



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA, STRUKTURA, VLASTNOSTI A POUŽITÍ MARTENZITICKÝCH KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ

PRODUCTION, STRUCTURE, MECHANICAL PROPERTIES AND USAGE OF MARTENSITIC STAINLESS
STEELS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Zíka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Blažík

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Marek Zíka**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Petr Blažík**
Akademický rok: 2017/18

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, struktura, vlastnosti a použití martenzitických korozivzdorných ocelí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Korozivzdorné martenzitické oceli mají nezastupitelnou roli mezi slitinami železa především díky svojí odolnosti proti korozi. Dnešní trh nabízí několik typů těchto slitin, které se navzájem liší chemickým složením a tím i svými mechanickými vlastnostmi, strukturou i jejich použitím.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je popsat problematiku výroby martenzitických korozivzdorných ocelí, jejich strukturu, vlastnosti a použití. A dále i jejich případné tepelné zpracování a k čemu se používá. V experimentální části bude provedeno srovnání vlivu chromitového písku na povrchovou strukturu odlitku.

Seznam doporučené literatury:

TURKDOGAN, E.T. Fundamentals of Steelmaking. Cambridge: The Institute of Materials, 1996. ISBN 18-612-5004-5.

ŠENBERGER, J. Metalurgie oceli na odlitky. V Brně: VUTIUM, c2008. ISBN 978-80-214-3632-9.

RÖRING, K.: International steel casting symposium, 22. 10. – 23. 10 1992 Linz, Vöst Alpine Stahl Linz, sborník pp. 89–106.

LEVIČEK, P. a K. STRÁNSKÝ. Metalurgické vady ocelových odlitků: (příčiny a odstraňování). Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

ZÍKA Marek: Výroba, struktura, vlastnosti a použití martenzitických korozivzdorných ocelí

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou výroby, vlastnostmi a strukturou martenzitických korozivzdorných ocelí. Dále jsou v práci popsány způsoby tepelného zpracování, které výrazně zlepšuje vlastnosti ocelí, a použití těchto materiálů. V experimentální části je řešen vliv chromitového písku na povrchovou strukturu odlitku. Ze snímků struktury odlitých vzorků je patrné, že chromit na povrchovou strukturu vliv nemá.

Klíčová slova: martenzitická ocel, korozivzdorná ocel, chromit, tepelné zpracování

ABSTRACT

ZÍKA Marek: Production, structure, mechanical properties and usage of martensitic stainless steels

This bachelor thesis deals with issues of production, mechanical properties and structure of martensitic stainless steels. Further a thesis is focused on heat treatment, which significantly improves mechanical properties of steels, and usage of this materials. In experimental part is solved influence of chromite sand on surface structure cast. On the images of structure of casting samples can be seen, that the chromite doesn't have influence on surface structure.

Keywords: martensitic steel, stainless steel, chromite, heat treatment

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZÍKA, Marek. *Výroba, struktura, vlastnosti a použití martenzitických korozivzdorných ocelí*. Brno, 2018. 30 s., CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor slévárenství. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Blažík.

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 22. 5. 2018

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Petru Blažíkovi za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále bych chtěl také poděkovat rodičům za všestrannou podporu během psaní této práce i celého studia.

OBSAH

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	
ÚVOD	9
1 VLASTNOSTI A STRUKTURA MARTENZITICKÝCH OCELÍ	10
1.1 Tvrdost a houževnatost	11
1.2 Korozivzdornost	13
1.3 Svařitelnost	14
1.4 Tepelné zpracování	15
1.4.1 Žihání	15
1.4.2 Kalení.....	15
1.4.3 Popouštění.....	17
2 VÝROBA MARTENZITICKÝCH KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ	18
2.1 Tavba oceli v zásaditých obloukových pecích	19
2.2 Tavba oceli v indukčních pecích	21
2.2.1 Kelímkové indukční pece	22
2.3 Vady v odlitcích	22
3 ROZDĚLENÍ MARTENZITICKÝCH KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ	24
3.1 Použití martenzitických korozivzdorných ocelí	24
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	25
4.1 Cíl experimentu	25
4.2 Formování	25
4.3 Tavení a odlévání	26
4.4 Zpracování vzorků	27
4.5 Hodnocení experimentu	27
5 ZÁVĚRY	30
Seznam použitých zdrojů	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	

ÚVOD [1]

Ocel se používá již spoustu staletí a ani v dnešní době moderních materiálů ji nelze nahradit. Tento fakt vedl lidstvo ke snaze o zlepšení jejich nepříznivých vlastností. Jednou z nich je podléhání korozi, což je děj, při kterém dochází k narušení povrchu kovu chemickými nebo elektrochemickými reakcemi.

Korozivzdorné oceli nemají dlouhou historii. První zástupce těchto ocelí byl patentován v sedmdesátých letech 19. století v Anglii. V Česku se tyto materiály začaly vyrábět počátkem minulého století firmou huť Poldi pod názvem Anticoro. Velký rozvoj těchto materiálů přišel s nástupem elektrických pecí.

V současnosti existuje několik skupin korozivzdorných ocelí obsahujících spoustu značek. Při výběru značky oceli je nutné brát ohled na provozní teplotu, tlak, prostředí a také na požadované mechanické vlastnosti. Jednou z těchto skupin materiálů jsou martenzitické korozivzdorné oceli.

V první části bakalářské práce jsou popsány vlastnosti martenzitických korozivzdorných ocelí zahrnující tvrdost, korozivzdornost, jejich svařitelnost a také tepelné zpracování. Dále je v práci řešena problematika výroby těchto materiálů v elektrických pecích, včetně vad odlitků, které jsou neoddělitelnou částí výroby. Třetí část je věnována rozdělení martenzitických korozivzdorných ocelí dle jejich chemického složení, vlastností a použití těchto materiálů v praxi. V závěru práce je řešena experimentální část spočívající v porovnání vlivu chromitového ostřiva na výslednou povrchovou strukturu odlitků.

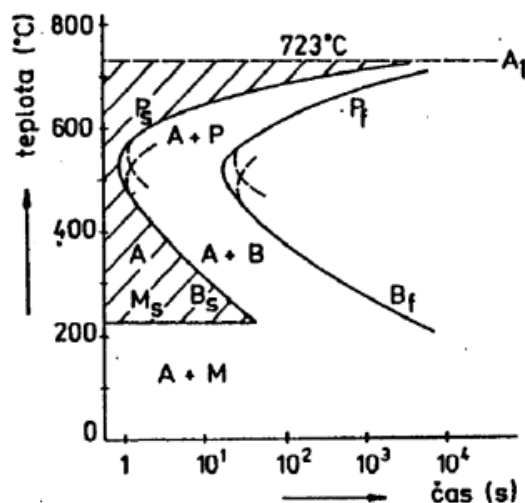
1 VLASTNOSTI A STRUKTURA MARTENZITICKÝCH OCELÍ [1], [2], [3], [4], [5]

Martenzitická struktura vzniká pomocí martenzitické přeměny, tzv. martenzitickou bezdifuzní přeměnou, kdy se výchozí austenitická struktura při velkém přechlazení do nízkých teplot mění na martenzit. Výška této teploty se snižuje s narůstajícím množstvím legur, zejména uhlíku. Tato teplota se v literatuře [2] označuje jako martenzit start (M_s) a její hodnota lze spočítat z následujícího vzorce:

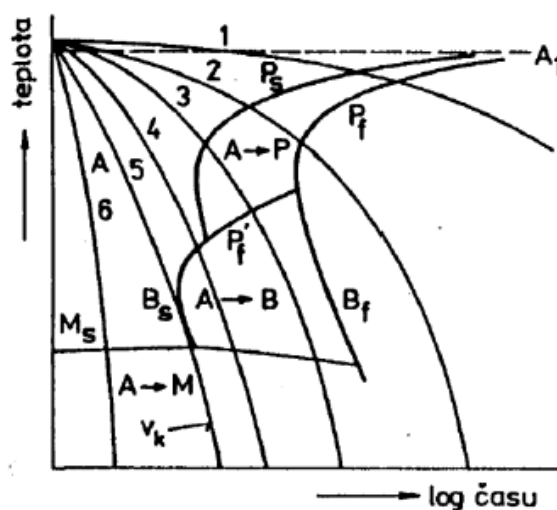
$$M_s[^\circ\text{C}] = 500 - 300 C - 35 Mn - 20 Cr - 15 Ni - 10 Si - 10 Mo \dots \quad (1.1)$$

kde koncentrace jednotlivých legur jsou uváděny v hmotnostních procentech.

Pro většinu ocelí bývá teplota začátku martenzitické přeměny okolo 300°C . Austenit (tvořen gama železem) obsahuje větší množství uhlíku, než je v běžném alfa železe. V těchto nízkých teplotách již není možná difuze atomů uhlíku, pouze se přesouvají atomy železa o vzdálenosti podílu mřížkového parametru. Uhlík se tedy nemůže vyloučit a vzniká nerovnovážený tuhý roztok uhlíku v alfa železe. Martenzitická ocel vznikne, pokud je ochlazena pod teplotu M_s v čase, který je kratší než doba zahájení bainitické a perlitické přeměny. Tyto doby můžeme vyčíst z IRA a ARA diagramů na obr. 1 a 2, které vykreslují teplotní a časovou závislost při různých přeměnách způsobené ochlazováním austenitu. Tyto diagramy mají význam při volbě teploty tepelného zpracování a rychlosti následného ochlazování, kdy z jejich pomoci lze určit výslednou strukturu. Pro každou značku oceli jsou tyto diagramy odlišné a obecně lze říci, že legury posouvají začátek perlitické a bainitické přeměny k delším časům, tzn. ARA diagram je více posunut doprava.



