920	1,10–1,50	12,0–14,0	0,70	0,10	0,05				
ČSN	42 2921	1,10–1,50	12,0–14,0	0,70	0,10	0,05	0,7– 1,2			
ČSN	42 2920 (Z)	1,10–1,35	12,0–14,0	0,70	0,06	0,05	0,7– 1,2			
	42 2922 (Z)	1,10–1,35	12,0–14,0	0,70	0,06	0,05	1,5– 2,0			
	42 2920 (ZR)	1,10–1,35	12,0–14,0	0,70	0,06	0,05		0,05– 0,07		
	42 2921 (ZR)	1,10–1,35	12,0–14,0	0,70	0,06	0,05	0,7– 1,2	0,05– 0,07		
DIN	1.3401 G-X 120Mn12	1,10–1,30	12,0–13,0	0,3–0,7	0,1	0,04	1,5			
DIN	1.3407	1,20–1,30	12,0–13,0	0,3–0,7					1,9– 2,1	
ASTM A 128	Grade A	1,05–1,35	min 11,0	1,0	0,07					
	Grade B-1	0,90–1,05	11,5–14,0	1,0	0,07					
	Grade B-2	1,05–1,20	11,5–14,0	1,0	0,07					
	Grade B-3	1,12–1,28	11,5–14,0	1,0	0,07					
	Grade B-4	1,20–1,35	11,5–14,0	1,0	0,07					
	Grade C	1,05–1,35	11,5–14,0	1,0	0,07		1,5– 2,5			
	Grade D	0,70–1,30	11,5–14,0	1,0	0,07					3,0– 4,0
	Grade E-1	0,70–1,30	11,5–14,0	1,0	0,07				0,9– 1,2	
	Grade E-2	1,05–1,45	11,5–14,0	1,0	0,07				1,8– 2,1	

## 4.1 Vliv prvků na strukturu a vlastnosti manganové oceli

### 4.1.1 Uhlík

Obsah uhlíku se stanovuje především kvůli volbě odolnosti proti opotřebení a zároveň určuje, jak odolné budou odlitky k trhlinám. Pokud budeme zvyšovat obsah uhlíku ve slitině, bude odlitek odolnější proti abrazivnímu opotřebení. Při vyšším obsahu uhlíku jsou odlitky mnohem náchylnější k trhlinám a to z důvodu přítomnosti většího množství karbidů, které se při chladnutí vylučují na hranicích zrn. Obsah uhlíku nad 1,4 % se moc často nevyužívá, má totiž za následek prudké snížení tažnosti a otěruvzdornosti slitiny. U složitých odlitků je doporučeno snížit obsah uhlíku co nejbližší spodní hranici obsahu (min 0,7 % C), abychom dosáhli jemnějšího zrna a minimalizovali jsme vznik karbidů. Druhou možností je přidání malého množství titanu, který pomůže zjemnit zrna. Na obr. 15 můžeme vidět závislost rozpustnosti uhlíku v oceli s obsahem 13 % manganu. Obsah uhlíku se pohybuje v rozmezí 0,6 % až 1,4 %. [1], [6], [7]



Obr. 15 Rozpustnost uhlíku v 13 % manganové oceli (Temperature – teplota, carbon – uhlík, austenite – austenit, austenite + carbide – austenit + karbid) [7].

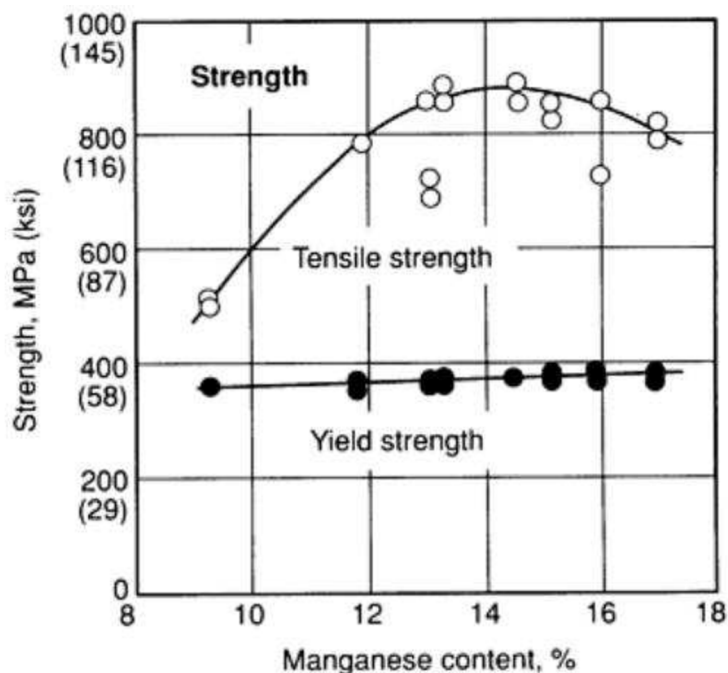
### 4.1.2 Mangan

Obsah manganu v rozmezí 11 až 14 % nemá vliv na odolnost proti opotřebení, ale výrazně přispívá ke zlepšení plastických vlastností. Mangan má výrazný podíl na stabilizaci austenitické matrice a umožňuje tak vznik typické austenitické struktury. Tato austenitická matrice je charakteristická především velmi dobrou plasticitou, tudíž i dobrou houževnatostí a tažností. Pokud se zvyšuje obsah manganu, musí se zároveň zvyšovat také obsah uhlíku tak, aby byl neustále dodržen poměr  $Mn : C = 10$ . Nadměrný obsah manganu (20 až 26 %) snižuje pevnost v tahu až na hodnotu 600 MPa, kdy běžná hodnota se pohybuje až kolem 1000 MPa. Samozřejmě je ovlivněna také související tvrdost, která se s tak vysokým obsahem manganu snižuje z běžných cca 230 HV na hodnoty kolem 130 HV. U austenitických manganových ocelí přispívá mangan ke stabilizaci austenitu a zpožďuje izotermickou transformaci. Příkladem je transformace u uhlíkové oceli, která obsahuje 1,1 % manganu, izotermická transformace při 370 °C začíná už asi 15 s po kalení. Při stejných podmínkách u oceli s obsahem 13 % manganu je to až 48 hodin. Nejdeálnější podíl manganu, aby bylo dosaženo

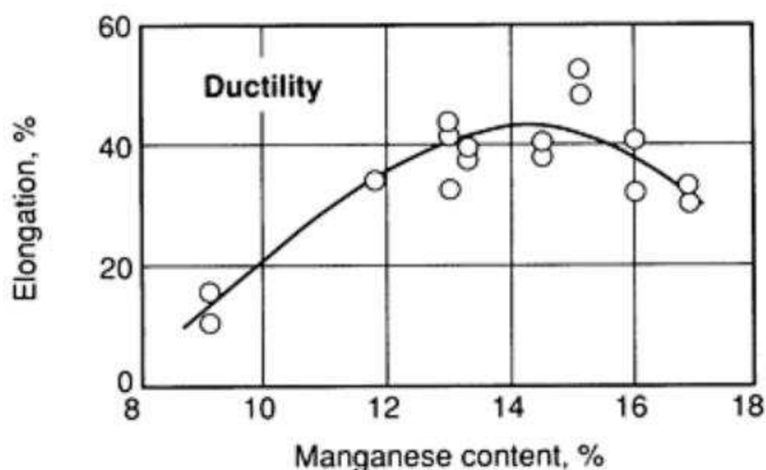
maximální pevnosti v tahu, je 12 až 13 %. Dobrých vlastností oceli lze dosáhnout i s vyšším podílem manganu, ale je to neekonomické. [1], [6], [7], [11]

Obr. 16 znázorňuje vliv obsahu manganu na pevnost a mez kluzu austenitické oceli. Můžeme vidět, že obsah manganu má velmi malý vliv na mez v kluzu, naopak pevnost v tahu se rychle zvyšuje s obsahem manganu až k 13 %, poté má tendenci se vyrovnávat. [7]

Obr. 17 znázorňuje závislost prodloužení na obsahu manganu, se zvyšujícím se obsahem manganu se prodloužení zvyšuje až do obsahu kolem 14 % manganu, poté klesá. [7]



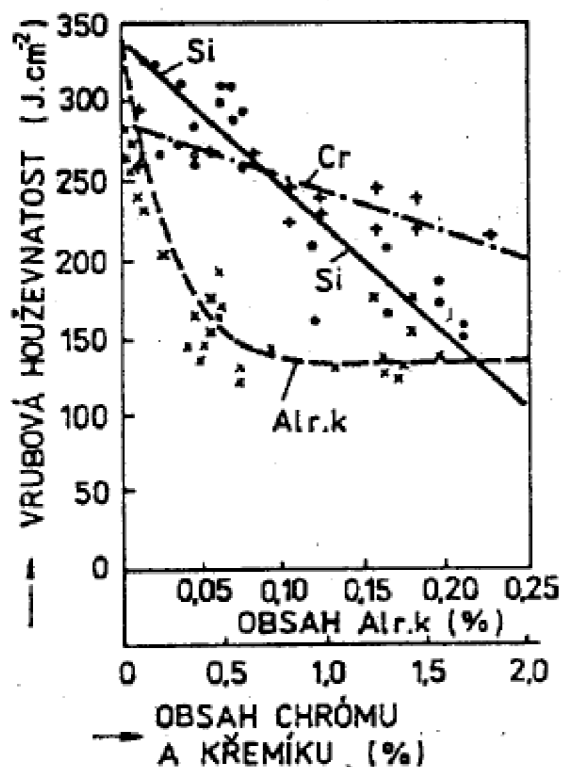
Obr. 16 Mez kluzu a pevnost v tahu v závislosti na obsahu manganu (Yield strength – mez kluzu, tensile strength – pevnost v tahu, manganese content – obsah manganu) [7].



Obr. 17 Závislost prodloužení na obsahu manganu (Ductility - tažnost, elongation - prodloužení, manganese content - podíl manganu) [7].

### 4.1.3 Chrom

Legování chromem patří mezi nejčastější. Přidání chromu způsobuje zvýšení tvrdosti při pracovním zpevnování a zvyšuje odolnost oceli proti atmosférické korozi, zároveň však napomáhá tvoření karbidů. Tyto karbidy mohou na hranicích zrn austenitu tvořit síťoví a při rozpouštěcím žhání při teplotě až do 1100 °C se špatně rozpouští. Obvykle se manganové oceli legují asi 1 % chromu, zvyšuje se mez kluzu, zatímco vrubová houževnatost mírně klesá. Na obr. 18 lze pozorovat vliv obsahu chromu a dalších legujících prvků na vrubovou houževnatost oceli. Chrom nemá žádný vliv na odolnost proti opotřebení, horní hranice obsahu chromu se většinou pohybuje kolem 2 %. [1], [6], [7]



Obr. 18 Závislost vrubové houževnatosti manganové oceli na obsahu hliníku, chromu a křemíku [1].

### 4.1.4 Křemík

Dalším často používaným legujícím prvkem je křemík, jehož obsah je omezen na maximálně 0,7 %, u tvářených ocelí do 1 %. Větší množství křemíku se nepřidává a při obsahu větším než 2 % křemík způsobuje změnu struktury Fe<sub>3</sub>C, což má za následek výraznou změnu tvrdosti oceli a při ještě větším obsahu je taková ocel prakticky bezcenná. Přidáváním křemíku se výrazně ovlivňuje vrubová houževnatost, jelikož má negativní vliv na rozpouštění uhlíku v austenitu. Na hranicích zrn se při vyšším obsahu křemíku vylučují karbidy a ty vytvářejí řetízky. [1], [6], [7]

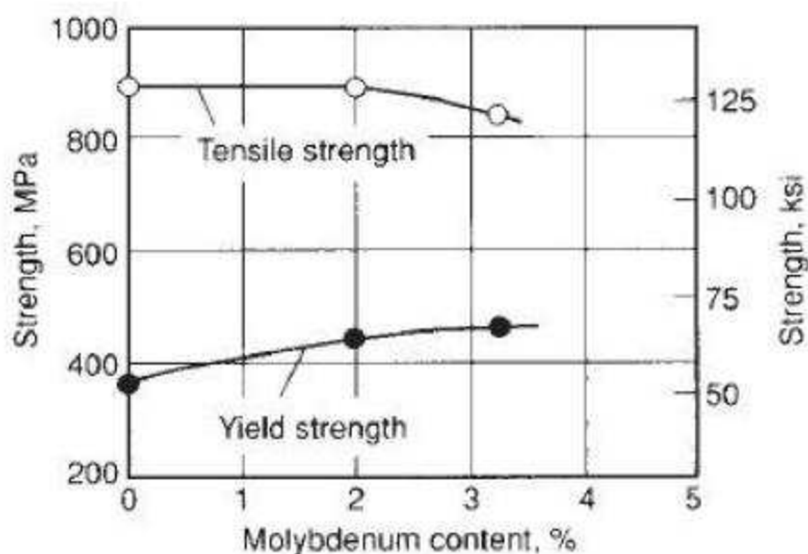
### 4.1.5 Fosfor

Po roce 1960, kdy se stal feromangan s nízkým obsahem fosforu více dostupným je snaha udržet obsah fosforu pod 0,04 %, i přesto, že dle norem je povolen obsah až do 0,07 %. Fosfor se vylučuje na hranicích zrn, poté v průběhu žhání zkapalní a vytváří specifický eutektický film. Při obsahu nad 0,06 % se výrazně snižuje pevnost a tažnost a důvodem je