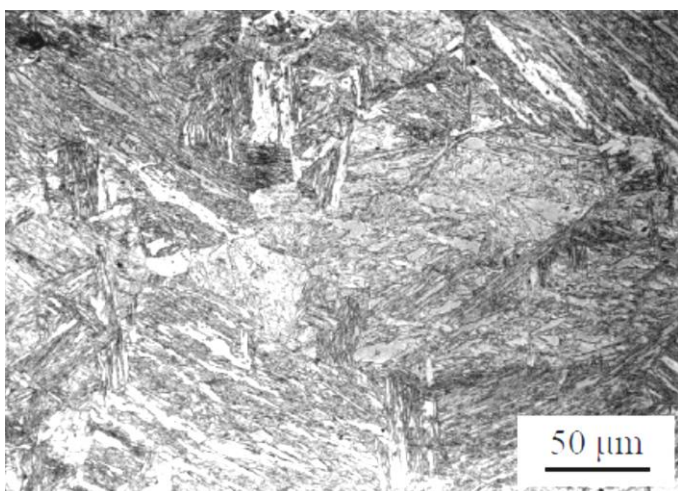
Obr. 1 IRA diagram [2]



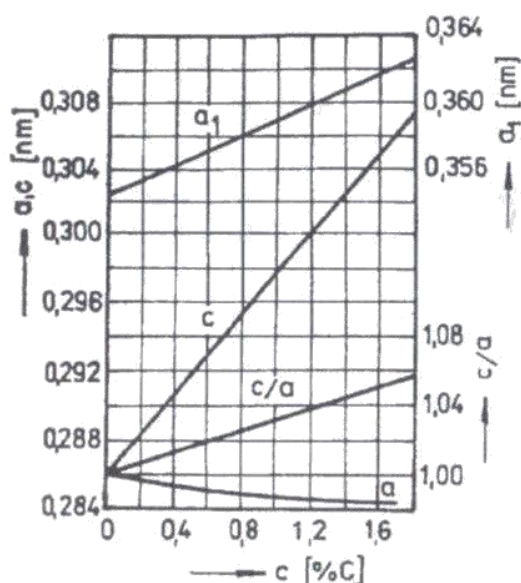
Obr. 2 ARA diagram [2]

Nejmenší potřebná rychlost, pro dosažení martenzitické struktury se nazývá kritická rychlost kalení v_k . Tato hodnota je ovlivněna chemickým složením oceli a strukturou austenitu.

Množství přeměněného martenzitu je závislé na přechlazení oceli, jehož maximální zastoupení v oceli nastává při teplotě M_f (martenzit finish). Pro stanovení této teploty neexistuje žádný vzorec a její hodnoty jsou určovány na základě praktických zkoušek. Velikost této teploty je obvykle 150-200 °C pod teplotou M_s . U většiny ocelí vznikne téměř ihned při ochlazení mezi teploty M_s a M_f daný obsah martenzitu. Rychlost této přeměny dosahuje rychlosti zvuku v oceli. Struktura oceli není nikdy tvořena pouhým martenzitem ani při teplotě M_f , z důvodů většího objemu martenzitických útvarů než zrn austenitu. Nepřeměněný austenit se označuje jako zbytkový austenit a jeho podíl ve struktuře se zvyšuje s rostoucím množstvím uhlíku. Struktura martenzitu je tvořena jehlicemi, viz obrázek 3.



Obr. 3 Martenzitická struktura [5]



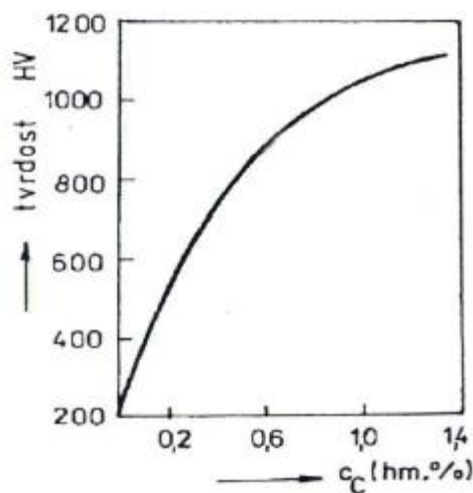
Obr. 4 Vliv uhlíku na parametry mřížky, a_1 -austenit, a, c -martenzit, c/a -tetragonalita martenzitu [2]

Při martenzitické přeměně také dochází ke změně krystalografické mřížky z kubické na tetragonální prostorově středěnou, v důsledku velkého přesycení uhlíkem, které má za následek velké vnitřní pnutí a deformaci mřížky. Ta je popsána dvěma mřížkovými parametry, a to výškou hranolu c a stranou hranolu a . Poměrem těchto parametrů c/a je definována tetragonalita martenzitu, kde parametr c , a tedy i tetragonalita se zvyšuje s rostoucím množstvím uhlíku v oceli. Závislost mřížkových parametrů a tetragonality na uhlíku je možno vidět na obr. 4. Můžeme jí pozorovat u uhlíkových ocelí, kde je omezen skluz dislokací a probíhá deformace dvojčatěním, v důsledku velkých vnitřních pnutí v mřížce (dvojčatový martenzit). U ocelí s obsahem uhlíku do 0,25 hm. % se tetragonalita příliš neprojevuje a deformace probíhá skluzem dislokací (dislokační martenzit).

1.1 Tvrdost a houževnatost [2], [4], [6], [7]

Typickou vlastností martenzitu je jeho vysoká tvrdost a nízká houževnatost, způsobena velkým vnitřním pnutím. Všechny martenzitické oceli mají v porovnání s výchozí austenitickou fází větší tvrdost, která se s narůstajícím obsahem uhlíku zvyšuje. Tato vlastnost je popsána třemi zpevňujícími mechanismy:

- Zpevnění tuhého roztoku, způsobené zejména intersticiálním uhlíkem, který je umístěn mezi atomy mřížky a způsobuje její pnutí. Vliv obsahu uhlíku na tvrdost je znázorněn na obr. 5.



Obr. 5 Vliv obsahu uhlíku na tvrdost martenzitu [2]

- Zpevnění způsobené hranicemi zrn, které představují nezdolatelnou překážku v pohybu dislokací. Poruchy mřížky se zde tedy hromadí, což vede ke zvýšení pevnosti materiálu. Pevnost oceli také ovlivňuje průměr zrn. Materiál s jemnými zrny má větší celkovou plochu hranic zrn a je tedy pevnější.
- Substrukturní zpevnění (dislokační a dvojčatový martenzit), kde dvojčatový martenzit dosahuje vyšších pevností vlivem velkých pnutí v mřížce souvisejících se zvětšením jejího objemu (tetragonalita).

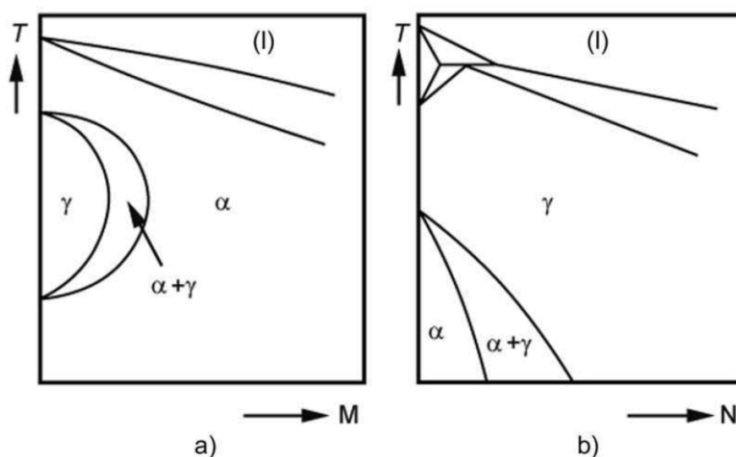
Tyto mechanismy spolu s vysokým vnitřním pnutím mají za následek nízké hodnoty nárazové práce martenzitu, která klesá s rostoucím obsahem uhlíku, kdy se zvyšuje množství dvojčatového martenzitu na úkor dislokačního, ve kterém je velmi omezena plastická deformace. To může mít za následek vznik kalících mikrotrhlin, vedoucích k lomu materiálu. Hodnoty mechanických vlastností vybraných martenzitických ocelí jsou uvedeny v tabulce 1, včetně teplot tepelného zpracování, které má na ně výrazný vliv.

Tab. 1 Mechanické vlastnosti a teploty tepelného zpracování martenzitických ocelí [6]

Označení		Tepelné zpracování		Mechanické vlastnosti			
značkou	číslem	Kalení	Popouštění	Zkouška tahem			Zk. rázem v ohybu
		[°C]	[°C]	min Rp0,2	min Rm	min A	min KV
				[MPa]	[MPa]	[%]	[J]
GX12Cr12	1.4011	950-1050	650-750	450	620	15	20
GX7CrNiMo12-1	1.4008	1000-1050	620-720	440	590	15	27
GX4CrNi13-4	1.4617	1000-1050	590-620	550	760	15	50
		1000-1050	500-530	830	900	12	35
		1000-1050	660-680 560-620	500	700	16	50
GX4CrNiMo16-5-1	1.4405	1020-1070	580-630	540	760	15	60
GX4CrNiMo16-5-2	1.4411	1020-1070	580-630	540	760	15	60
GX5CrNi16-4	1.4525	1020-1070	560-610	750	900	12	20
			460-500	1000	1100	5	-

1.2 Korozivzdornost [1], [2], [3], [4], [6], [8]

Je schopnost materiálu odolávat korozi za normální teploty, tak že vytvoří na povrchu vrstvu oxidů, která výrazně zpomaluje její průběh. Tento proces se nazývá pasivace. Aby se ochranná vrstva na slitině vytvořila, je nutné dodržet minimální hodnoty legujících prvků, které tuto schopnost ovlivňují, zejména chrom, jehož minimální hodnota v matici činí 11,5 %. Na odolnost vůči korozi mají pozitivní vliv i další legury, např. uhlík, nikl (snižuje korozi v redukčních kyselinách), molybden (vyšší odolnost proti bodové korozi), mangan, či měď a dusík. Ocel by se neměla legovat chromem těsně nad jeho minimální množství kvůli navázání uhlíku na chrom. Vznikající karbidy snižují obsah chromu v matici a způsobují snížení korozivzdornosti v daném místě a náchylnost materiálu na mezikrystalickou korozi, která vzniká zejména po svařování v místě sváru. Tomuto efektu lze zabránit snižováním množství uhlíku nebo legováním oceli prvky, které mají vyšší afinitu k uhlíku než k chromu, např. niobem, tantallem či titanem. Tento proces legování se označuje jako stabilizace oceli. Legující prvky oceli ovlivňují výslednou strukturu a dělí se na dvě skupiny, podle jejich vlivu na oblast γ , kterou mohou zužovat (feritotvorné prvky) nebo rozšiřovat (austenitotvorné prvky). Vliv těchto prvků je znázorněn v rovnovážných diagramech na obr. 6.



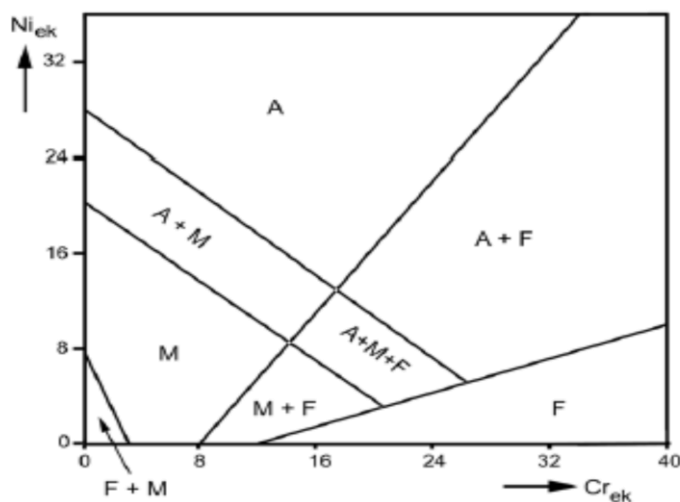
Obr. 6 Rovnovážné stavové diagramy železa [4]
a) feritotvorné prvky, kde $M = \text{Cr, W, Mo, Si, Al}$
b) austenitotvorné prvky, kde $N = \text{Ni, Mn, Co}$

Pro snazší popis účinků feritotvorných prvků byl zaveden ekvivalent chromu $Cr_{ek.}$, obdobně u austenitotvorných ekvivalent niklu $Ni_{ek.}$. Vzhledem k vysoké koncentraci chromu a niklu v martenzitických ocelích mají největší vliv na oblast γ . Jejich hodnoty se určují z následujících vztahů

$$Cr_{ek.} = \%Cr + \%Mo + 1,5 \cdot \%Si + 0,5 \cdot \%Nb \quad (1.2)$$

$$Ni_{ek.} = \%Ni + 0,5 \cdot \%Mn + 30 \cdot \%C + 30 \cdot \%N \quad (1.3)$$

Tyto ekvivalenty slouží k určení výsledné struktury v závislosti na jejím chemickém složení pomocí Schaefflerova diagramu (určuje strukturu oceli v litém stavu), viz obr. 7.



Obr. 7 Schaefflerův diagram [4]

Podle diagramu můžeme korozivzdorné oceli rozdělit na několik skupin, z nichž mezi nejvýznamnější patří:

- Martenzitické
- Feritické
- Austenitické
- Austeniticko-feritické (duplexní)

Do prostředí s korozně agresivními podmínkami je požadována odolnost vůči důlkové korozi, kterou ovlivňuje množství legujících prvků. Tento druh koroze je popsán pomocí ekvivalentu PRE z anglického názvu Pitting Resistance Equivalent. V zahraniční literatuře [3], [8] se také můžeme setkat s označením tohoto ekvivalentu jako PREN (Pitting Resistance Equivalent Number) a jeho hodnota se nejčastěji počítá ze vztahu:

$$PRE = \%Cr + 3,3 \cdot \%Mo + 16 \cdot \%N \quad (1.4)$$

Na odolnost oceli proti důlkové korozi má velký vliv wolfram a pro oceli legované tímto prvkem lze vzorec rozšířit na:

$$PRE = \%Cr + 3,3 \cdot (\%Mo + 0,5 \cdot \%W) + 16 \cdot \%N \quad (1.5)$$

Z výše uvedených skupin korozivzdorných ocelí dosahují martenzitické nejmenších hodnot ($PRE = 10 - 23$). Nejlepší korozivzdornosti se dosahuje u duplexních ocelí, kde se hodnoty PRE pohybují mezi 22-37.

1.3 Svařitelnost [3], [9], [10]

Je vlastnost oceli závislá především na chemickém složení slitiny. Největší negativní vliv má uhlík, kdy jeho hraniční koncentrace pro svařitelnost bez přehřevu je 0,22 %. Vzhledem k vysokým tvrdostem jsou martenzitické oceli náchylné k lomu v tepelně ovlivněné oblasti při chladnutí sváru. Pro zabránění porušení materiálu je vhodné omezit kontakt sváru s vodíkem, a také je doporučeno svařování s přehřevem 200-300 °C již pro oceli obsahující 0,1 % uhlíku. Martenzitické oceli o obsahu 0,4 % uhlíku a vyšší není doporučeno svařovat. Pro svařování těchto materiálů je vhodné použít ochranu atmosféru neobsahující dusík, který při tuhnutí snižuje množství delta feritu ve struktuře. Malé množství delta feritu zmenšuje náchylnost k

lomu za tepla a příliš neovlivňuje mechanické vlastnosti svaru. Kromě uhlíku mají na svařitelnost vliv i další legury, zejména chrom, molybden, bor, měď či nikl. Zároveň se doporučuje materiál po svařování popouštět pro zvýšení houževnatosti v teplem ovlivněné oblasti a pro snížení vnitřního pnutí ve svaru. Pro vysokolegované korozivzdorné oceli se převážně používají metody WIG, případně MIG.

1.4 Tepelné zpracování [1], [2], [4]

Jedná se o procesy, kterými můžeme docílit výrazné zlepšení vlastností oceli (tvrdost, tažnost, houževnatost a další) využitím přeměn struktury a fází. Princip spočívá v ohřevu slitin železa na danou teplotu a její udržení po určitou dobu, aby se docílilo požadované přeměny. Důležitým faktorem je také způsob ochlazování oceli. Při tepelném zpracování se berou v úvahu také rozměry a struktura odlitku, aby v případě vysokých vnitřních pnutí v materiálu nevznikly trhliny, jejichž šíření by vedlo k lomu. Mezi hlavní druhy tepelného zpracování patří žihání, kalení či popouštění, kde každý z uvedených způsobů zahrnuje několik konkrétních typů.

1.4.1 Žihání [1], [2]

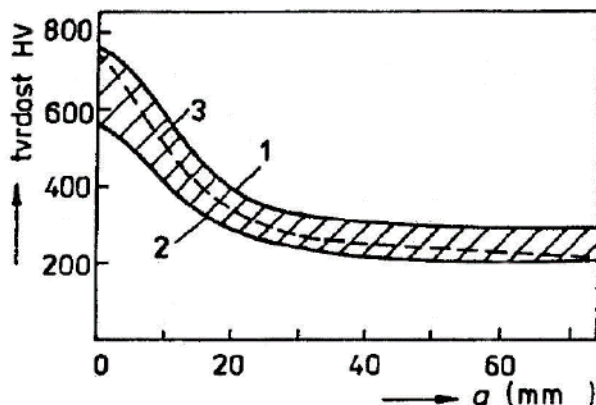
Pro tento způsob tepelného zpracování je typické pomalé ochlazování v pecích či na vzduchu. Cílem žihání je přiblížení struktury rovnovážnému stavu, čímž ocel získá lepší houževnatost za současného snížení tvrdosti, zlepšení obrobitelnosti, snížení heterogenity či vnitřních pnutí. Pro martenzitické korozivzdorné oceli se nejčastěji využívají tyto typy žihání:

- Žihání na měkko – se provádí při 600-720 °C s výdrží na teplotě okolo 4 hodin a pomalým ochlazováním. Při tomto procesu se lamelární perlitický cementit mění na globulární, což je doprovázeno výrazným snížením tvrdosti, a tím se zlepšuje obrobitelnost martenzitických odlitků.
- Homogenizační žihání – se provádí z důvodů snížení heterogenity chemického složení způsobeného při tuhnutí odlitku. Toho se docílí pomocí difuze, kdy se místně vyrovnává chemické složení. Z těchto důvodů jsou požadovány vysoké teploty, v rozmezí 1100-1250 °C a také dlouhá výdrž na této teplotě (většinou 5-15 hodin) kvůli pomalému průběhu difuze. Při delší výdrži na vysoké teplotě může dojít k zhrubnutí zrna. Hrubé zrna je u ocelí nežádoucí a souvisí se zhoršením mechanických vlastností. Zhrubnuté zrna lze odstranit rekrystalizačním žiháním, případně tvářením za tepla. Homogenizační žihání se provádí zpravidla jen u chromových martenzitických ocelí. U chromniklových odlitků je difuzní rychlost niklu velmi malá a nemá výrazný vliv na strukturu ani vlastnosti i při delším setrvání na žihací teplotě.