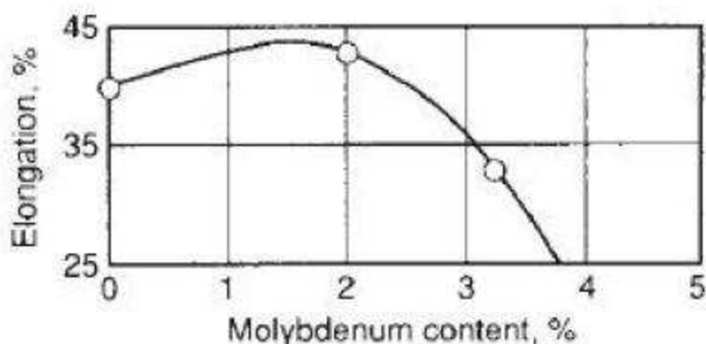
především toto fosfidické eutektikum. Díky tepelnému zpracování se toto fosfidové eutektikum z části rozpustí, ale pokud požadujeme, aby úplně zmizelo, je potřeba vydržet dlouho nad teplotou 1150 °C. [1], [6], [7]

#### 4.1.6 Molybden

Obvykle se množství molybdenu pohybuje v rozmezí 0,5 až 2 % a přidává se s cílem zlepšit houževnatost a odolnosti vůči praskání odlitků v litém stavu. Zvyšuje mez kluzu u odlitků z těžkých profilů, které jsou ošetřeny kalením. Důvodem k těmto zlepšením je část molybdenu rozpuštěného v roztoku austenitu a část v karbidech, které se vytvoří během tuhnutí oceli. Roztok molybdenu potlačuje vznik karbidových sraženin. Oceli obsahující 1 % molybdenu jsou odolné proti opětovnému ohřevu a využití najdou u odlitků s velkým průřezem. Legováním oceli molybdenem roste cena oceli, což je nevýhodné. Na obr. 19 a 20 je zobrazen vliv obsahu molybdenu na mechanické vlastnosti oceli. [1], [7]



Obr. 19 Závislost meze kluzu a pevnosti v tahu na obsahu molybdenu v manganové oceli. (Strength - síla, molybdenum content - podíl molybdenu, tensile strength - pevnost v tahu, yield strength - mez kluzu) [7].



Obr. 20 Závislost prodloužení na obsahu molybdenu (Elongation - prodloužení, molybdenum content - podíl molybdenu) [7].

#### 4.1.7 Hliník

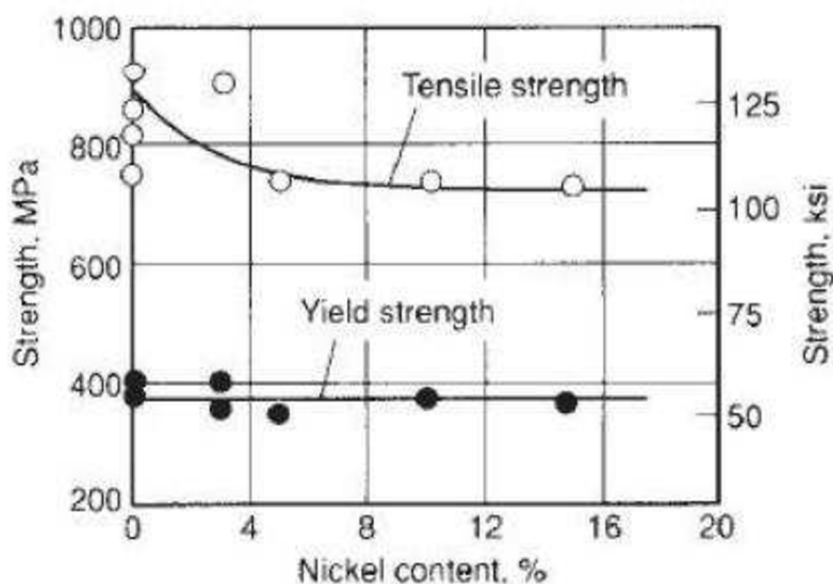
Hliník je používán k dezoxidaci manganových ocelí. Už při velmi nízkém obsahu hliníku od 0,01 do 0,05 rychle klesá vrubová houževnatost. Tento pokles má za následek tvorbu drobných karbidů na hranicích i uvnitř zrn, které snižují rozpustnost uhlíku v austenitu. [1]

#### 4.1.8 Titan

Titan vytváří velmi stabilní karbidy, takže snižuje obsah uhlíku v austenitu. Přidává se ke zjemnění zrna, to napomáhá snížení náchylnosti k tvorbě trhlin za tepla. Přidává se pouze v malém obsahu do 0,05 %, pokud je obsah vyšší, snižuje se vrubová houževnatost a důvodem je i obsah hliníku ve ferotitanech, kterými se ocel leguje. [1], [7]

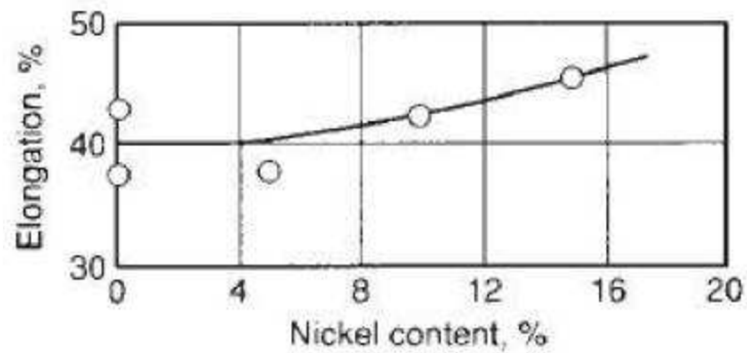
#### 4.1.9 Nikl

Nikl se do manganové oceli přidává v množství až 4 %, pomáhá stabilizovat austenit a je velmi účinný při potlačení zárodků karbidových destiček, které se vytváří mezi teplotou 300 - 550 °C. Rozpouští se v základní matici a jako u konstrukčních ocelí zvyšuje plastické vlastnosti při záporných teplotách. Přítomnost niklu udržuje nemagnetické vlastnosti oceli, zvyšuje tažnost, lehce snižuje mez kluzu a snižuje odolnost oceli proti otěru. Uplatnění nachází u ocelí s nízkým obsahem uhlíku nebo u produktů z tvárné manganové oceli, kde se někdy užívá ve spojení s molybdenem. Na obr. 21 a 22 je vliv obsahu niklu na některé mechanické vlastnosti oceli. [1], [7]



Obr. 21 Závislost meze kluzu a pevnosti v tahu na obsahu niklu v manganové oceli (Strength - síla, nickel content - podíl niklu, tensile strength - pevnost v tahu, yield strength - mez kluzu) [7].





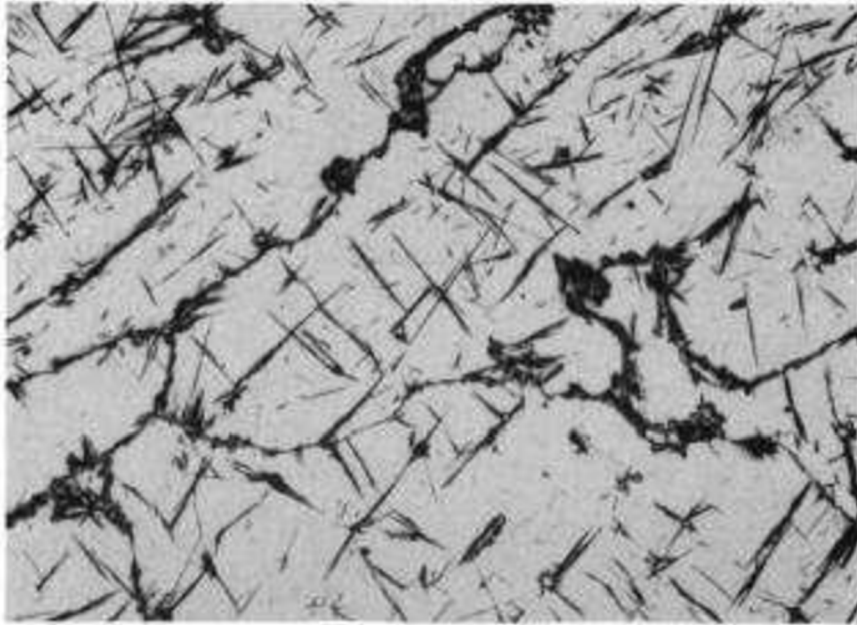
Obr. 22 Závislost prodloužení na obsahu niklu (Elongation - prodloužení, nickel content - podíl niklu) [7].

#### 4.1.10 Vanad

Vanad výrazně napomáhá tvorbě karbidů, což má za následek mírné zvýšení meze kluzu, zároveň snižuje tažnost oceli. Jeho obsah se pohybuje od 0,5 do 2 %. Kvůli stabilitě karbidů vanadu je zapotřebí vyšší teplota tavení a to až 1175 °C. Tato teplota je potřeba, aby se vanad v matici zcela rozpustil. [1], [7]

## 5 STRUKTURA MANGANOVÉ OCELI

Po vychladnutí odlitku je matrice manganové oceli tvořena austenitem a cementitem, tento cementit je sekundární fáze vytvořena na hranicích zrn jako karbidická síť. Struktura oceli po odlití je na obr. 23. Díky cementitu se zlepšuje tvrdost, ale zároveň snižuje houževnatost, takže ocel je sice tvrdá, ale poměrně křehká.

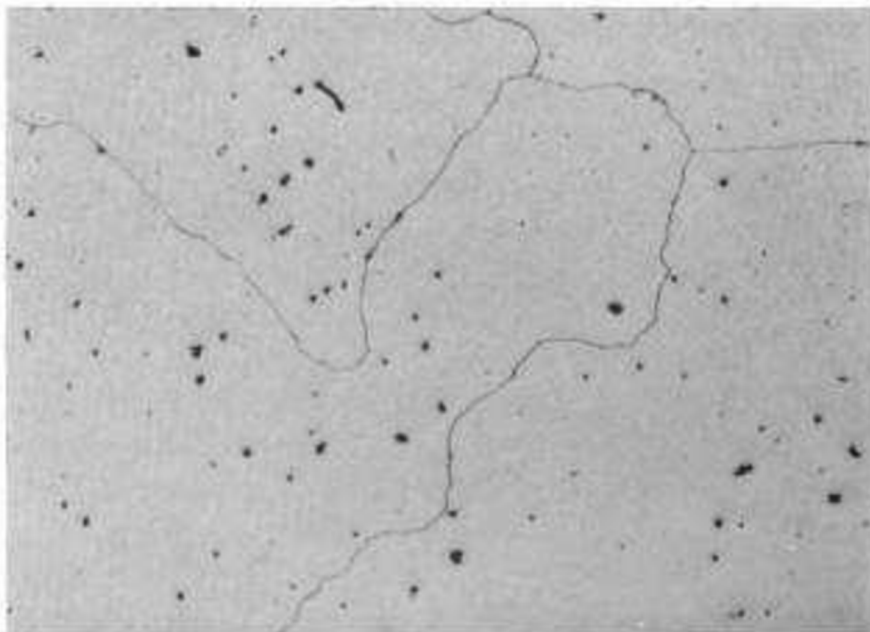


Obr. 23 Struktura manganové oceli po odlití, 100x zvětšeno [18].

### 5.1 Tepelné zpracování

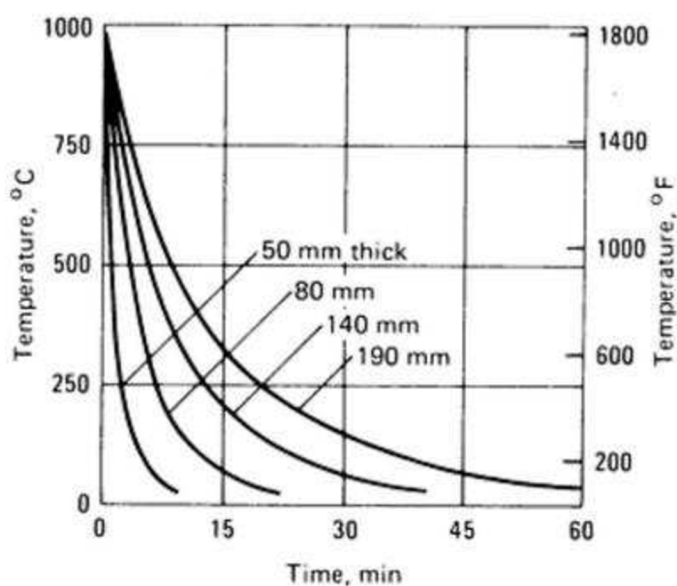
Cílem tepelného zpracování je posílit austenitickou manganovou ocel tak, aby mohla být bezpečně a spolehlivě použita v nejrůznějších strojírenských odvětvích. Pro vytvoření homogenní, nemagnetické matrice je potřeba rozpustit karbidy žiháním do teploty 1100 °C a následně ocel ochladit zakalením, aby došlo k potlačení zpětného vyloučení karbidů. Nejúčinnější je ochlazování odlitků v nádržích s cirkulací vody a prodleva od vyjmutí odlitku a vložení do lázně by neměla přesáhnout 3 minuty. K dokonalému výsledku struktury je třeba dobře znát citlivost oceli na rychlost kalení. [1], [7], [12]

Výsledná struktura by měla mít téměř plně austenitickou strukturu, bez zrnok karbidů a s homogenním obsahem uhlíku a manganu. To není vždy lehce dosažitelné, hlavně u složitých, velkých odlitků nebo u ocelí obsahující prvky, které napomáhají tvorbě karbidů jako je chrom, molybden, vanad nebo titan. Pokud nemůžeme zcela zabránit přítomnosti karbidů ve struktuře, je potřeba, aby se co nejméně vyskytovaly na hranicích zrn a spíše se utvářely v zrnech austenitu. Na obr. 24 je mikrostruktura manganové oceli po tepelném zpracování. [1], [7], [12]



Obr. 24 Manganová ocel po tepelném zpracování, zrna jsou tvořena téměř výhradně austenitem, 100x zvětšeno [18].