1.4.2 Kalení [1], [2], [11]

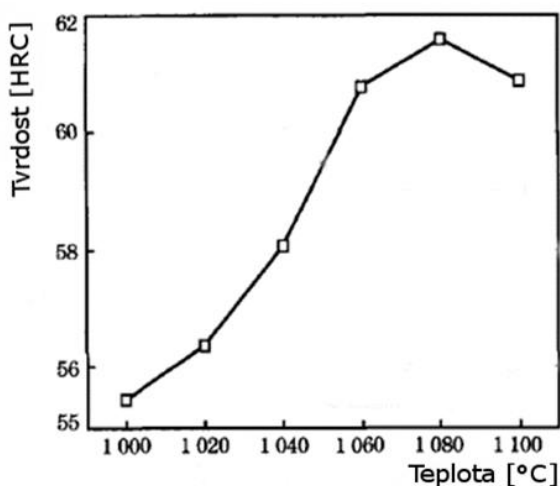
Smyslem kalení je naopak snaha o získání nerovnovážného stavu oceli. Tento děj můžeme členit na dvě základní skupiny, a to kalení bainitické a martenzitické, které je používanější. Oceli používané při kalení se označují jako kalitelné. Dalším důležitým pojmem souvisejícím s kalením je zakalitelnost, která udává výslednou tvrdost zakalené oceli. Její nejvyšší možná velikost odpovídá tvrdosti martenzitu, která se zvětšuje s rostoucí koncentrací uhlíku v oceli. Tvrdost zakalené oceli není v průřezu součásti konstantní, ale mění se s její hloubkou, kdy na povrchu můžeme naměřit podstatně vyšší hodnoty než v jádru. Hloubku zakalení oceli na požadovanou tvrdost značíme jako prokalitelnost, která se vyhodnocuje pomocí Jominyho zkoušky prokalitelnosti. Ta probíhá ohřevem válečku o průměru 25 mm a délce 100 mm a následným chlazením spodní podstavky válce vodou. Poté se na spodní části válečku obrousí dva proužky a změří se tvrdosti v určitých vzdálenostech od čela válečku. Výsledné hodnoty se pak vynesou do grafu a sestrojí se křivka prokalitelnosti. Z důvodu nepatrných odlišností

v chemickém složení oceli stejné značky při odlišných tavných se křivky prokalitelnosti zcela neshodují. Pro přesné vyhodnocení provedeného kalení byl zaveden interval přípustných tvrdostí v závislosti na hloubce. Tento interval se nazývá pás prokalitelnosti, viz obr. 8.



Obr. 8 Pás prokalitelnosti [2],
1,2 – hranice pásu prokalitelnosti, 3- křivka prokalitelnosti

Volba kalící teploty má výrazný vliv na mechanické vlastnosti oceli, např. tvrdost oceli se zvětšuje s rostoucí kalící teplotou (do 1080 °C), což je způsobeno rozpuštěním karbidů. Uvolněný uhlík se následně přemístí do intersticiální polohy mřížky martenzitu, čímž dochází k navýšení tvrdosti. Pokles tvrdosti nastává při kalení nad teplotu 1080 °C, kdy ve struktuře narůstá podíl zbytkového austenitu. Tvrdost oceli v závislosti na kalící teplotě je znázorněna na obr. 9.



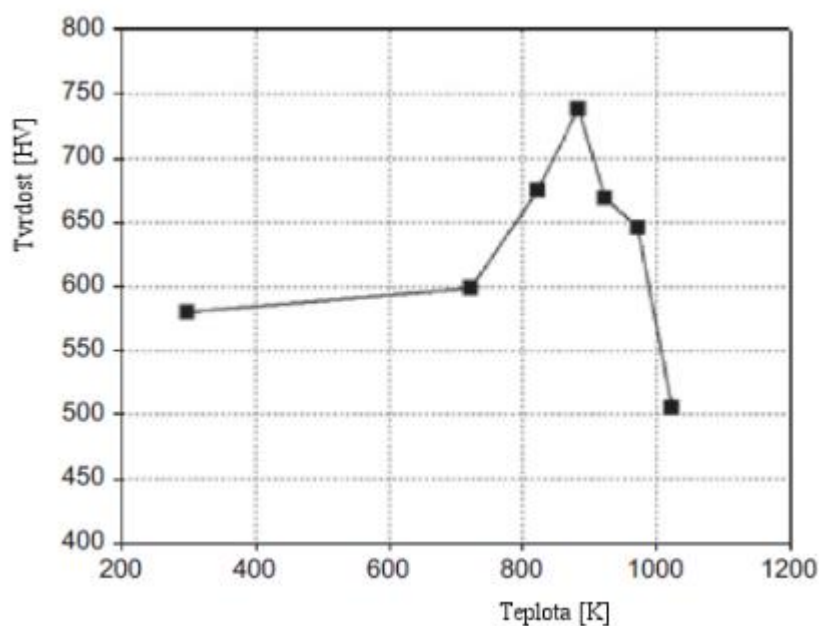
Obr. 9 Vliv kalící teploty na tvrdost oceli [11]

Aby v oceli vznikla martenzitická struktura je nutné její rychlé ochlazení nadkritickou rychlostí. Při rychlém ochlazení oceli narůstá velikost vnitřních pnutí. Je tedy nutné volit vhodné kalící prostředí, nejčastěji voda, olej a vzduch. Při kalení do kapalných látek je nutné kovem pohybovat kvůli eliminaci plynů z odpařované kapaliny, tzv. parních polštářů. Pro legované oceli se upřednostňuje kalení do oleje kvůli nižším hodnotám vnitřních pnutí. Nejpomalejší kalícím prostředím je vzduch využívaný pro kalení vysokolegovaných ocelí (samokalitelné). Legury těchto ocelí posouvají začátek bainitické a perlitické přeměny k delším časům, tedy i pomalým chladnutím vzniká ve struktuře martenzit. Ochlazování probíhá až pod teplotu M_f pro získání největšího možného podílu martenzitu ve struktuře.

1.4.3 Popouštění [1], [2], [12], [13]

Tento typ tepelného zpracování spočívá v ohřevu na malou teplotu (pod A_1), výdrži na teplotě okolo dvou hodin a rychlého ochlazení. Smyslem popouštění je zvýšit houževnatost oceli na úkor mírného poklesu pevnosti materiálu. Popouštění by mělo být provedeno co nejdříve po kalení, při kterém vzrůstá úroveň vnitřních pnutí v odlitku a může vést k jeho popraskání. Pro jejich snížení se volí popouštění při nižších teplotách, okolo 100-300 °C (vysokolegované oceli i 600 °C), kdy také dochází ke snížení koncentrace zbytkového austenitu. Vyšších teplot (400-650 °C) se využívá pro zlepšení houževnatosti a tvárnosti na úkor tvrdosti. Při popouštění je potřebné se vyhnout určitým teplotním intervalům, při kterých se projevuje popouštěcí křehkost, tedy výrazný pokles houževnatosti. První interval se nachází při teplotách 350-450 °C (nízkoteplotní popouštěcí křehkost). Tento druh křehkosti je neodstranitelný a je tedy nutné se těmito teplotám vyhnout, popřípadě ochlazovat ocel velmi rychle při popouštění z vyšších teplot. Druhým typem je vysokoteplotní popouštěcí křehkost při teplotách okolo 500-550 °C. Tento druh křehkosti je odstranitelný pomocí dalšího kalení a popouštění se změnou podmínek. Její výskyt lze také omezit přítomností určitých legur v oceli, zejména molybdenu. U martenzitických ocelí legovaných niklem je možné zlepšit houževnatost a plastické vlastnosti provedením dvojitého popouštění.

U ocelí s vyšším množstvím karbidotvorných prvků (vanad, molybden, wolfram, chrom) může dojít při popouštění nad 550 °C k výraznému navýšení pevnosti vlivem precipitace karbidů. Tento jev se nazývá sekundární tvrdost. Jak je patrné z obr. 10 tvrdost při této teplotě může nabývat větších hodnot než po kalení.



Obr. 10 Navýšení tvrdosti oceli při popouštění vlivem precipitace karbidů [13]

2 VÝROBA MARTENZITICKÝCH KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ [6], [14]

Tyto oceli patří mezi vysokolegované, tedy obsahují více než 5 % legujících prvků. Některé legury, hlavně chrom, mangan a nikl, dávají materiálu speciální vlastnosti zejména korozivzdornost, větší houževnatost při malých teplotách a další. Při jejich výrobě je nutné snížit koncentraci uhlíku oxidací taveniny při minimálním úbytku chromu, což závisí na způsobu tavení, např. u obloukových pecí probíhá nauhličení pomocí grafitových elektrod, které se v průběhu procesu zmenšují. Dalším prvkem, který má negativní vliv na odolnost vůči korozi je fosfor. Tento prvek při vyšší koncentraci chromu v oceli téměř nelze vyloučit, a proto je nutné hlídat chemické složení vsázky. V níže uvedené tabulce jsou vybrané martenzitické korozivzdorné oceli včetně chemického složení.

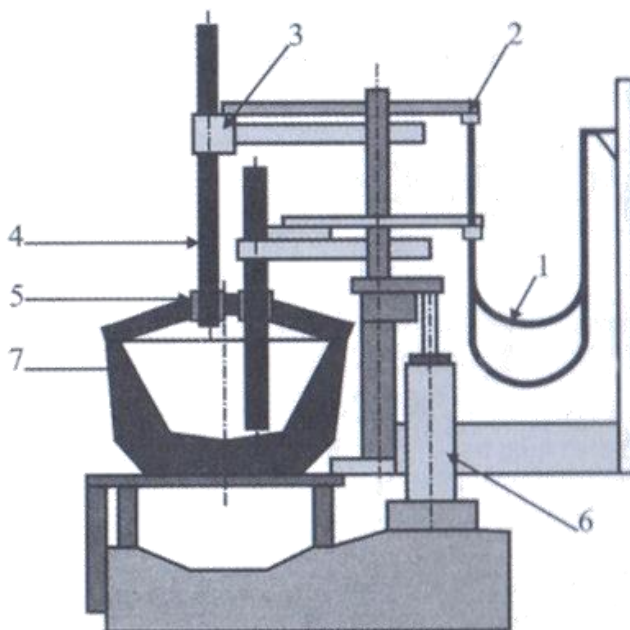
Tab. 2 Chemické složení martenzitických korozivzdorných ocelí [6]

Označení		Chemické složení v hmotnostních %								
značkou	číslem	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
		max	max	max	max	max				
GX12Cr12	1.4011	0,15	1	1	0,035	0,025	11,5 13,5	max 0,5	max 1	
GX7CrNiMo12-1	1.4008	0,1	1	1	0,035	0,025	12 13,5	0,2 0,5	1 2	
GX4CrNi13-4	1.4617	0,06	1	1	0,035	0,025	12 13,5	max 0,7	3,5 5	
GX4CrNiMo16-5-1	1.4405	0,06	0,8	1	0,035	0,025	15 17	0,7 1,5	4 6	
GX4CrNiMo16-5-2	1.4411	0,06	0,8	1	0,035	0,025	15 17	1,5 2	4 6	
GX5CrNi16-4	1.4525	0,07	0,8	1	0,035	0,025	15 17	max 0,8	3,5 5,5	2,5 4

Výroba ocelí probíhá v pecích, mezi nejpoužívanější v průmyslu patří elektrické obloukové, indukční a Siemensovy-Martinovy pece, kde každá z nich může být opatřena kyselou nebo zásaditou vyzdívkou, která má značný vliv na výrobu oceli a na náklady spojené s jejím tavením. Zásadité pece mají oproti kyselým výhodu možnosti regulace metalurgických reakcí navzdory větším výrobním nákladům, až o 20 %. Největším negativem kyselých vyzdívek je nemožnost odstranění síry a fosforu z taveniny při únosných výdajích, což omezuje její použití na nelegované, popřípadě nízkolegované oceli. Martenzitické korozivzdorné oceli se tedy vyrábějí nejčastěji v zásaditých obloukových pecích s možností tavení 4 až 18 tun materiálu. Velmi často jsou také používány elektrické indukční pece, zejména na tavbu vratného materiálu a výrobu nízkouhlíkových martenzitických ocelí (pod 0,07 % C).

2.1 Tavba oceli v zásaditých obloukových pecích [6], [14]

Nístěj zásaditých obloukových pecí je vyzděna z magnezitových tvárnic, které jsou pokryté vrstvou magnezitového slínku o tloušťkách 150 až 250 mm. Vyzdívka pece je tvořena izolační žáruvzdornou vrstvou a šamotem o tloušťce 70 mm, za kterou je samotná stěna pece postavena z tvárnic z magnezitu o síle 300 mm. Vnitřek pece může mít tvar válce nebo kužele se šikmými stěnami, které jsou snáze opravitelné. Kvůli vysoké teplotě uvnitř pece je nutné brát v úvahu dilataci tvárnic mezi které se proto dává lepenka z dehtu. Špatná dilatace může vést k prohnutí stěny a nutnosti její obnovy. Na víko pece jsou použity žáruvzdorné kyselé tvárnice z dinasu na bázi SiO_2 a nacházejí se zde tři otvory na elektrody opatřeny chladícími kroužky. Kyselé obloukové pece jsou svojí konstrukcí téměř totožné a liší se především v použití dinasových tvárnic z SiO_2 na stěnu pece. Elektrickou obloukovou pec můžeme vidět na obr. 11. Tyto pece jsou složeny z měděných kabelů (1), které vedou elektrický proud do měděných ramen držáků elektrod (2) a na samotné držáky (3). V těchto držácích jsou umístěny grafitové elektrody (4), které procházejí do pece (7) skrz otvory ve víku opatřené chladiči (5). Ramena držáků elektrod jsou upevněna na sloupech držáků elektrod (6), které hydraulicky nebo mechanicky spouštějí či zvedají grafitové elektrody.



Obr. 11 Elektrická oblouková pec [6]

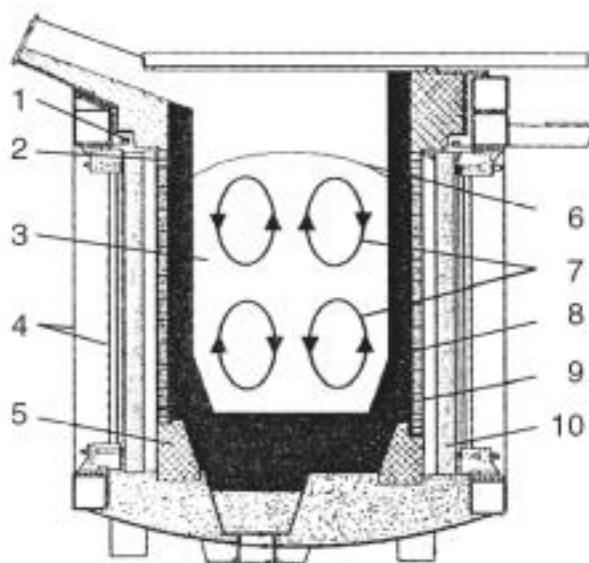
Proces tavby zahrnuje celkem šest fází s odlišnými metalurgickými reakcemi, energetickými nároky i dobou trvání, jejichž součet se označuje jako celková doba tavby a dělí se na:

- Příprava vsázky – tato fáze je souhrn veškeré práce s vratným materiálem, obsahující i jeho úpravy až do naplnění přepravníku, kde je nutné kontrolovat její chemické složení, zda neobsahuje velké množství škodlivých prvků, což může vést ke snížení mechanických vlastností. Dále je potřebné dodržovat poměr mezi různými velikostmi šrotu. Při nižších hmotnostech tavby (1 až 5 tun) je podíl jemného, středního a hrubého šrotu přibližně třetinový a s rostoucí hmotností vsázky se zvětšuje zastoupení hrubého na úkor jemného šrotu. Podíl střední velikosti materiálu zůstává téměř neměnný.

- Mezitavbový prostoj – je doba mezi odpichem taveniny a spuštěním nové tavby. Cílem této fáze je vyčistit pec od strusky a zbytků oceli z minulé tavby, případně opravit vzniklé poškození pece. Při přemísťování vsázky do pece je nutné skládat šrot od jemného po hrubý, aby nedošlo k poškození nístěje. Ta se kvůli zpevnění obvykle pokrývá vrstvou vápna, které by nemělo tvořit více než 2-2,5 % hmotnosti taveného materiálu. Při překročení této meze se vápno usazuje na půdě pece. Nístěj pece by neměla být v přímém kontaktu s rezavým materiálem, který jí narušuje.
- Natavování vsázky – představuje čas, za kterou pec roztaví vsázku. Tato fáze končí odebráním prvního vzorku pro ověření chemického složení taveniny. Snahou sléváren je tuto dobu minimalizovat s ohledem na velikost elektrické energie nutné pro roztavení oceli a nepoškození vyzdívků pece. Tento úsek pro tavbu o hmotnosti 6-8 tun trvá přibližně 60-80 minut v závislosti na velikosti šrotu. Na počátku tavení se do vsázky přidává vápno, které podporuje hoření oblouku a napomáhá k odfosfoření taveniny.
- Oxidační údobí tavby – probíhá od předchozí fáze až po přidání dezoxidačních složek. V tomto úseku se upravuje chemické složení roztavené oceli na předepsané hodnoty, především se tavenina odfosfořuje, odsířuje, snižuje množství dusíku a vodíku. Dále se zmenšuje koncentrace uhlíku, a to až pod spodní mez příslušné značky oceli. Jeho množství můžeme snížit přidáním železné rudy nebo přiváděním kyslíku do taveniny. Tento proces se označuje jako uhlíkový var, který by měl probíhat určitou rychlostí, při které se snižuje obsah uhlíku minimálně o 0,4 % za hodinu. Z dvou uvedených variant pro oxidaci tohoto prvku je efektivnější použít plynný kyslík. Při vsázce 6-8 tun trvá tento proces necelou půl hodinu, kdežto oxidací železnou rudou bychom se dostali k časům okolo 40-70 minut. Konečnou délku této fáze ovlivňuje původní koncentrace uhlíku a také fosforu. Pro oxidaci plynným kyslíkem je nutné změnit hodnoty elektrického proudu a napětí (rychlý průběh oxidace), tak aby se tavenina stihla ohřát na odpichovou teplotu.
- Redukční údobí tavby – je poslední fáze před odpichem oceli, ve které probíhá dezoxidace taveniny a závěrečná korekce chemického složení. Dezoxidace se řídí několika principy. Prvním z nich je minimalizace aktivity kyslíku, tak aby nedošlo při odlévání k reakci s uhlíkem a vzniku bublin. Dále je třeba brát ohled na mikročistotu oceli a vhodné působení dezoxidačních látek na vlastnosti materiálu.
- Odpich a odlévání – je konečný proces při tavbě závislý na mnoha faktorech. Správný odpich ovlivňuje stav licí drážky, jeho rychlost a způsob, který závisí na typu dezoxidační přísady. Pro běžné dezoxidování hliníkem se odleje ocel bez strusky do více než třetiny transportní pánve rychlým nakloněním pece, poté se rychlost odpichu snižuje.

2.2 Tavba oceli v indukčních pecích [6], [14], [15]

Tyto pece se používají především na tavbu vratného materiálu kvůli nízkým propalům legur a také pro výrobu oceli s nízkým obsahem uhlíku (pod 0,07 %). Výroba těchto ocelí v obloukových pecích je obtížná a vede k poškození vyzdívky z důvodu zahřívání taveniny na vysokou teplotu (okolo 1900 °C). Tavený materiál by neměl obsahovat různé nečistoty v podobě nekovových přísad a je požadováno jeho vhodné chemické složení z důvodů omezení průběhu metalurgických reakcí, což zvyšuje cenu vsázky. Indukční pece jsou nepostradatelné ve slévárnách, zabývající se výrobou drobných odlitků na linkách, které potřebují nepřetržité zásobování roztaveným kovem. V těchto provozech proto většinou probíhá tavba na více pecích současně. Náklady na tavbu oceli jsou znatelně nižší než u pecí obloukových a doba tavby na moderním zařízení může být kratší než jedna hodina. Hmotnost vsázky indukční pece je zpravidla 1-6 tun. Indukční pece můžeme rozdělit na kanálkové a kelímkové. První typ se používá na udržování litiny v roztaveném stavu a pro tavbu oceli se nedají použít. Kelímkové pece můžeme rozlišit dle frekvence na síťové, středofrekvenční a vysokofrekvenční. Poslední z uvedených pecí se používají především pro laboratorní účely o hmotnosti vsázky do pár set gramů. Pece na síťovou frekvenci mají uplatnění zejména při výrobě litiny a jejich použití na tavbu oceli je ojedinělé. Středofrekvenční pece se budují v různých velikostech od hmotnosti vsázky pár set kilogramů pro slévárny zabývající se přesným litím až po 25 tunové. Jejich předností je možnost použití pro tavbu oceli i litiny, čímž vytlačují z provozů ostatní typy indukčních pecí. Schéma kelímkové indukční pece můžeme vidět na obr. 12.