Podle tloušťky stěny se určuje doba, po kterou je potřeba vydržet na dané teplotě, většinou je to hodina na každých 25 mm odlitku. Kvůli malé tepelné vodivosti a přitom velké tepelné roztažnosti je třeba odlitky ohřívat jen pozvolna, asi o 80 až 100 °C za hodinu. U odlitků s tloušťkou stěny větší než 100 mm je ohřev snížen na 35 až 55 °C za hodinu. Při překročení teploty asi 750 °C je možné rychlost ohřevu zvýšit. U odlitků, které mají větší tloušťku stěn, je doporučen ohřev na 630 °C a výdrž, aby se snížilo vnitřní pnutí a srovnaly se teploty uvnitř a na povrchu odlitku. I přes tyto opatření mají komplikované odlitky ve svém středu horší mechanické vlastnosti než tenčí odlitky. Na obr. 25 jsou křivky chladnutí v závislosti na tloušťce stěny odlitku. [1], [7], [12]



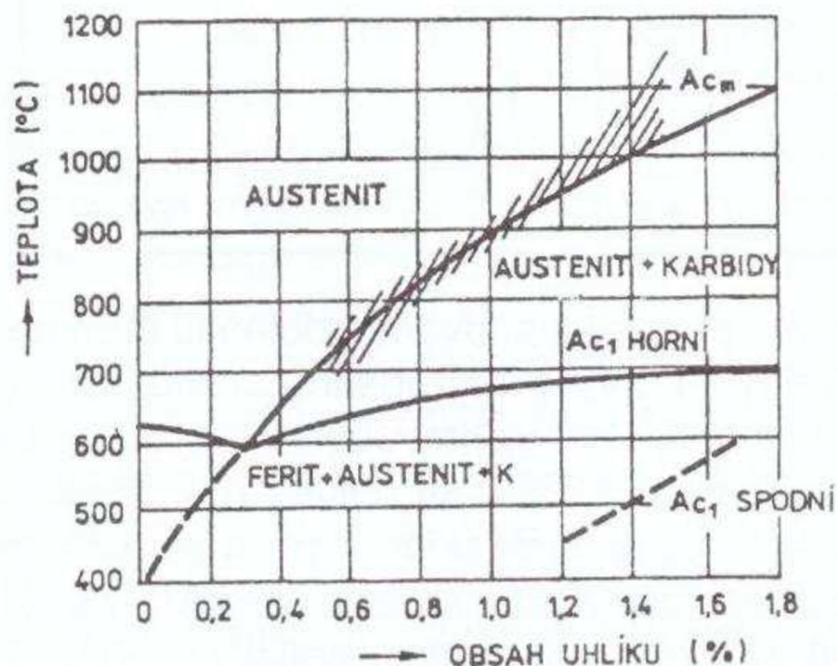
Obr. 25 Křivky chladnutí pro různé tloušťky odlitků (Temperature - teplota, time - čas, thick - tloušťka) [7].

## 5.2 Modifikace taveniny hořčíkem

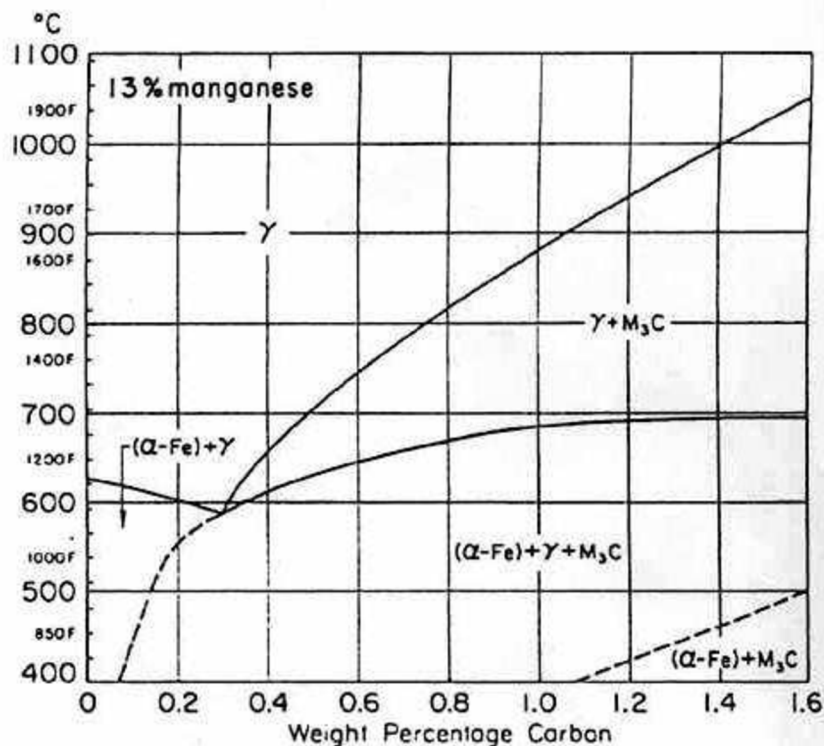
Tato metoda je založena na změně morfologie sítě cementitu pomocí Mg a Si. Tavenina byla modifikována při teplotě 1600 °C od 0,14 do 0,4 % hořčíku. Výsledkem je zjemnění zrna a zlepšení mechanických vlastností. Zjistilo se, že MgS slouží jako zárodek pro nukleaci austenit - cementitického eutektika. Podle testů bylo dosaženo u vzorku s 0,3 % Mg lepších vlastností než u referenční tepelně zpracované oceli, především u tvrdosti a otěruvzdornosti. Ukázalo se tedy, že modifikací hořčíkem lze nahradit tepelné zpracování odlitků z manganové oceli, určených pro nižší a střední deformační namáhání. [12]

## 5.3 Řez rovnovážným diagramem

Na obr. 26 a 27 lze pozorovat, že při vyšších teplotách se v diagramu nacházíme v oblasti homogenního austenitu, ze kterého se při pomalejším ochlazení u ocelí, které mají větší podíl uhlíku, vylučuje pod teplotou  $A_{c_m}$  podvojný cementit  $(Fe,Mn)_3C$ . Pokud se ocel ochladí až pod teplotu  $A_{c_1}$ , austenit se začne pomalu rozpadat na jemný perlit. Tato transformace ale probíhá jen velmi pomalu, je to způsobeno nízkou teplotou, která se pohybuje pod 400 °C a rovnovážného stavu se tak dosahuje jen pomalu. Takže i po velmi pomalém ochlazení zůstává v matici stále 30 až 50 % zbytkového austenitu. Z diagramu lze také odvodit, že uhlík se velmi dobře rozpouští v austenitu. Jelikož mangan i uhlík dobře odměšují, v matici se v litém stavu objevuje, i při nízkém obsahu uhlíku, eutektikum složené destičkami cementitu a austenitu. [1]



Obr. 26 Vertikální řez diagramem Fe-C-Mn při obsahu 13 % manganu [1].



Obr. 27 Řez diagramem Fe-C-Mn při 13 % obsahu manganu (Weight percent carbon - hmotnostní procento uhlíku, manganese – mangan) [13].

## 5.4 Vliv velikosti zrna

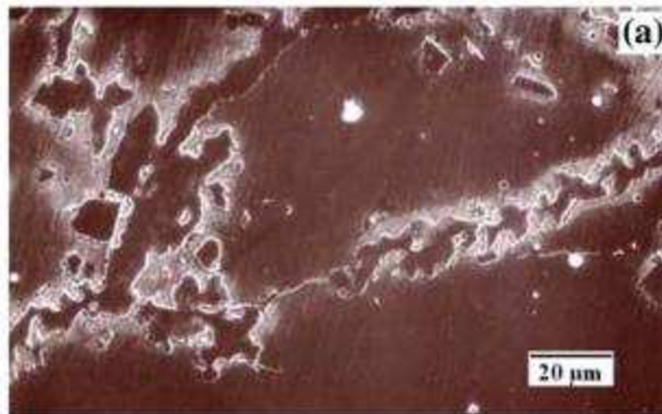
Velikost zrna má velký podíl na mechanických vlastnostech a odolnosti proti opotřebení austenitických manganových ocelí. [14] Zvětšující se velikost jednotlivých zrn působí negativně na pevnost v tahu, která klesá. Největší vliv na velikost zrna má odlévací teplota, vysoká odlévací teplota má za následek hrubé zrno, a jelikož při následném chladnutí ocel neprojde v tuhém stavu fázovou přeměnou, není možné lící zrno zjemnit. [1], [8]

Na velikost zrna mohou mít vliv také prvky, které se přidávají do manganové oceli. Dle zkoušek vanad ani molybden nemají výrazný vliv na zlepšení mechanických vlastností, jestliže se ocel odlévá za dostatečně nízké teploty a je jemnozrná. Pozitivní vliv na velikost zrna má dodatečné legování (například titanem), ale je smysluplné pouze u odlévání odlitků s větší tloušťkou stěny, resp. u odlitků, které jsou komplikované a jsou odlévány za vyšší lící teploty. [1] Titan zvyšuje počet krystalizačních zárodků austenitu, pokud je těchto zárodků dostatek, růst sloupkovitých krystalů austenitu je zpomalován a struktura odlitků je tvořena z jemných zrn. [14]

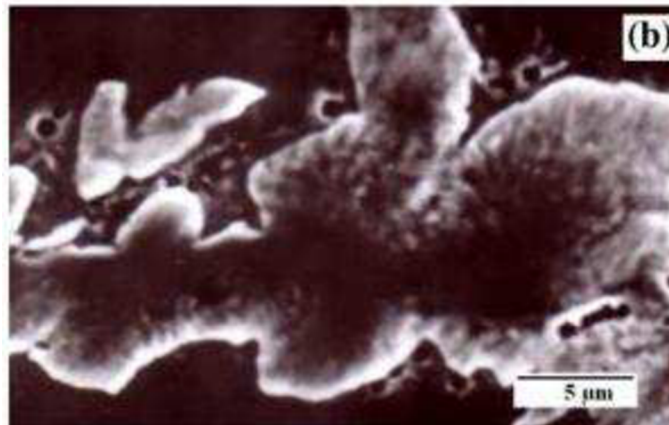
## 5.5 Mikrostruktura

Manganová ocel po odlití obsahuje množství karbidů  $(Fe, Mn)_3C$ . Před použitím musí projít ocel žháním, aby se karbidy dostaly do roztoku a výsledkem byla úplná austenitická struktura. Roztok je většinou žhán při teplotě 1050 °C po dobu několika hodin a poté následuje kalení vodou. Na obr. 28 a 29 je zobrazena mikrostruktura manganové oceli, ve které jsou karbidy  $(Fe, Mn)_3C$  vysráženy podél hranic austenitických zrn, což má za následek vyčerpání uhlíku a manganu v matici sousedící s karbidovou sítí. Mangan a uhlík stabilizují

austenit, takže vyčerpání těchto prvků z okolí karbidové sítě vede k rozkladu austenitu na  $\alpha$ -ferity a karbidy  $(\text{Fe, Mn})_3\text{C}$ . [7], [15]

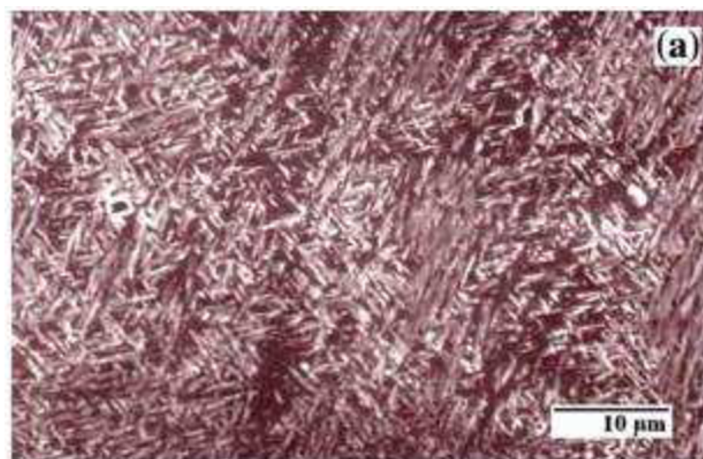


Obr. 28 Mikrostruktura manganové oceli, síťovi z karbidů a  $\alpha$ -feritů [15].