Obr. 12 Elektrická indukční kelímková pec [15],

- 1- kroužek spojený nakrátko, 2- vodou chlazený prsteneč, 3- tavenina, 4- ocelová kostra,
5- betonový prsteneč, 6- kopulovitá hladina taveniny, 7- pohyb taveniny, 8- kelímk,
9- induktor, 10- svazek plechů

2.2.1 Kelímkové indukční pece [6]

Jak již bylo zmíněno výše, i indukční pece mohou mít zásaditou nebo kyselou výdusku. Kyselé výdusky jsou vyrobeny z křemence, který se získává stabilizací oxidu křemičitého, cristobalitu a tridymitu za vysokých teplot. Pece s touto výduskou se často používají pro výrobu korozivzdorných ocelí austenitické i martenzitické struktury. Vsázka je tvořena vratným materiálem, který by neměl překročit 60 % kvůli zvýšenému výskytu vad v odlitku (bublin). Přetavováním tohoto materiálu v oceli narůstá obsah uhlíku, křemíku, vodíku a také dusíku. Zbýlých 40 % vsázky je tvořeno nelegovaným ocelovým šrotem a legury. Poměr jednotlivých složek vsázky se většinou stanovuje před každou tavbou. Její chemické složení je důkladně kontrolováno z důvodů obtížného a drahého provedení reakcí běžných pro obloukové pece jako je odfosfoření, odsíření, oduhlíčení a další. Pro tyto reakce je nutná vysoká aktivita strusky, která se zvyšuje s její rostoucí teplotou. Její teplota je však v porovnání s taveninou nižší kvůli malé teplotní vodivosti. Jednotlivé přísady se ukládají do pece postupně. Na níže pece se skládá vrstva niklu a feroslitin, do kterých se přidává ocelový odpad a vratný materiál. Vsázka se také skládá na půdu pece od menších kusů materiálu, které se taví dřív. Před odpichem taveniny se odebere vzorek pro ověření složení a provede se případné dolegování, při kterém se do lázně přidávají legury, tak aby vyráběna ocel odpovídala normám. K množství dodaných legur se připočítává propal jednotlivých prvků. Stejně jako u obloukových pecí se dezoxidace provádí především hliníkem.

Zásadité výdusky jsou vyrobeny alespoň z poloviny z oxidu hořečnatého. Dalším typem výdusek jsou korundové či vysocehlinitanové, které jsou tvořeny minimálně z 50 % oxidem hlinitým a dále oxidem hořečnatým. Odlitky z těchto pecí mívají větší odolnost vůči nárazové práci. Díky malým reakcím mezi taveninou a výduskou je propal legur menší, než je tomu u kyselých indukčních pecí. Oproti obloukovým zásaditým pecím jsou zde metalurgické reakce značně omezeny. Jejich použití je při tavbě manganových a chromových ocelí kvůli nízkým propalům těchto prvků. Ve slévárnách se většinou využívá kyselých výdusek, zejména kvůli nízké spotřebě elektrické energie. Používání kyselých výdusek neomezuje ani snížená možnost metalurgických reakcí vzhledem k původní kontrole chemického složení vsázky.

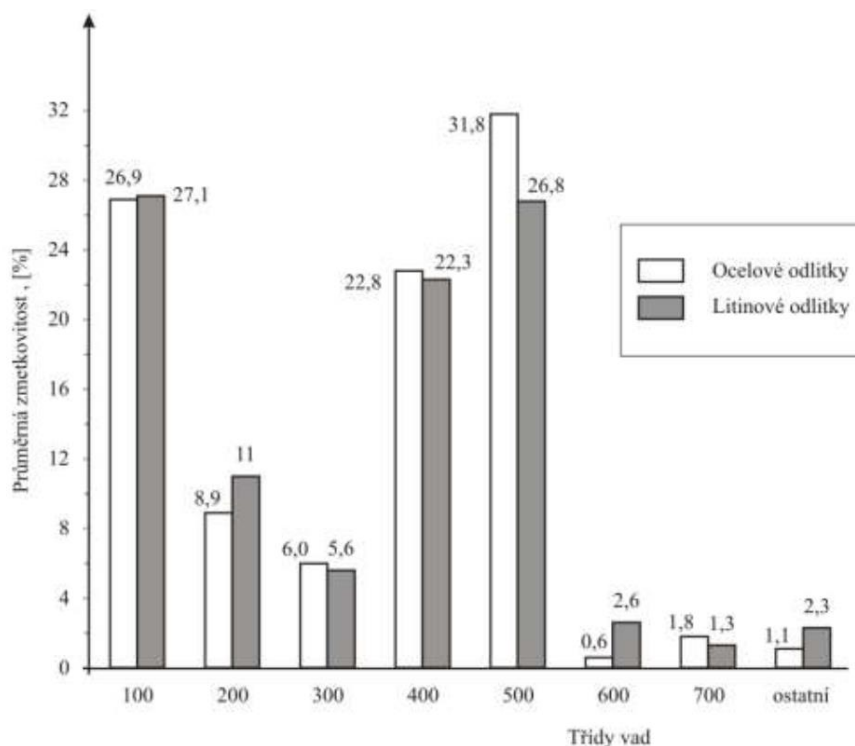
2.3 Vady v odlitcích [6], [14], [16]

Při odlévání oceli vznikají v odlitcích různé vady. Tímto pojmem je myšlena jakákoliv odlišnost součásti od platných norem či objednávky spotřebitele. Mezi vady můžeme řadit změnu tvaru, rozměrů, hmotnosti odlitku, vady povrchu odlitku, odlišnou výslednou strukturu, chemickou heterogenitu materiálu a vnitřní vady jako jsou vměstky, staženiny a další, s čímž souvisí i odlišné mechanické vlastnosti. Tyto vady se vyskytují prakticky ve všech odlitcích, a proto je nutné specifikovat jejich závažnost, zda je vyrobená součást použitelná, popřípadě opravitelná. Dle toho jsou vady členěny do čtyř kategorií:

- Přípustná – tato vada je dle norem a požadavků zákazníka přijatelná, není tedy nutné jí odstraňovat
- Nepřípustná – není možné jí žádnými způsoby opravit nebo normy přímo její nápravu zakazují, výrobek je možné použít do vsázky pro výrobu nových odlitků
- Opravitelná – jsou vady které lze opravit, například vyžiháním či zavařením
- Odstranitelná – mohou být odstraněny po domluvě se zákazníkem pomocí netypického postupu pro vyrábění dané součásti (odlišné tepelné zpracování, vypouzdření)

Některé z nich jsou viditelné okem či snadno zjistitelné přeměřením součásti a označují se jako zjevné. Druhou skupinou jsou vady skryté, které se odhalí až při následném zpracování odlitku, kontrole požadovaných mechanických vlastností nebo při kontrole výsledné vnitřní struktury součásti.

Vady odlitků železných slitin se rozřazují dle platné normy z roku 1964 do sedmi tříd značených dvouciferným číslem. Kvůli nedostatečnosti popisu vady se v literatuře často setkáme s trojciferným značením vady [16], při zachování stejného počtu tříd, které jsou členěny na 38 skupin, z nichž 18 můžeme rozdělit na 70 konkrétních druhů. Tento způsob značení nechává volbu na uživateli, jak podrobně je třeba vadu popsat, zda použije pouze 38 skupin nebo konkrétní druh vady, což dává 108 různých možností. Na obr. 13 je znázorněna četnost nepřijatelných vad v jednotlivých třídách pro odlitky z oceli a litiny. Z grafu můžeme vyzorovat, že přes 80 % zmetků u ocelových odlitků je tvořeno vady třídy 100, 400 a 500. Tato označení představují vady tvaru rozměrů a hmotnosti (100), dutiny (400) a makroskopické vměstky a vady makrostruktury (500).



Obr. 13 Rozložení výskytu nepřijatelných vad (zmetků) v sedmi třídách vad odlitků [16]

3 ROZDĚLENÍ MARTENZITICKÝCH KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ [1], [2], [6], [17]

Pro jednotlivé značky ocelí se používají různé legující prvky a také jiné množství daných prvků. Mezi základní legury těchto ocelí patří chrom a nikl. Dle těchto prvků můžeme oceli rozdělit na chromové, chromniklové a vytvrditelné. Všechny druhy jsou legovány chromem v koncentracích mezi 11,5 a 17 %, z důvodů zachování korozivzdornosti oceli. Chromové martenzitické oceli obsahují velké množství uhlíku a jsou tedy obtížně svařitelné. Tato vlastnost se dá zlepšit jeho snížením, což může vést dle Schaefflerova diagramu ke změně struktury oceli na feritickou a nutnosti legovat ocel austenitotvorným prvkem pro rozšíření oblasti γ a zachování martenzitické struktury. Tímto austenitotvorným prvkem je nikl, jehož koncentrace v těchto materiálech je přibližně do 6 % a roste s klesajícím množstvím uhlíku. Struktura chromových ocelí, při koncentraci niklu nižší než 1 % a teplotě 20 °C, obsahuje většinou δ ferit (do 10 %). Snížování obsahu uhlíku a niklu se jeho množství zvyšuje, nesmí však překročit hranici 20 % podílu feritu ve struktuře, což představuje stanovené maximum pro tyto oceli.

U chromniklových ocelí se ve struktuře objevuje martenzit a částečně i austenit, jehož podíl je kolem 25 %. Austenit ve struktuře má velký vliv na vlastnosti slitiny, zejména na lepší svařitelnost a odolnost vůči nárazové práci i při nízkých teplotách.

Oceli legované mědí, viz poslední ocel v Tab. 2, jsou vytvrditelné. Vytvrditelné martenzitické oceli, známe také pod názvem maraging oceli, mají výbornou houževnatost i v záporných teplotách při vysoké pevnosti a tvrdosti. Těchto vlastností se docílí tepelným zpracováním, zejména vytvrzováním. Pro maraging ocel je typický minimální obsah uhlíku, který zhoršuje houževnatost materiálu a jeho svařitelnost. Po kalení součásti je jeho tvrdost nízká (přibližně 30 HRC), což velmi usnadňuje její obrábění. Popouštěním při teplotě okolo 500 °C s výdrží 3-4 hodiny vznikají v oceli intermetalické fáze, které výrazně zvyšují tvrdost na 40-60 HRC a pevnost, kdy mez kluzu dosahuje hodnot 1300 až 1500 MPa. Zpevnění precipitací intermetalických fází je mnohem výraznější oproti zpevnění karbidy (sekundární tvrdost), kde tvrdost při popouštění narůstá přibližně o 3-10 HRC.

3.1 Použití martenzitických korozivzdorných ocelí [2], [3], [6], [18], [19]

Tyto materiály jsou nejlevnějším druhem korozivzdorných ocelí, a i přes jejich menší odolnost vůči korozi oproti austenitickým a feritickým ocelím jsou v praxi velmi používané. Uplatnění nacházejí při výrobě vodních turbín kvůli dobré odolnosti vůči kavitaci a součástí, které jsou v kontaktu s mořskou vodou. Do těchto prostředí se oceli legují větším množstvím molybdenu pro zlepšení korozivzdornosti. Tyto materiály se používají ve zdravotnictví či potravinářském průmyslu na výrobu skalpelů, nožů a jiné techniky. Dalším odvětvím je energetika, kde se využívají pro lopatky parních turbín, hřídele elektromotorů a na výrobu součástí odolných vůči otěru. Uplatnění mají i v leteckém průmyslu např. ocelové části přistávacích kol, hydraulické systémy, hřídele a další. Vyrobena jsou z nich i samořezné šrouby, vzhledem k jejich větší tvrdosti oproti jiným typům konstrukčních materiálů. Vytvrditelné martenzitické oceli jsou používány na pancíře a v kosmickém průmyslu.

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1 Cíl experimentu [20]

Cílem experimentální části bylo porovnat vliv chromitového písku na výslednou povrchovou strukturu odlitku. Chromit (tvořen především Cr_2O_3 a Fe_2O_3) je ostřivo schopno velmi rychle odvádět teplo z taveniny. Pořizovací cena tohoto ostřiva je výrazně vyšší než u běžně používaných křemenných ostřiv, proto cílem experimentu bylo, zda se v důsledku rychlejšího chladnutí změní struktura na povrchu odlitku oproti běžnému odlévání do křemenného písku (SiO_2). Experiment byl proveden na běžné martenzitické korozivzdorné oceli GX4CrNi13-4.

4.2 Formování

Jako formovací materiál byla použita směs křemenného písku a pryskyřice, známá pod názvem ALFASET. Odlitek byl opatřen ve vrchní části se silnější stěnou exotermickým nálitkem pro eliminaci staženin ve vzniklém tepelném uzlu. Celkově bylo vyrobeno šest forem, z nichž polovina měla v horní části předformovanou 40 milimetrovou vrstvu chromitu, viz obr. 14.



Obr. 14 Fotografie formy s 40 mm vrstvou chromitového písku

Zbývající tři formy byly zhotoveny pouze z křemenného písku. Formy se kromě použité formovací směsi lišily i v rozměrech odlévané součásti. Model odlitku je možné vidět na obr. 15. Odlitky byly vyrobeny ve třech rozměrech pro obě formovací směsi:

- 230x250x30 mm
- 250x300x50 mm
- 250x300x70 mm



Obr. 15 Model odlitku

4.3 Tavení a odlévání

Tavení a odlévání bylo provedeno ve dvou etapách. V první etapě byly odlity tři formy obsahující pouze alfasetovou směs. Ve druhé etapě byly odlity zbylé tři formy se směsí chromitu. V obou případech bylo tavení kovu provedeno v elektrické indukční peci o maximální kapacitě 250 kg. Odpichová teplota kovu z pece byla okolo 1670 °C do předem přehřáté transportní pánve. Formy byly odlévány od odlitků s nejmenšími rozměry po největší odlitky, z důvodu vyšší zabíhavosti oceli při vyšších teplotách. V obou etapách byla teplota kovu před litím první formy naměřena 1610 °C. Po odlití se odlitky nechaly vychladnout a následně byly vybourány z forem. Chemické složení první a druhé experimentální tavby je uvedeno v tabulce 3 a 4. Chemické složení oceli GX4CrNi13-4 je uvedeno v tabulce 5.

Tab. 3 Chemické složení první experimentální tavby

Prvek	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	N
Obsah [hm. %]	0,015	0,68	0,40	0,011	0,005	0,10	3,64	12,62	0,60	0,02	0,050

Tab. 4 Chemické složení druhé experimentální tavby

Prvek	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	N
Obsah [hm. %]	0,016	0,44	0,18	0,009	0,002	0,11	3,65	12,60	0,64	0,02	0,042

Tab. 5 Chemické složení oceli GX4CrNi13-4 dle normy ČSN EN 10283 [6]

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Obsah [hm. %]	max. 0,06	max. 1	max. 1	max. 0,035	max. 0,025	12 až 13,5	max. 0,7	3,5 až 5

4.4 Zpracování vzorků

Po vytažení odlitků z forem se vzorky označily a bylo provedeno žhání. Bez tepelného zpracování je martenzitická ocel extrémně tvrdá a velmi špatně se řeže. Řezání odlitků bylo provedeno na pásové pile, kde byla oddělena část materiálu ve vzdálenosti 5 cm od konce odlitku. Značení vzorků bylo provedeno v závislosti na tloušťce stěny odlitku a použité vrstvy chromitu, viz. tab. 6.

Tab. 6 Značení odlitků dle tloušťky stěny odlitku a použitého chromitu

Označení vzorků	Tloušťka chromitu [mm]	Tloušťka odlitku [mm]
1-30-0	0	30
1-50-0	0	50
1-70-0	0	70
2-30-40	40	30
2-50-40	40	50
2-70-40	40	70

4.5 Hodnocení experimentu

Hodnocení bylo provedeno pomocí metalografie na světelném mikroskopu při stonásobném zvětšení. Vzorky pro metalografii byly ze všech odlitků odebrány vždy ze stejného místa, tj. 5 cm od okraje odlitku v tepelné ose.

Příprava metalografických výbrusů byla provedena standartním postupem v metalografické laboratoři na VUT v Brně.

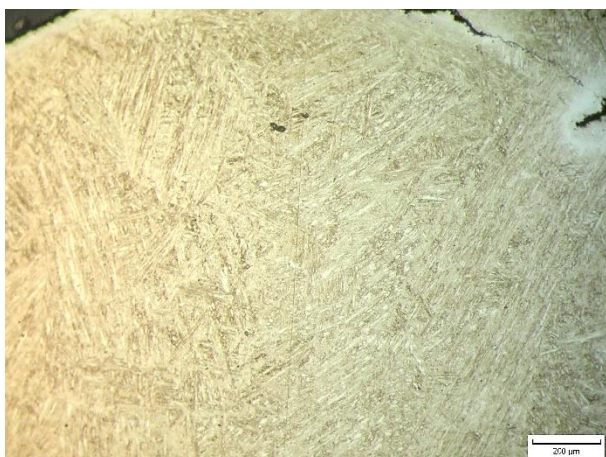
Cílem pozorování byla struktura povrchové vrstvy, která byla v kontaktu s vrstvou chromitu, a bylo provedeno porovnání s povrchovou vrstvou odlitků, které byly zaformovány bez vrstvy chromitu. Pro každý vzorek byly pořízeny snímky z okraje a ze středu metalografického výbrusu.



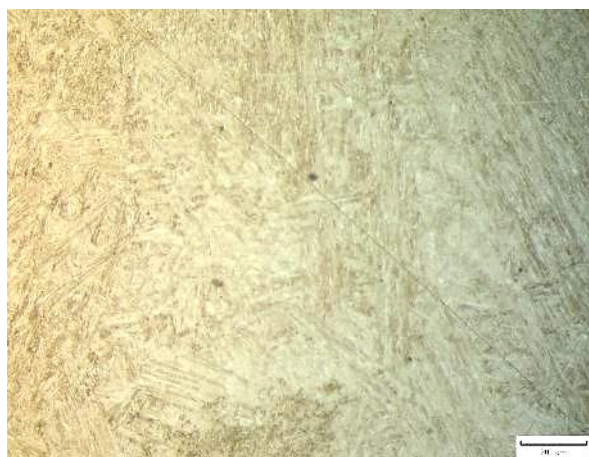
Obr. 16 Povrchová struktura vzorku 1-30-0



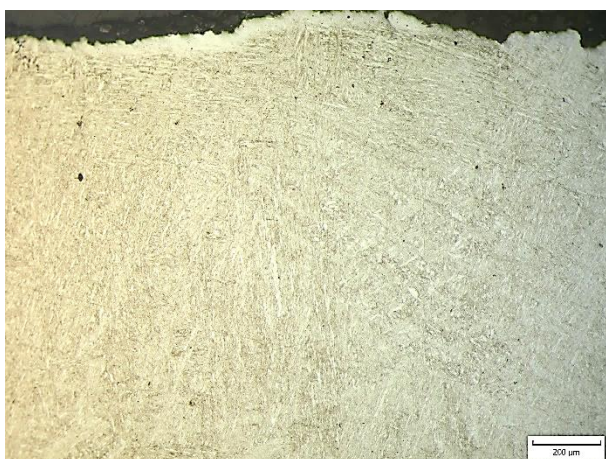
Obr. 17 Vnitřní struktura vzorku 1-30-0



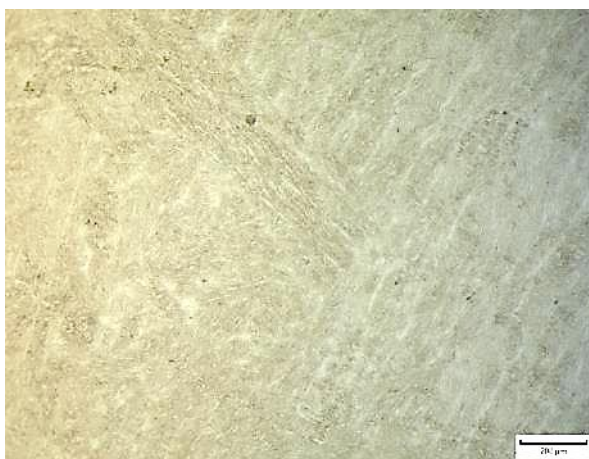
Obr. 18 Povrchová struktura vzorku 2-30-40