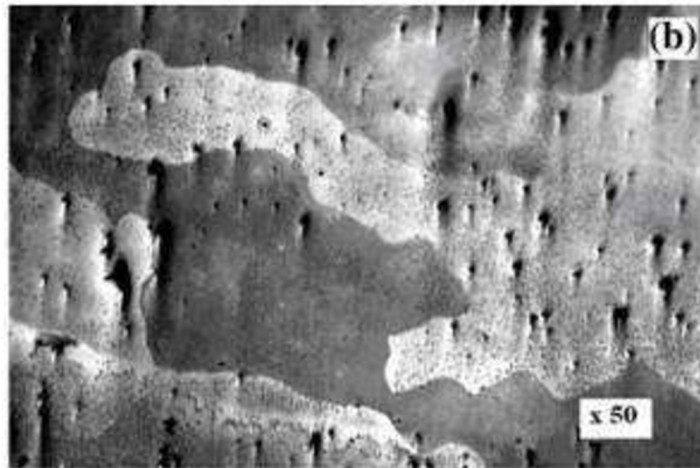
Obr. 29 Detail s lepším rozlišením karbidové sítě z předchozího obrázku [15].

Na obr. 30 je vzorek po žihání pod mikroskopem. Bylo zjištěno, že na povrchu se tvoří tenká vrstva  $\alpha$ -martenzitu. Je to způsobeno nepřítomností inertní atmosféry a ztrátou uhlíku a manganu z povrchové vrstvy, kdy během kalení v této vrstvě vzniká již zmíněný  $\alpha$ -martenzit. [15]



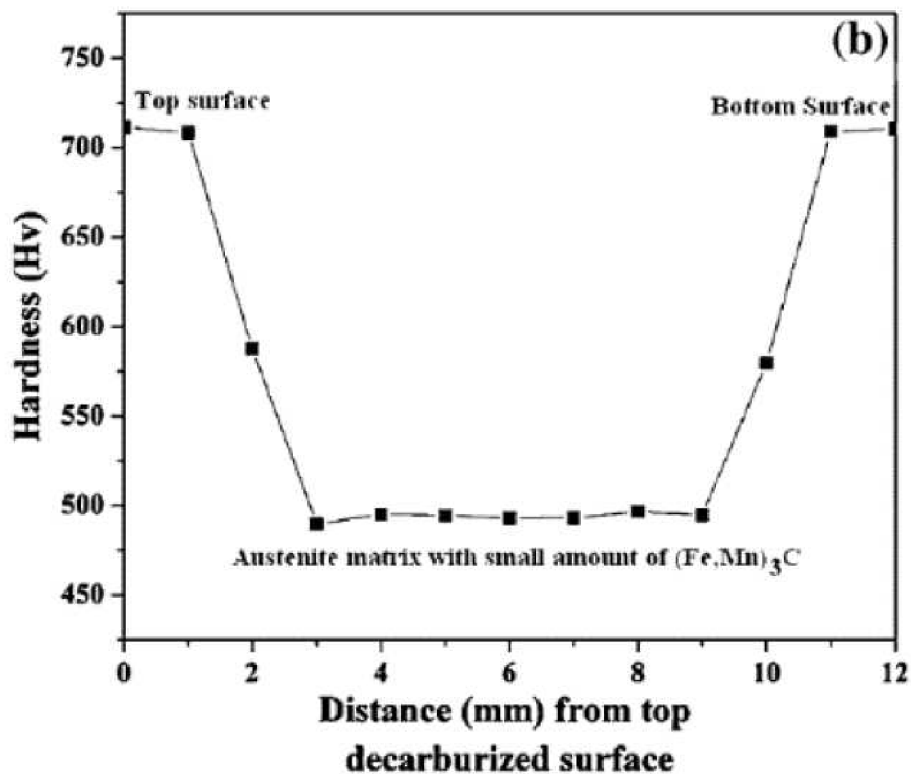
Obr. 30 Struktura po žihání. Tenká vrstva  $\alpha$ -martenzitu na povrchu [15].

Po odstranění povrchové dekarbonizované vrstvy u vzorků, které již prošly žiháním, lze na snímcích z optického mikroskopu na obr. 31 pozorovat, že většina karbidů  $(\text{Fe, Mn})_3\text{C}$ , přítomných podél hranic austenitických zrn, se rozpustila. Matrice tedy po žihání a následném zakalení vodou získala zcela austenitickou strukturu s malým množstvím karbidů. Tvorbu karbidů lze omezit správně zvoleným žiháním roztoku, je třeba ale věnovat pozornost dobře zvolené teplotě, aby se zabránilo nadměrnému hrubnutí zrn austenitu. [7], [15]



Obr. 31 Struktura po odstranění povrchové dekarbonizované vrstvy [15].

Na obr. 32 je znázorněn profil tvrdosti v povrchové vrstvě vzorku. Hodnoty tvrdosti do hloubky asi 1 mm jsou téměř stejné z důvodu vytvoření tvrdé vrstvy  $\alpha$ -martenzitu. U testovacího vzorku je tloušťka dekarbonizované vrstvy asi 1 až 2 mm, ve vzdálenosti 3 až 9 mm od povrchu jsou hodnoty tvrdosti víceméně konstantní v důsledku vytvoření austenitické matrice s malým množstvím karbidů  $(\text{Fe, Mn})_3\text{C}$ . Profil tvrdosti tedy potvrzuje již zmíněnou tvorbu  $\alpha$ -martenzitu na povrchu. [15]



Obr. 32 Graf zobrazující závislost tvrdosti na vzdálenosti od povrchu. (Hardness – tvrdost, distance from top decarburized surface – vzdálenost od povrchu dekarbonizované vrstvy, top surface – vrchní vrstva, bottom surface – spodní vrstva, austenite matrix with small amount of  $(Fe, Mn)_3C$  – austenitická matrice s malým množstvím karbidů) [15].

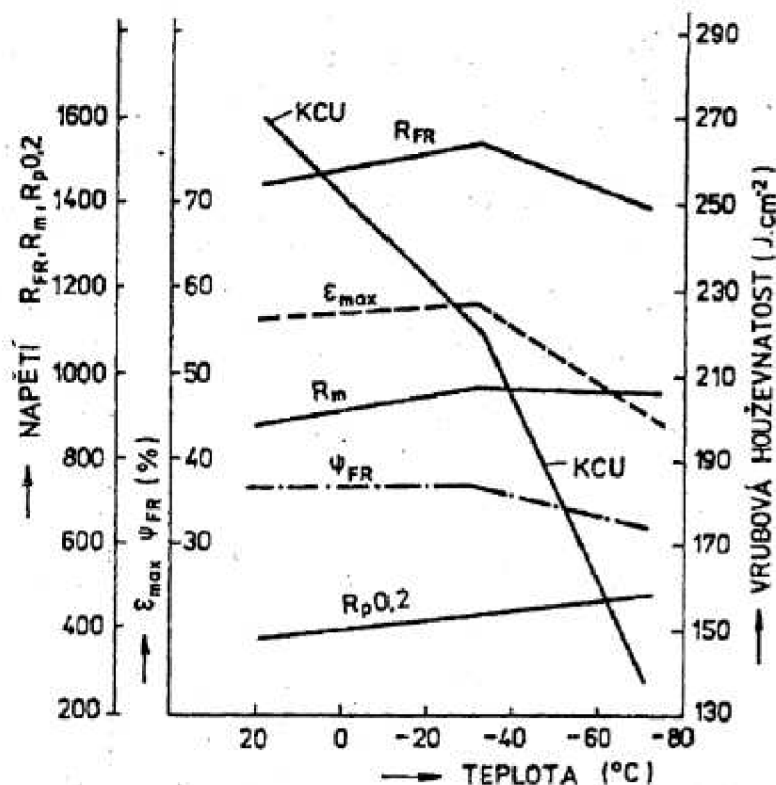
Pro dosažení požadovaných vlastností a struktury, by odlitek neměl být tepelně upraven v prostředí otevřené pecní atmosféry nebo ve slabé oxidační atmosféře dokud není odstraněna dekarbonizovaná vrstva. Doba a teplota u tepelného zpracování by měla být optimalizována pro dosažení zcela austenitické struktury a zároveň je třeba zabránit nadměrnému růstu zrna. [15]



## 6 VLASTNOSTI HADFIELDOVY OCELI

Nejdůležitější vlastností austenitických manganových ocelí je možnost zpevňování při dostatečně vysokém tlaku nebo rázu. V případě, že je tato ocel namáhána pouze abrazivně, tedy právě bez působení tlaku nebo rázů, nedosahuje z hlediska opotřebení dobrých výsledků. [1]

Mez kluzu austenitických manganových ocelí je relativně nízká a její hodnota se pohybuje v rozsahu od 345 MPa do 414 MPa. Při snížení teploty pod 0 °C se mírně zvyšuje, toto zlepšení lze pozorovat na obr. 33. [1]

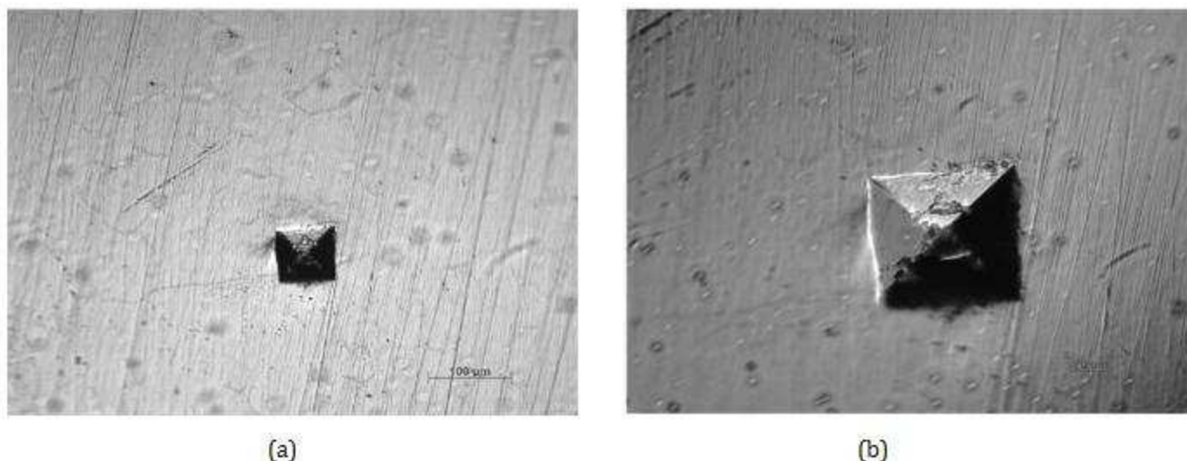


Obr. 33 Závislost mechanických vlastností manganových ocelí na teplotě. ( KCU - vrubová houževnatost,  $R_{FR}$  – napětí u přetržení,  $\epsilon_{max}$  – tažnost,  $R_m$  – mez pevnosti v tahu,  $\Psi_{FR}$  – zúžení při přetržení,  $R_{p0,2}$  – mez kluzu) [1].

Manganová ocel má lepší pevnost než nízkouhlíková ocel, ale v porovnání se střední uhlíkovou ocelí nedosahuje tak dobrých výsledků. Pokud ovšem tyto dvě oceli porovnáme z hlediska tvrdosti, jasně lepších výsledků dosáhneme u manganové oceli. Měření tvrdosti není jednoduché, jelikož při působení tlaku tvrdoměru se matrice na povrchu oceli zpevňuje. V práci [17] jsou publikovány výsledky testů tvrdosti. Na obr. 34 je fotografický snímek pořízený v průběhu testu tvrdosti, v případě a) se jedná o tepelně upravený vzorek, v případě b) jde o vzorek po odlití. Dle výsledků je jisté, že tepelné zpracování zvyšuje tvrdost vzorku. [1], [7], [16], [17]

Tab. 4 Výsledky testu tvrdosti [17].

Popis	Tvrdost, (HB)
Manganová ocel po odlití	188
Tepelně zpracovaná manganová ocel	220



Obr. 34 Detailní snímek vrubu po testu tvrdosti, (a) - tepelně zpracovaný odlitek, (b) - odlitek po odlití [17].

Pevnost v tahu u manganových ocelí je proměnlivá, ale obecně se její hodnota pohybuje okolo 965 MPa, při této pevnosti dosahuje tažnosti v rozsahu 35 až 40 %. Mez únavy je asi 269 MPa a modul pružnosti má hodnotu okolo  $1,86 \times 10^5$  MPa, ale všechny výše uvedené hodnoty mechanických vlastností se mohou výrazně lišit v závislosti na velikosti průřezu odlitku. Hlavním důvodem těchto rozdílů je velikost zrna, vzorky s jemnou strukturou zrna vykazují až o 30 % lepší pevnost v tahu a prodloužení než vzorky hrubozrnné. Nejnáchylnější jsou velké a těžké odlitky, protože jejich části nezduhnou dostatečně rychle. U zkoušek v tahu je tedy dbát na to, aby byl v celém průřezu dostatečný počet zrn. U odlitků o tloušťkách 102 mm jsou pevnost v tahu, tažnost a houževnatost podstatně nižší, než u odlitků o tloušťce 25 mm. [7], [16]

Po ochlazení kalením ve vodě z teploty 1050 °C mají manganové oceli vysokou vrubovou houževnatost, její hodnota se pohybuje kolem  $300 \text{ J.cm}^{-2}$ . Pokud se dostaneme do záporných teplot, vrubová houževnatost sice klesá, ale až do teploty kolem -70 °C zůstává mimořádně vysoká. [1]

## 6.1 Odolnost proti opotřebení

Manganová ocel s obsahem 12 % manganu nepochybně patří k nejlepším kovům odolávajícím opotřebení, její použití ovšem není univerzální. Rozhodujícím faktorem pro použití v abrazivním prostředí je houževnatost, nikoli odolnost proti oděru. Odolnost proti oděru je u této oceli menší než u martenzitické bílé litiny nebo u martenzitické oceli s vysokým podílem uhlíku, ale manganová ocel je většinou odolnější než bílé perlitické litiny nebo oceli. [7], [18]

Tato ocel vyniká v odolnosti proti opotřebení při kontaktu kovu na kov, z tohoto důvodu je velmi často využívána pro výrobu ozubených kol, kotoučů a pastorků. Dalším častým využitím je u nástrojů s drážkováním, jako jsou zařízení pro manipulaci nebo drcení hornin a nerostů. Pracovní vytvrzení manganové oceli je velkou výhodou, snižuje tření, a pokud teploty nepřekračují určitou hranici, zajišťují odolnost proti poškození. [7]

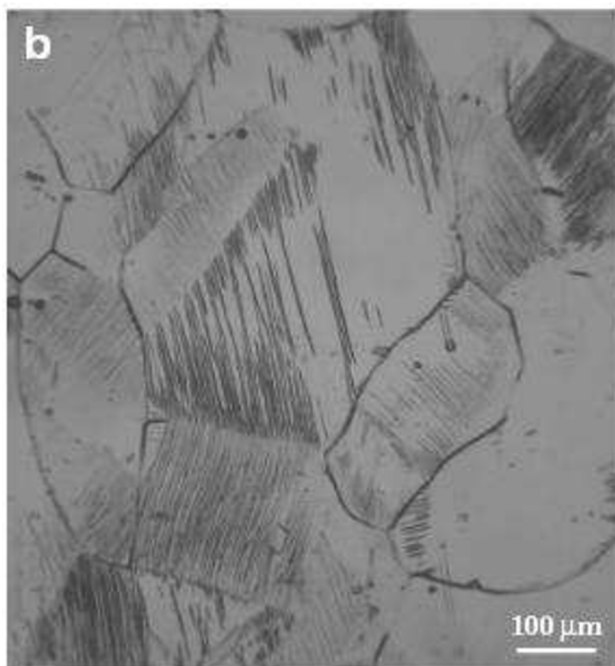
Průměrné odolnosti dosahuje ocel proti otěru s velkými nároky na namáhání u různých nástrojů na mletí a válcování. Nejnižší odolnost lze přisuzovat proti oděru s nízkým namáháním, jedná se například o zařízení pro manipulaci s pískem nebo písečnými kaly. [7]

Při použití v místech s velkými rázy a vysokým tlakovým namáháním se manganová ocel může opotřebovávat rychleji, než tvrdá a ořevzdorná martenzitická ocel. Tyto oceli jsou ale často náchylné na lomové porušení v téměř původním průřezu bez znatelného opotřebení,

zatímco manganová ocel díky vysoké houževnatosti vydrží až do tloušťky rovnající se tloušťce papíru a až poté dochází k lomu. [7]

## 6.2 Deformační zpevnění

Deformační zpevňování je umožněno díky schopnosti zpevňovat se za dostatečně vysokého tlaku nebo rázu. Postupům probíhajícím při zpevňování povrchu se věnovalo množství prací a bylo zjištěno více mechanismů, které přispívají k vytvrzování odlitků. Jako hlavní ovlivňující faktory bylo určeno chemické složení, teplota, rychlost deformace a způsob namáhání. To znamená, zda působí tahové, tlakové nebo ohybové napětí. Jedna z teorií vysvětlující důvod schopnosti deformačního zpevnění je transformace austenitické struktury na  $\epsilon$  nebo  $\alpha$ -martenzit. Tato teorie je ale dle prací [1] a [19] nesprávná, protože obsah martenzitu byl při plastické deformaci manganové oceli řádově nižší než jedno objemové procento. Větší množství těchto fází byl připisován vlivu míst, ve kterých je obsah uhlíku a manganu menší, než v okolní struktuře. Na obr. 35 je struktura oceli po deformačním zpevnění. [1], [7]



Obr. 35 Struktura manganové oceli po deformačním zpevnění [19].

Při plastické deformaci austenitické manganové oceli dochází k pohybu soustavy dislokací a při tomto pohybu vznikají nové vrstevné chyby a dvojčatové lamely. Tvorba těchto nových poruch ve struktuře je příčinou pro nárůst tvrdosti v počátečním stádiu deformace. Pokud deformace pokračuje, impulsem pro další zpevnění je navýšení hustoty těchto strukturních poruch a to tak, že tyto poruchy brání pohybu soustav dislokací a ty se hromadí na menší ploše. Při dalších stupních deformace se zvyšuje hustota dvojčatových lamel, které při svém nerovnoměrném uspořádání rozštěpují matici na čím dál menší oblasti. [1]

V průběhu plastické deformace vznikají nové dislokace, ty ale nejsou ve své původní formě schopny přejít dvojčatovou lamelu. Je proto nutné, aby vznikly tzv. interface dislokace, ty jsou schopny pohybu až při působení vyššího napětí. Čím je struktura matrice s dvojčatovými lamelami jemnější, tím roste i hustota tzv. interface dislokací a musí se zvýšit i napětí, které umožňuje plastickou deformaci. [1]

Dalším faktorem, který ovlivňuje výsledek deformačního zpevnění, jsou atomy uhlíku, které se hromadí v místech s maximální koncentrací dislokací. Ve výsledné vrstvě, která je deformačně zpevněná lze tedy nalézt vrstevné chyby, dvojčatové lamely a síť kluzových dislokací. Celkový stupeň zpevnění tedy záleží na množství a poměru výše uvedených strukturních poruch. [1]

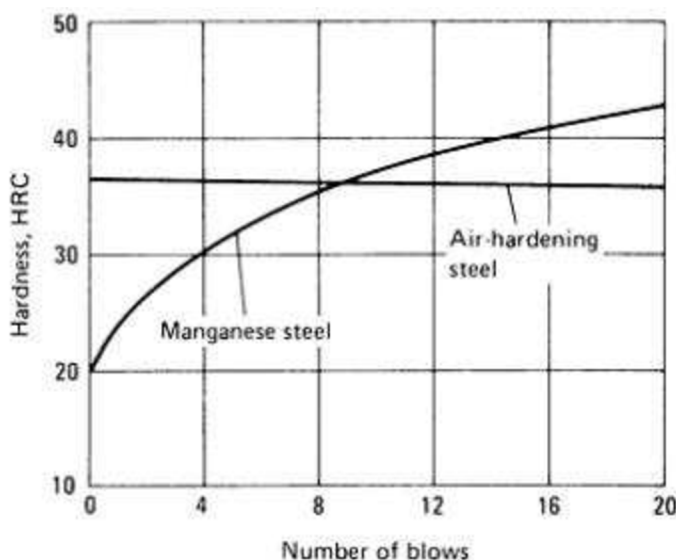
Manganové oceli jsou ve vlastnosti deformačního zpevnění nepřekonatelné a při některých aplikacích mohou překonat dokonce metastabilní austenitické nerezové oceli. Standardní stupeň manganové oceli obsahující 1,0 až 1,4 % C a 10 až 14 % Mn může být vytvrzen z počáteční hodnoty povrchové tvrdosti 220 HV až k hodnotě dosahující více než 900 HV. Třením pod vysokým tlakem je možné dosáhnout lepší tvrdosti, než je možné dosáhnout jednoduchými nárazy. [7]

Deformační zpevnění se zpravidla provádí nárazem, například údery kladiva. Lehké nárazy, i když jsou prováděny s vysokou kadencí, způsobují sice velmi dobrou povrchovou tvrdost, ale působí pouze na tenkou vrstvu na povrchu. Silnější nárazy způsobují vyšší tvrdost i ve větší hloubce s nižšími hodnotami tvrdosti na povrchu. [7]

Na obr. 36 je srovnání tvrdosti standardní 12 % manganové oceli se vzduchem kalenou chrom-nikl-molybdenovou legovanou ocelí při opakovaných nárazech kladiva. Oba vzorky měly stejnou velikost a velikost nárazové energie při každém úderu byla 680 J. Chemické složení je uvedeno v tab. 5, manganová ocel byla kalená vodou z teploty 1010 °C, vzduchem kalená byla ochlazená z 900 °C, znovu ohřátá na 705 °C a opět ochlazená vzduchem. [7]

Tab. 5 Chemické složení použitých ocelí [7].

	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
<b>Manganová ocel</b>	1,17	12,8	0,46	-	-	-
<b>Chrom-nikl-molybdenová ocel</b>	0,74	0,88	0,3	0,75	1,40	0,38



Obr. 36 Tvrdost u manganové a chrom-nikl-molybdenové oceli v závislosti na počtu úderů kladiva (Manganese steel – manganová ocel, air-hardening steel – vzduchem kalená ocel, hardness – tvrdost, number of blows – počet úderů) [7].

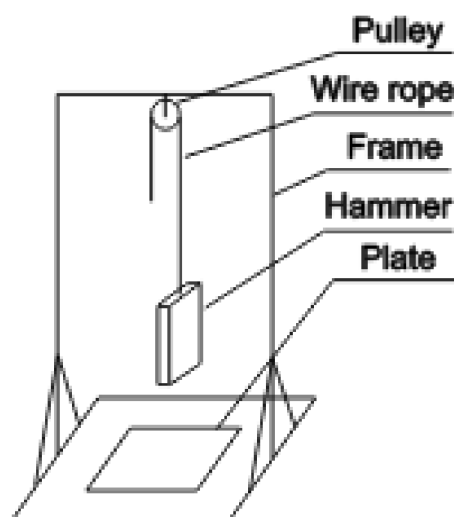
### 6.2.1 Zpevňování dopadem závaží

V práci [20] se autoři zabývali vlivem nárazové energie při vytvrzování austenitické manganové oceli. Hlavním cílem práce bylo co nejvíce se přiblížit pracovním podmínkám a zjistit morfologii mikrostruktury a mechanismus vytvrzování. Postupně byly simulovány různé nárazové energie (50, 80, 100 a 200 J.cm<sup>-2</sup>) a snahou bylo simulovat práci nárazových kladiv a mlecích mlýnů. Vzorek z manganové oceli byl podroben rozpouštěcímu žíhání a zakalení ve vodě, poté byly pro testování vyřezány krychličky o délce strany 1 cm. Pro účel testování byly vyrobeny dvě chemicky odlišné sady, jejich chemické složení je uvedeno v tab. 6. [20]

Tab. 6 Chemické složení vzorků [20].

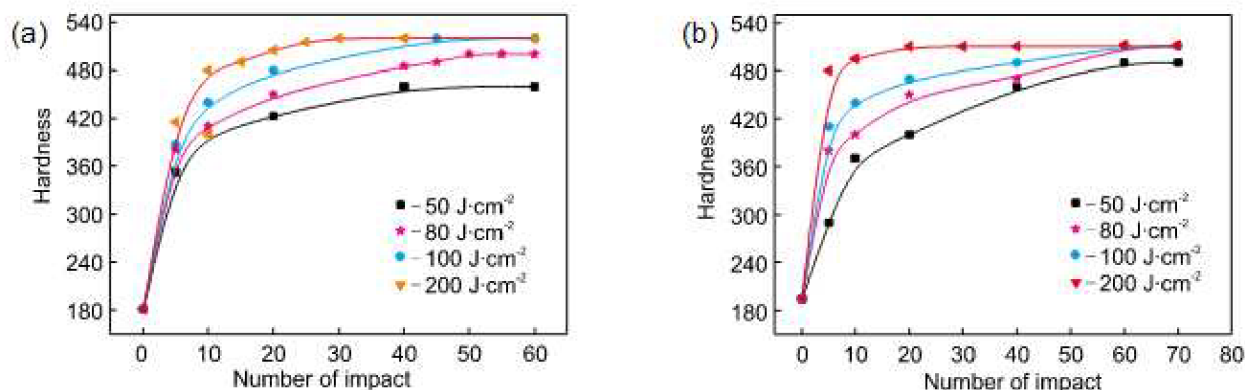
Chemický prvek	C	Si	Mn	Cr	Mo
Vzorek (a)	0,8	0,28	12,8	1,78	0,48
Vzorek (b)	1,23	0,51	14,23	2,25	0,86

Pro samotný experiment bylo vytvořeno speciální zařízení založeno na principu změny potenciální energie na energii nárazovou. Bylo tvořeno úderným kladivem o hmotnosti 18 kg, které bylo vyzdviženo do předem propočítané výšky, aby nárazová energie dosáhla požadované hodnoty. Na obr. 37 je schéma zařízení. [20]



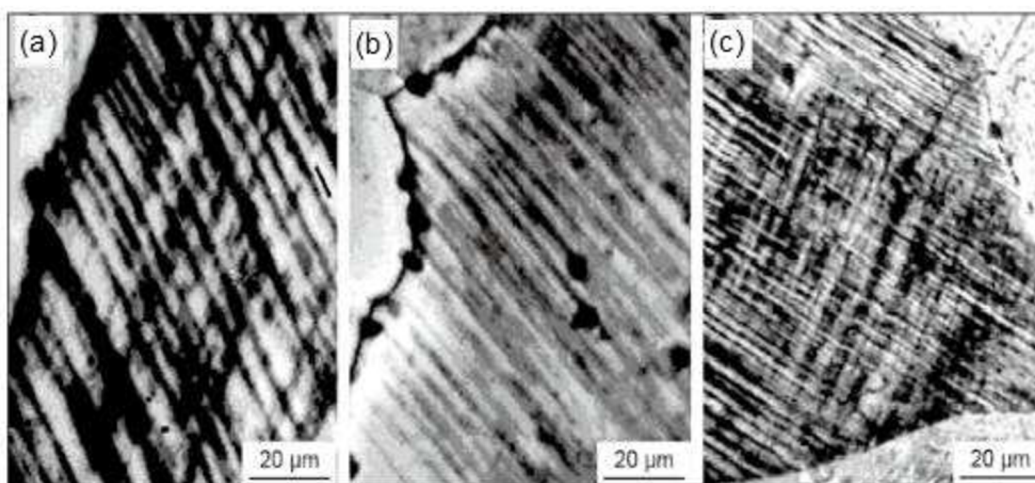
Obr. 37 Schéma zařízení na deformační zpevňování (Pulley - kladka, wire rope - ocelové lano, frame - rám, hammer - kladivo, plate - vzorek) [20].

Na obr. 38 jsou výsledky vyjádřeny v závislosti změny tvrdosti na nárazové energii. U obou vzorků jsou výsledky podobné, nejrychlejší zvýšení tvrdosti probíhá do 10 úderů kladiva, poté se rychlost zlepšování tvrdosti postupně snižuje, dokud tvrdost nedosáhne maxima. Pro plné využití schopností manganové oceli by měla energie nárazu překročit kritickou hodnotu, u vzorku (a) je tato hodnota rovna 100 J.cm<sup>-2</sup> a 80 J.cm<sup>-2</sup>. [20]



Obr. 38 Závislost tvrdosti na počtu úderů kladivem (Number of impact – počet úderů, hardness – tvrdost) [20].

Na obr. 39 je mikrostruktura vzorku (a) pro různé hodnoty nárazové energie, se zvyšující se energií dopadu narůstá počet dislokací, vrstevných chyb a dvojčatových lamel. Pokud nárazová energie nepřekročí kritickou hodnotu, zpevnění vychází především z pohybu dislokací a skluzového mechanismu. Pokud se dostaneme nad kritickou energii, projevuje se mechanismus zpevnění pomocí dvojčatových lamel a hustou dislokací. Nejlepších výsledků lze dosáhnout pomocí vyšší nárazové energie, která pomáhá vytvořit hustou síť dvojčatových lamel, která brání pohybu dislokací. [20]



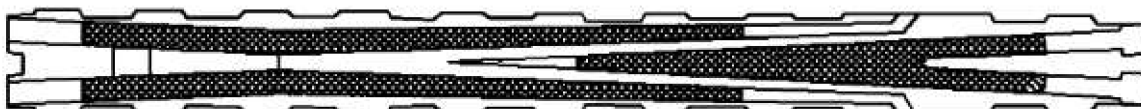
Obr. 39 Mikrostruktura vzorků (a) pro nárazovou energii (a) - 50 J·cm<sup>-2</sup>, (b) - 100 J·cm<sup>-2</sup>, (c) - 200 J·cm<sup>-2</sup>. [20]

## 6.2.2 Zpevnování výbuchem

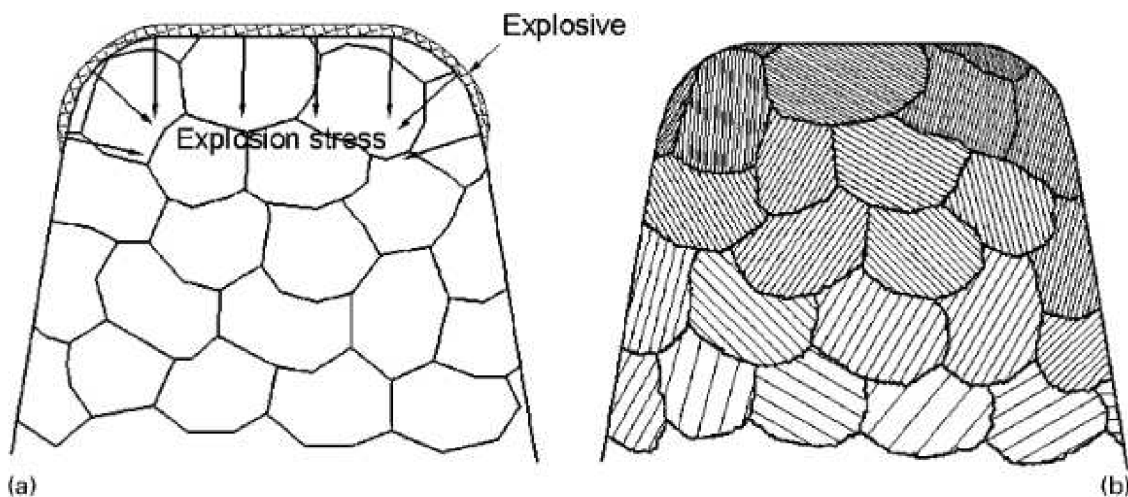
Technologie zpevnování výbuchem zvyšuje tvrdost oceli silnou plastickou deformací, která je způsobena nárazovou vlnou po výbuchu. Výhodami této metody je vytvrzování s menší deformací a zlepšení tvrdosti i ve větší vzdálenosti pod povrchem odlitků. Jako první se pokusy s technikou zpevnování výbuchem zabýval v USA vynálezce Norman A. MacLeod v roce 1955, ve stejném roce si tuto metodu nechal patentovat. [7], [21]

Technologie zpevnění výbuchem využívá tenké vrstvy výbušniny na povrchu součásti o tloušťkách 2, 3 a 5 mm. Detonační rychlost použitých trhavin se pohybuje kolem 7000 až 8000 m·s<sup>-1</sup>. Na povrchu oceli se vytváří přechodně obrovské napětí o velikosti 10 až 20 GPa, velikost tohoto napětí závisí především na tloušťce použité výbušniny. Toto napětí má za

následek rázovou vlnu, která má za následek vznik defektů v krystalové mřížce jako pohyb dislokací nebo vznik neformačních dvojčat. Pro dosažení požadované tvrdosti jsou obvykle potřeba tři výbuchy, další detonace už nemají výrazný vliv na tvrdost a s dalšími pokusy se zvyšuje možnost vzniku prasklin. Použití plastických trhavin umožňuje zpevnění součástí se složitými tvary a profily, u kterých není možné použití jiných metod. Na obr. 40 jsou vyšrafovana místa, kam se umísťuje výbušnina pro deformační zpevnění. Obr. 41 zobrazuje vliv výbušniny na odlitek a zlepšení tvrdosti, které je na povrchu největší. [7] [21]

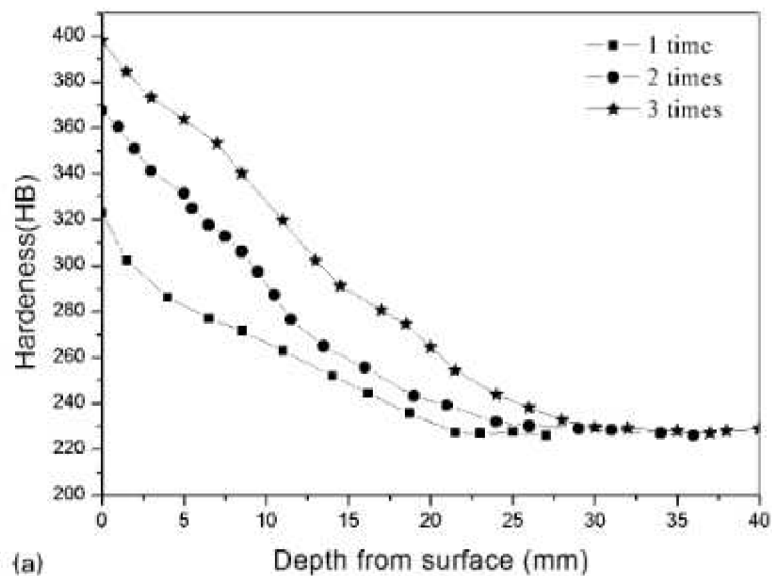


Obr. 40 Náčrt fragmentu srdcovky a vyznačených oblastí, kde bude použita výbušnina ke zpevnění [21].



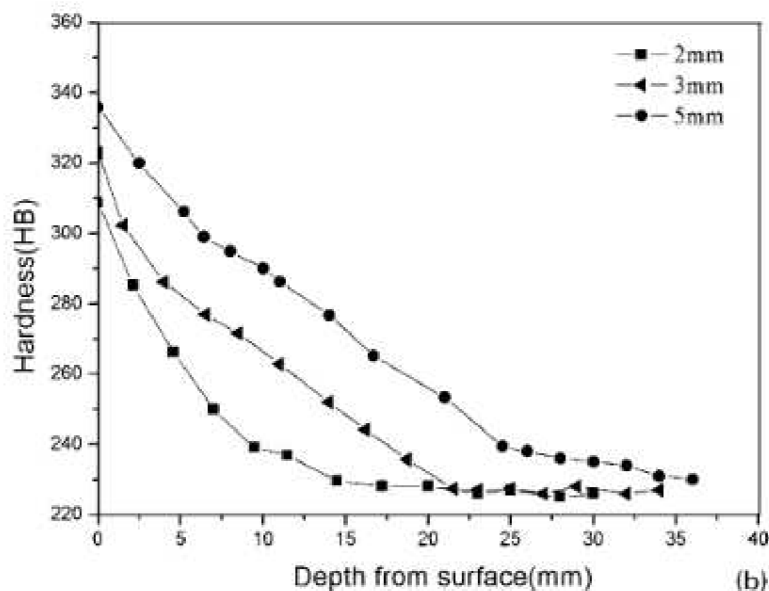
Obr. 41 Nákras deformace manganové oceli před (a) a po zpevnění výbuchem (b) [21].

Autoři práce [21] se zabývali měřením povrchové tvrdosti při zpevňování výbuchem s různými tloušťkami výbušnin a různými počty detonací. Na obr. 42 je znázorněno rozložení tvrdosti ve vzorku vystaveného působení jednoho až tří výbuchů a výsledky jsou vyjádřeny v grafu. Pro tento vzorek byla použita plastická trhavina o tloušťce 3 mm. Při aplikování jednoho, respektive dvou a tří výbuchů byla na povrchu dosažena tvrdost 330 HB, respektive 370 HB a 395 HB, zlepšení tvrdosti lze pozorovat do hloubky 20 mm, respektive 25 mm a 30 mm. Je tedy patrné, že opakování výbuchů zvyšuje deformaci krystalické mřížky a v důsledku toho se zvyšuje tvrdost. [21]



Obr. 42 Porovnání tvrdosti při opakování výbuchu a vliv na zpevnění do hloubky (Hardness – tvrdost, depth from surface – hloubka od povrchu) [21].

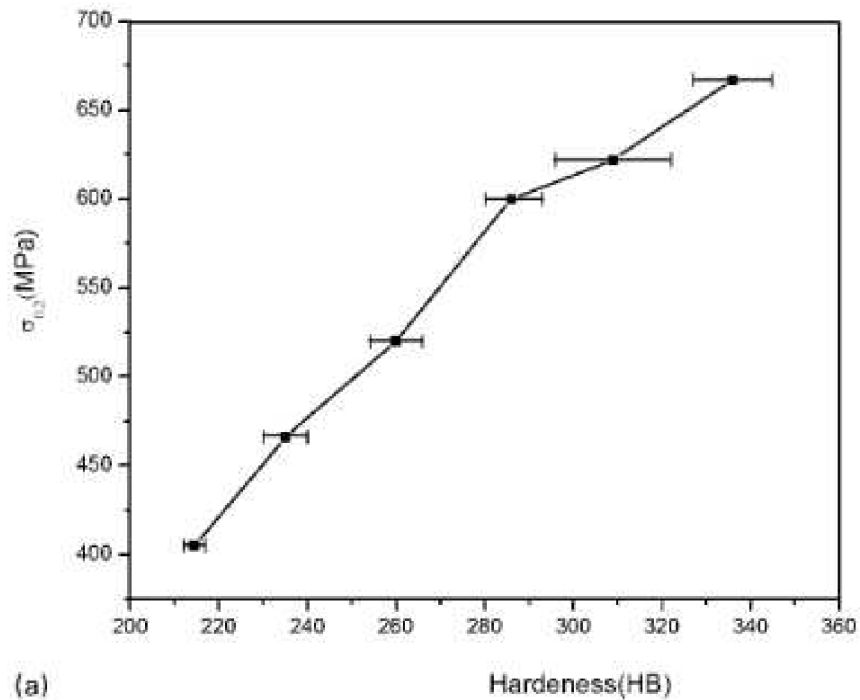
Na obr. 43 je znázorněno rozložení tvrdosti ve vzorku vystavenému použití trhavin s rozdílnou tloušťkou použité výbušniny. Výsledky odhalily, že s větší tloušťkou trhavin stoupá jak tvrdost, tak i hloubka vytvrzené oblasti. Toto měření tak potvrzuje, že větší tloušťka trhavin vytváří větší rázovou vlnu, která vede k výraznější deformaci. [21]



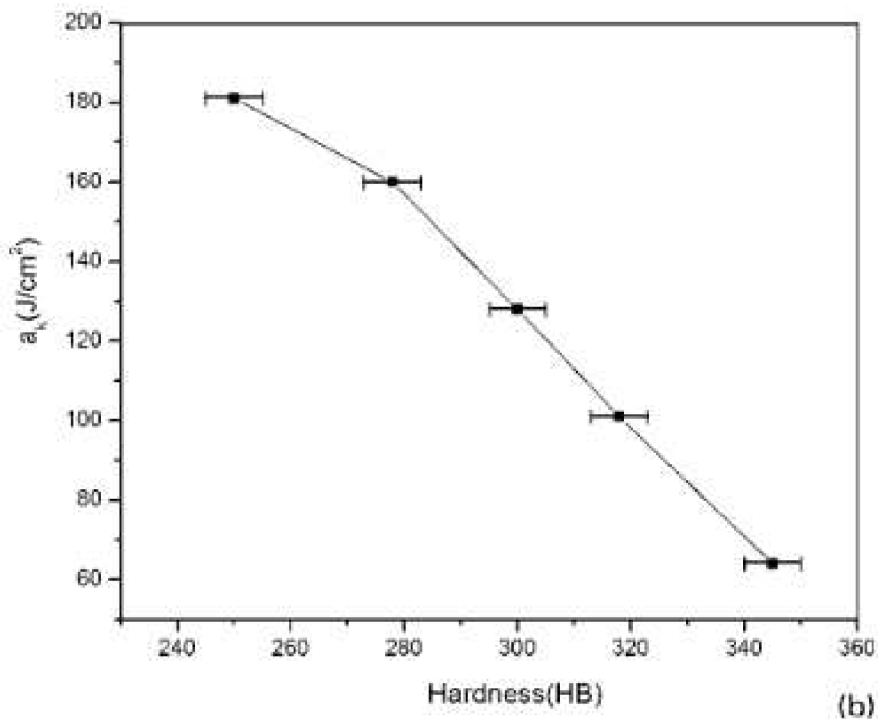
Obr. 43 Porovnání vlivu tloušťky použité trhavin na tvrdost a hloubku vytvrzené oblasti (Hardness – tvrdost, depth from surface – hloubka od povrchu) [21].

Autoři práce [21] měřili také vliv dosažené tvrdosti výbuchem na mez kluzu a vrubovou houževnatost. Vzorek, který byl podroben měření, byl vystaven dvakrát výbušnině o tloušťce 3 mm a z obr. 44 je patrné, že zpevnění výbuchem výrazně zvyšuje mez kluzu (a), zatímco vrubová houževnatost na obr. 45 (b) se zmenšuje až k hodnotě kolem  $60 \text{ J.cm}^{-2}$ .





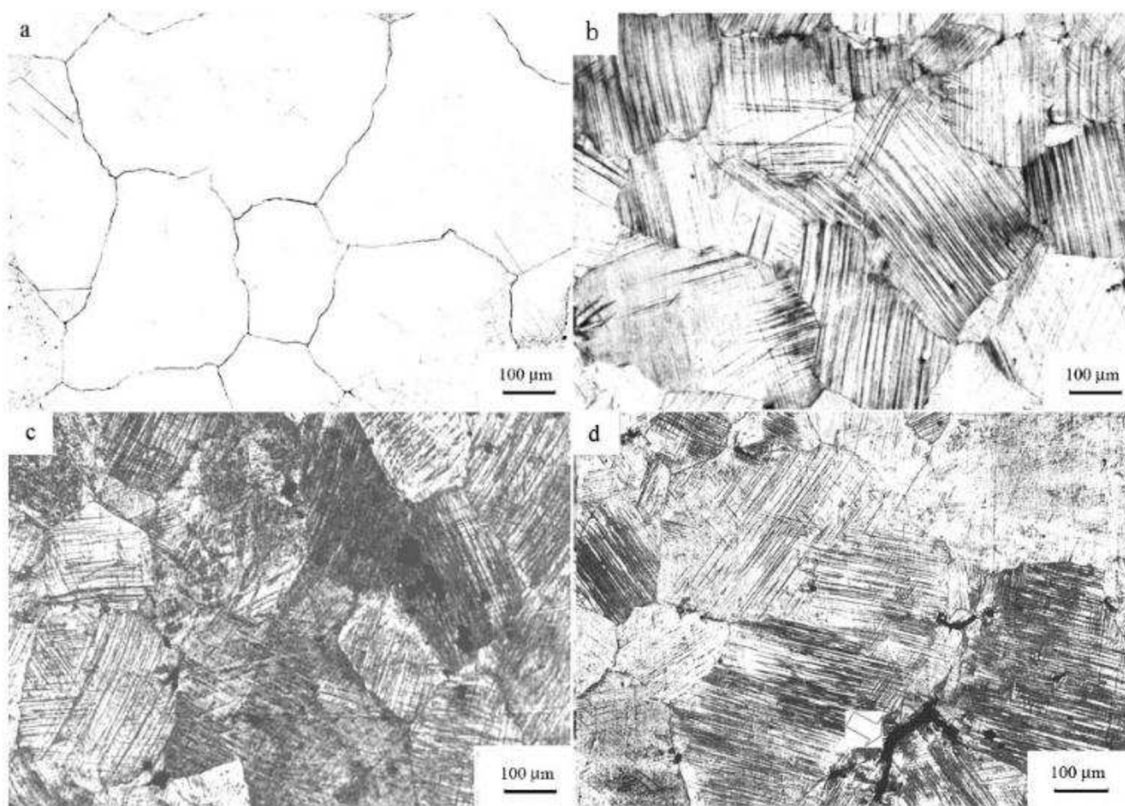
Obr. 44 Mez kluzu v závislosti na tvrdosti ocele ( Hardness - tvrdost) [21].



Obr. 45 Vrubová houževnatost v závislosti na tvrdosti (Hardness - tvrdost) [21].

Na obr. 46 je mikrostruktura části železniční srdcovky, na snímku (a) je struktura bez zpevnění výbuchem, kde je jasně vidět složení z jednofázového austenitu. Na struktuře snímků (b) a (c), na kterých byl vzorek podroben jednomu, respektive dvěma výbuchům, se v jednotlivých zrnech vyskytuje mnoho deformačních pásů, které vznikají pohybem dislokací. Na posledním snímku (d) byl pro zpevnění použit list výbušniny o tloušťce 5 mm, což se

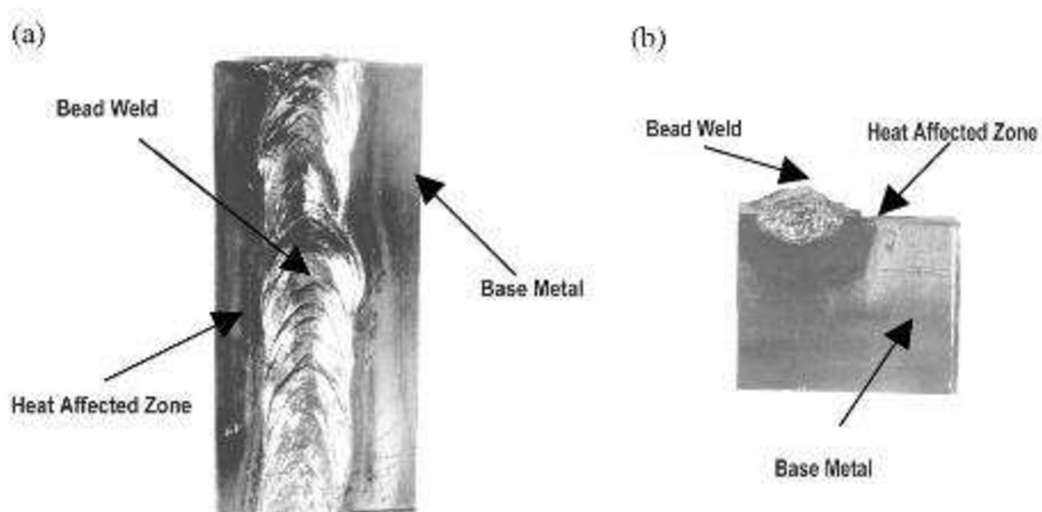
projevilo vznikem mikrotrhlin na hranicích austenitických zrn. Mikrotrhlina je na snímku označena šipkou. Tyto mikrotrhliny jsou způsobeny příliš velkou rázovou vlnou způsobenou explozí. [21]



Obr. 46 Mikrostruktura vzorku bez zpevňování výbuchem (a), zpevnění jedním výbuchem s tloušťkou trhavinou 3 mm (b), dvěma výbuchy s tloušťkou trhavinou 3 mm (c) a jedním výbuchem s tloušťkou trhavinou 5 mm (d) [21].

### 6.3 Svařitelnost

Chemické složení dělá manganovou ocel těžce svařitelnou a je tím omezena jejich průmyslová aplikace. Jsou náchylné na místní ohřev a při sváření se nanáší pouze krátké housenky s pauzami pro vyrovnání teplot v okolí svaru. Působením ohřevu se materiál může stát křehkým až do okamžiku ztráty jeho charakteristické houževnatosti. To znemožňuje možnost předehřívání materiálu. I za příznivých podmínek se počítá s částečnou precipitací karbidů a oblasti ovlivněné teplem jen málokdy dosahují houževnatosti základního materiálu. U manganových ocelí dochází ke zpevnění povrchu za provozu. Lze tedy předpokládat, že u oblastí vyžadujících opravu bude povrch vytvrzen. Tento povrch je nutné před svařováním odstranit, aby se zabránilo vzniku trhlin s tepelně ovlivněné oblasti. Trhliny ve struktuře je také třeba odstranit, provádí se to broušením nebo drážkováním vzduchem. Z důvodu menšího tepelného zatížení okolí je preferován druhý způsob. Na obr. 47 (a) je podélný řez svaru a na obr. 47 (b) je příčný řez. V příčném řezu lze jasně rozeznat tepelně ovlivněnou oblast. [7], [22], [23]



Obr. 47 Podélný (a) a příčný (b) řez svařovaného vzorku (Bead weld – korálek svaru, base metal – základní materiál, heat affected zone – tepelně ovlivněná zóna) [23].

Svařování pomocí kyslíkových plynů způsobuje zkřehnutí materiálu, a proto se u manganových ocelí nepoužívá. Upřednostňovanou metodou spojování nebo navařování manganových ocelí je svařování elektrickým obloukem. Svařování obloukem je možné využít pro úpravy povrchu, opravy svarů a pro spojení manganových ocelí. Elektrody pro obloukové svařování manganových ocelí obsahují snížený podíl uhlíku, aby se předešlo precipitaci uhlíku při ochlazování materiálu z teplot při svařování. Je třeba zabránit poškození v tepelně ovlivněné zóně, doporučuje se tedy, aby teplota kovu v okolí svaru nepřekročila, po uplynutí 1 minuty, teplotu 315 °C. [7], [22], [23]

Během svařování dochází ke ztrátám uhlíku, manganu a křemíku a výrobci elektrod se snaží tyto ztráty kompenzovat. Nesprávná technika svařování, například nesprávná délka oblouku, může způsobit špatné vlastnosti svaru. Před samotným svařováním je nutné z povrchu odstranit mastnotu, rez a všechny nečistoty. [7], [22]

## 7 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo shrnout poznatky o manganových ocelích. Pozornost byla věnována především způsobu výroby, chemickému složení a vlivu legujících prvků na vlastnosti oceli, dále se práce zabývá využitím manganové oceli v průmyslové praxi, strukturou, tepelným zpracováním, vlastnostmi této unikátní oceli a také deformačním zpevněním. Deformační zpevnění je velmi důležitou částí této práce a je umožněno díky schopnosti zpevňování se při působení dostatečně velkých tlaků nebo rázů, díky kterým se povrch manganové oceli stává odolným především vůči abrazi. V části o výrobě je značná část této kapitoly věnována použití olivínových písků, což se dle dosažených výsledků velmi osvědčilo.

Manganová nebo také Hadfieldova ocel, jak je nazývána po svém objeviteli, je i přesto, že se od jejího objevení její chemické složení téměř nezměnilo, nepostradatelnou a má svoje místo v mnoha aplikacích. Doposud se nepovedlo najít materiál, který by mohl manganovou ocel nahradit. Vysoká tvrdost na povrchu zvyšuje odolnost proti abrazivnímu opotřebení, ale ve středu odlitků si ocel zachovává dostatečnou houževnatost, aby odolala i vysokým rázovým namáháním.

V budoucnu není příliš pravděpodobné, že by došlo k výrazné změně složení manganové oceli a výzkum se v posledních letech zaměřuje spíše na zdokonalení výroby a studiu metod deformačního zpevnění. V tomto ohledu se nejvíce výzkumů věnuje zpevňování výbuchem, jako metodě, která má největší vliv na zpevnění a zlepšení vlastností této oceli. Hledají se nové způsoby jak dosáhnout co největšího zpevnění v povrchových vrstvách při zachování charakteristických vlastností manganové oceli.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. FREMUNT, P.; PODRÁBSKÝ, T. *Konstrukční oceli*. Brno: CERM, 1996, 261 s. ISBN 80-858-6795-8
2. GRACE'S GUIDE. *Grace's guide to british industrial history* [online]. 2017 [cit. 2017-04-10]. Dostupné také z: <[http://www.gracesguide.co.uk/Robert\\_Hadfield](http://www.gracesguide.co.uk/Robert_Hadfield)>
3. HADFIELD, R. A., FORREST, J. *Manganese-steel : I. manganese in its application to metallurgy : II. some newly-discovered properties of iron and manganese*, London: Published by the Institution, 1888. Dostupné také z: <<https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=hvd.hb1nx6;view=1up;seq=12>>
4. APONBIEDE, O., SHEDU, U. An Overview of Hadfield Steel for Rail Network and Allied Structural Applications. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences*, 2010, vol. 1, no. 2, p. 174-177. ISSN 2141-7016. Dostupné také z: <<https://jeteas.scholarlinkresearch.com/articles/An%20Overview%20of%20Hadfield%20Steel%20for%20Rail%20Network%20and%20Allied%20Structural%20Applications.pdf>>
5. HADFIELD, R. A., *Manganese-steel rails*, Philadelphia: American Institute of Mining Engineering, 1914. Dostupné také z: <<https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=osu.32435009088584;view=1up;seq=2>>
6. RUSÍN, K. *Přehled o lité vysoce manganové oceli*. Slévárenství, 2015, roč. LXIII, č. 3-4, s. 138. ISSN 0037-6825.
7. ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE: *ASM Handbook, Volume 1 - Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, Austenitic Manganese Steels*. ASM International, 1990. ISBN 978-0-87170-377-4.
8. ŠENBERGER, J., BŮŽEK, Z., ZÁDĚRA, A., STRÁNSKÝ, K., KAFKA, V. *Metalurgie oceli na odlitky*. 1. vyd., Brno, VUTIUM, 2008. ISBN 978-80-214-3632-9.
9. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu*. 2. opr. a rozš. vyd., Brno: CERM, 392 s. ISBN 80-7204-248-32
10. SIMPSON, B., *Olivine sand and the FENOTEC binder process for the production of manganese steel castings at Metso Steel Foundry*. *Foundry Trade Journal International*, 2015, Volume 189, No. 3728, p. 282-285.
11. RYŠ, P., JENÍK, J. *Nauka o materiálu II.*, ACADEMIA, Praha, 1978
12. RUSÍN, K. *Hadfieldova ocel pro otěruvzdorné aplikace bez tepelného zpracování* [Zkrácený překlad článku z časopisu *Prace Instytutu Odlewnictwa*, 2014, č. 2, s. 23-36]. *Slévárenství*, 2015, roč. LXIII, č. 1-2, s. 50-51. ISSN 0037-6825.
13. REOCITIES.COM/COLLEGE/PARK/LAB/9253/ , C-Fe-Mn (Carbon-Iron-Manganese), [online], [cit. 2017-04-20]. Dostupné také z: <<http://www.reocities.com/collegepark/lab/9253/Fe-C-Mn.JPG>>

14. RUSŇÁK, Z., aj.: Giesserei Praxis, 1979, č.21, s.415-420.
15. SRIVASTAVA, Ashok a Karabi DAS. Microstructural characterization of Hadfield austenitic manganese steel. Journal of Materials Science [online]. 2008, 43(16), 5654-5658 [cit. 2017-04-08]. DOI: 10.1007/s10853-008-2759-y. ISSN 00222461.
16. AVERY, H.S., “Austenitic Manganese Steel for Railway Trackwork”, Case Report Number 429-12, Abex Corporation Research Center, Mahwah, New Jersey, September 1981, 39 pp
17. AGUNSOYE, J.O., TALABI, S.I., ABIONA, A.A. (2013). On the comparison of microstructure characteristics and mechanical properties of high chromium white iron with the hadfield austenitic manganese steel, Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, Vol. 1, 24-28, doi:10.4236/jmmce.2013.11005
18. AVERY, H. S. (1949). The metallurgical background for welding austenitic manganese steel. New York: American Manganese Steel Division of the American Brake Shoe Co.
19. WEN, Y.H., H.B. PENG, H.T. SI, R.L. XIONG a D. RAABE. A novel high manganese austenitic steel with higher work hardening capacity and much lower impact deformation than Hadfield manganese steel. Materials. 2014, 55, 798-804 [cit. 2017-04-09]. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.09.057. ISSN 02613069.
20. XIAOYUN, Li, Wu WEI, Zu FANGQIU, Liu LANJUN a Zhang XIANFENG. Influence of impact energy on work hardening ability of austenitic manganese steel and its mechanism. China Foundry. 2012, 9(3), 248-251 [cit. 2017-04-09]. ISSN 16726421.
21. HU, Xiaoyan, Zhaowu SHEN, Yingbin LIU, Tiansheng LIU a Fengying WANG. Influence of explosive density on mechanical properties of high manganese steel explosion hardened. Journal of Applied Physics [online]. 2013, 114(21), 213507-213511 [cit. 2017-05-17]. DOI: 10.1063/1.4837617. ISSN 00218979. Dostupné z: <<http://www.tandfonline.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/doi/pdf/10.1179/174328408X363263?needAccess=true>>
22. PREPARED BY AWS D15 COMMITTEE ON RAILROAD WELDING, under direction of AWS Technical Activities Committee a APPROVED BY AWS BOARD OF DIRECTORS. Recommended practices for the welding of rails and related rail components for use by rail vehicles. Third edition. American Welding Society (AWS), 2013. ISBN 9781628701159. Dostupné online z: <<http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpRPWRRRC4/recommended-practices/recommended-practices>>
23. CURIEL-REYNA, E., A. HERRERA, V. M. CASTAÑO a M. E. RODRIGUEZ. Influence of Cooling Rate on the Structure of Heat Affected Zone After Welding a High Manganese Steel. Materials [online]. 2005, 20(5), 813-822 [cit. 2017-04-05]. DOI: 10.1081/AMP-200055142. ISSN 10426914.

24. O'BRIEN, Annette. *Welding handbook*. 9th ed. Miami, FL: American Welding Society, 2011. ISBN 9781613445372.
25. SHILPA ALLOYS PVT. LTD. Manganese Steel Castings [online]. 2017 [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: <<http://www.grindingmediaballs.com/manganese-steel-castings.html>>
26. LEMON CASTINGS. Manganese Steel Castings [online]. 2017 [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: <[http://www.lemoncastingsinc.com/manganese\\_steel\\_casting.html](http://www.lemoncastingsinc.com/manganese_steel_casting.html)>
27. TULSA METAL FINISHING COMPANY. Manganese Phosphate [online]. 2017 [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: <<http://www.tulsametalfinishing.com/manganese-phosphate/>>
28. METSO. *Nordberg® C Series™ jaw crushers* [online]. 2017 [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: <<http://www.metso.com/products/jaw-crushers/jaw-crusher-nordberg-c/>>
29. MITHILA. Manganese Steel Castings [online]. 2017 [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: <<http://www.mithilamalleables.com/pro-mang.html>>
30. SLÉVÁRNA CHOMUTOV. *Abrazivzdorné odlitky* [online]. 2017 [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: <<http://www.slevarnachomutov.cz/produkty-a-sluzby/odlitky/abrazivzdorne/>>
31. UNITRAC Railroad Materials Inc.: New, Relay-Reconditioned Frogs and Frog Accessories. In: *Progressive railroading* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <<http://www.progressiverailroading.com/railproducts/product.aspx?id=4863>>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
t	Tuna	[-]
HB	Tvrдость podle Brinella	[-]
HV	Tvrдость podle Vickerse	[-]
m	Hmotnost	[kg]
pH	Vodíkový exponent	[-]
$\gamma$	Intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe	[-]
$R_m$	Mez pevnosti	[Mpa]
$R_{p0,2}$	Mez kluzu	[Mpa]
$R_{FR}$	Lomové napětí	[Mpa]
KCU	Vrubová houževnatost	[J.cm <sup>-2</sup> ]
$\epsilon_{max}$	Prodloužení	[%]
F	Síla	[N]
$A_{c1}$	Překryštalizační teplota	[-]
$A_{cm}$	Teplota počátku přeměny na sekundární cementit	[-]
t	Čas	[s]
$\alpha$ -Fe	Ferit	[-]
$M_3C$	Karbid	[-]



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2 Porovnání odebraného materiálu při vrtání manganové oceli a běžné uhlíkové oceli [5]	9
Obr. 2 Části lžic bagrů [26]	10
Obr. 3 Fragmenty kladiv [26]	10
Obr. 4 Ozubené kolo [27]	10
Obr. 5 Drtící čelisti [26]	11
Obr. 6 Drtící konkáva [26]	11
Obr. 7 Drtič horniny [28]	11
Obr. 8 Drtící kroužek [29]	11
Obr. 9 Fragmenty řetězu [29]	11
Obr. 10 Drtící válce [29]	12
Obr. 11 Schéma válcového drtiče horniny [29]	12
Obr. 12 Schéma elektrické obloukové pece [8]	13
Obr. 13 Detailní snímek struktury a velikosti zrna olivínové písku [10]	15
Obr. 14 Železniční srdcovka [31]	16
Obr. 15 Rozpustnost uhlíku v oceli [7]	19
Obr. 16 Mez kluzu a pevnost v tahu v závislosti na obsahu manganu [7]	20
Obr. 17 Závislost prodloužení na obsahu manganu [7]	20
Obr. 18 Závislost vrubové houževnatosti manganové oceli na obsahu hliníku, chromu a křemíku [7]	21
Obr. 19 Závislost meze kluzu a pevnosti v tahu na obsahu molybdenu v manganové oceli [7]	22
Obr. 20 Závislost prodloužení na obsahu molybdenu [7]	22
Obr. 21 Závislost meze kluzu a pevnosti v tahu na obsahu niklu v manganové oceli [7]	23
Obr. 22 Závislost prodloužení na obsahu niklu [7]	24
Obr. 23 Struktura manganové oceli po odlití, 100x zvětšeno [18]	25
Obr. 24 Manganová ocel po tepelném zpracování, zrna jsou tvořena téměř výhradně austenitem, 100x zvětšeno [18]	26
Obr. 25 Křivky chladnutí pro různé tloušťky odlitků	26
Obr. 26 Vertikální řez diagramem Fe-C-Mn při obsahu 13 % manganu [1]	27
Obr. 27 Řez diagramem Fe-C-Mn při 13 % obsahu manganu	28
Obr. 28 Mikrostruktura manganové oceli, síťoví z karbidů a $\alpha$ -feritů [15]	29
Obr. 29 Detail s lepším rozlišením karbidové sítě z předchozího obrázku [15]	29
Obr. 30 Struktura po žihání. Tenká vrstva $\alpha$ -martenzitu na povrchu [15]	29
Obr. 31 Struktura po odstranění povrchové dekarbonizované vrstvy [15]	30
Obr. 32 Graf zobrazující závislost tvrdosti na vzdálenosti od povrchu [15]	31
Obr. 33 Závislost mechanických vlastností manganových ocelí na teplotě [1]	32
Obr. 34 Detailní snímek vrubu po testu tvrdosti [17]	33
Obr. 35 Struktura manganové oceli po deformačním zpevnění [19]	34
Obr. 36 Tvrdost u manganové a chrom-nikl-molybdenové oceli v závislosti na počtu úderů kladiva [7]	35
Obr. 37 Schéma zařízení na deformační zpevnění [20]	36
Obr. 38 Závislost tvrdosti na počtu úderů kladivem [20]	37
Obr. 39 Mikrostruktura vzorků (a) pro nárazovou energii [20]	37
Obr. 40 Náčrt fragmentu srdcovky a vyznačených oblastí, kde bude použita výbušnina ke zpevnění [21]	38
Obr. 41 Nákres deformace manganové oceli před (a) a po zpevnění výbuchem (b) [21]	38
Obr. 42 Porovnání tvrdosti při opakování výbuchu a vliv na zpevnění do hloubky [21]	39

Obr. 43 Porovnání vlivu tloušťky použité trhaviny na tvrdost a hloubku vytvrzené oblasti [21] .....	39
Obr. 44 Mez kluzu v závislosti na tvrdosti ocele [21] .....	40
Obr. 45 Vrubová houževnatost v závislosti na tvrdosti [21].....	40
Obr. 46 Mikrostruktura vzorku bez zpevňování výbuchem (a), zpevnění jedním výbuchem s tloušťkou trhaviny 3 mm (b), dvěma výbuchy s tloušťkou trhaviny 3 mm (c) a jedním výbuchem s tloušťkou trhaviny 5 mm (d) [21] .....	41
Obr. 47 Příčný a podélný řez svařovaného vzorku [21].....	42

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Typické chemické složení olivínového písku[10] .....	14
Tab. 2 Ukázka spotřeby písků za roky 2013 a 2014 [10].....	16
Tab. 3 Chemické složení manganové oceli dle některých norem. [1], [7], [8], [30] .....	18
Tab. 4 Výsledky testu tvrdosti [17].....	32
Tab. 5 Chemické složení použitých ocelí [7].....	35
Tab. 6 Chemické složení vzorků [20] .....	36