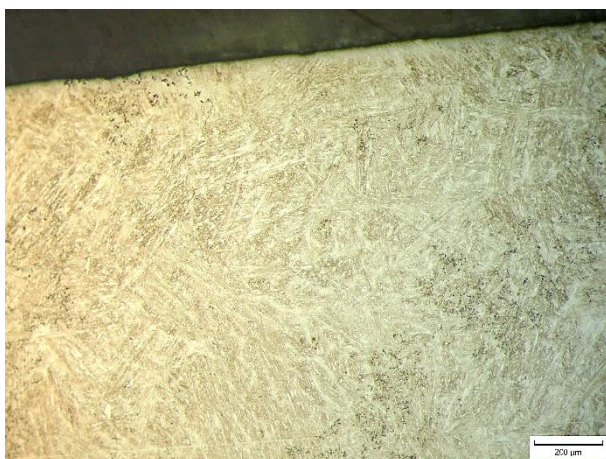
Obr. 19 Vnitřní struktura vzorku 2-30-40



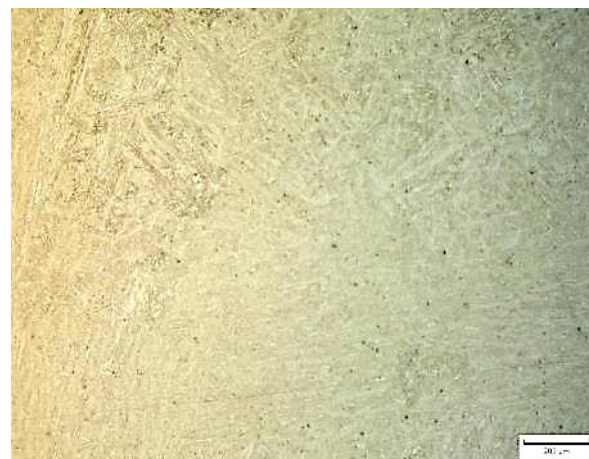
Obr. 20 Povrchová struktura vzorku 1-50-0



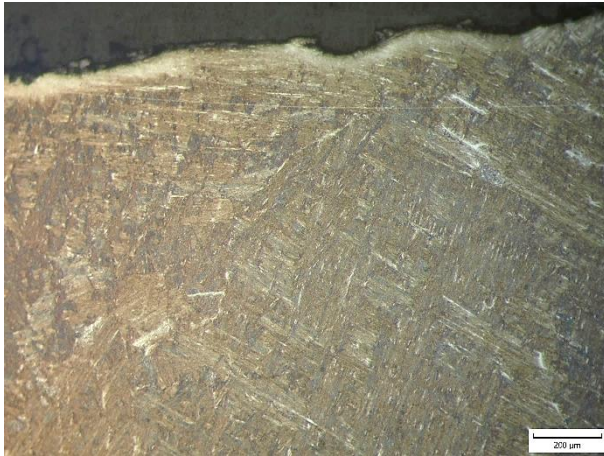
Obr. 21 Vnitřní struktura vzorku 1-50-0



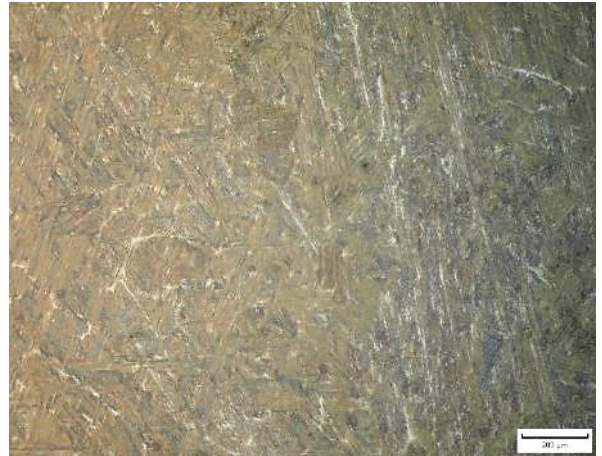
Obr. 22 Povrchová struktura vzorku 2-50-40



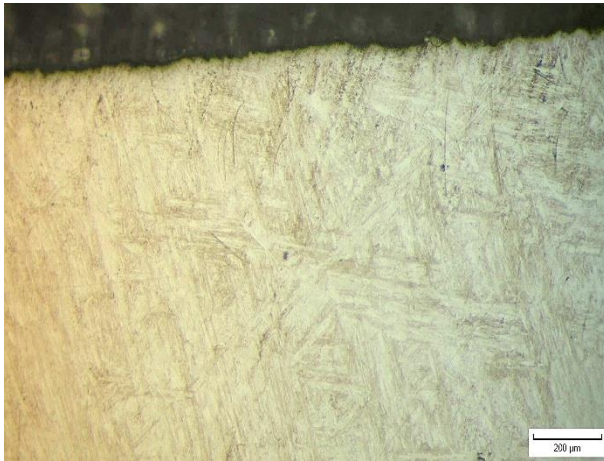
Obr. 23 Vnitřní struktura vzorku 2-50-40



Obr. 24 Povrchová struktura vzorku 1-70-0



Obr. 25 Vnitřní struktura vzorku 1-70-0



Obr. 26 Povrchová struktura vzorku 1-70-40



Obr. 27 Vnitřní struktura vzorku 1-70-40

Použitý chromitový písek by měl mít vliv na zjemnění povrchové struktury na základě jeho vyšší tepelné kapacity oproti běžnému křemennému písku. Na obrázcích uvedených výše (obr. 16-27) nebylo pozorováno zjemnění povrchové struktury u odlitků s chromitem oproti odlitkům bez něj. Z toho lze usoudit, že použití chromitového písku v případě odlévaných experimentálních odlitků neměl na povrchovou strukturu vliv, a to z důvodů malé tloušťky stěny odlitků, malé tloušťky použité chromitové směsi, případně jejich kombinace. Lze tedy předpokládat, že u těchto typů odlitků by mělo použití chromitového písku na zjemnění martenzitické struktury smysl při větší tloušťce stěny odlitků.

5 ZÁVĚRY

Martenzitické korozivzdorné oceli zahrnují velkou skupinu materiálů s odlišným chemickým složením, které se projevuje na jejich vlastnostech. Pro tyto oceli je typická vysoká tvrdost, kterou výrazně zvyšuje uhlík. Tento prvek má však negativní vliv na houževnatost oceli, a je tedy nutné najít jejich vhodnou kombinaci. Korozivzdornost těchto materiálů je způsobena prvky, zejména chromem, které na povrchu součásti vytvářejí vrstvu oxidů zpomalující korozi. Tato vrstva vzniká, je-li obsah chromu v matici větší než 11,5 %. Martenzitické oceli s nízkým obsahem uhlíku je možné svařovat s předehřevem, nejčastěji metodou WIG, případně MIG.

Vlastnosti oceli lze výrazně ovlivnit tepelným zpracováním, zejména kalením a popouštěním. Rychlým ochlazením z kalící teploty vzniká v oceli nerovnovážná martenzitická struktura, čímž se zvyšuje její pevnost. Popouštění se provádí při nižší teplotě, kdy dochází ke zvýšení houževnatosti materiálu vlivem snížení vnitřních pnutí.

Výroba martenzitických korozivzdorných ocelí probíhá v elektrických obloukových a indukčních pecích. Výhodou obloukových pecí je možnost výrazného odfosfoření a odsíření taveniny. V indukčních pecích se především taví martenzitické oceli s nízkým obsahem uhlíku (pod 0,07 %). Neoddělitelnou součástí výroby oceli jsou vady v odlitcích, které se dělí na sedm tříd, z nichž nejčastější jsou vady tvaru rozměrů a hmotnosti, dutiny, makroskopické vměšky a vady makrostruktury.

Tyto oceli nacházejí uplatnění v mnoha odvětvích, např. energetice, zdravotnictví, letectví či potravinářském průmyslu. Vyrábějí se z nich nože, skalpely, hřídele, vodní turbíny, lopatky parních turbín, hydraulické systémy a další.

V experimentální části bylo vyrobeno šest odlitků. Polovina z nich byla odlita do forem s chromitovou vrstvou. Zbylé tři formy byly zhotoveny pouze z křemenného písku. Vyhodnocení experimentu spočívalo v porovnání povrchové struktury odlitků vyrobených v těchto formách. Na snímcích martenzitické struktury ze světelného mikroskopu nebylo pozorováno zjemnění povrchové struktury u odlitků s chromitem oproti odlitkům bez něj. Chromitový písek tedy neměl vliv na povrchovou strukturu, pravděpodobně kvůli malé tloušťce stěny odlitků, případně malé tloušťce chromitové vrstvy ve formě. Lze tedy předpokládat, že u těchto typů odlitků by mělo použití chromitového písku na zjemnění martenzitické struktury smysl při větší tloušťce stěny odlitků.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. FREMUNT, Přemysl a Tomáš PODRÁBSKÝ. *Konstrukční oceli*. Brno: CERM, 1996, 261 s. ISBN 80-85867-95-8.
2. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
3. Martensitic Stainless Steels. [Http://www.worldstainless.org](http://www.worldstainless.org) [online]. [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_Martensitic_Stainless_Steels.pdf
4. VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: VŠCHT, 2006, 185 s. ISBN 80-7080-600-1.
5. MAZANCOVÁ, Eva. *Technické materiály I*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2577-9. Dostupné také z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/TM1/Technicke%20materialy%20I.pdf>
6. ŠENBERGER, Jaroslav, Zdeněk BŮŽEK, Antonín ZÁDĚRA, Karel STRÁNSKÝ a Václav KAFKA. *Metalurgie oceli na odlitky*. V Brně: VUTIUM, 2008, 311 s. ISBN 978-80-214-3632-9.
7. ZRNÍK, Josef, Libor KRAUS, Tasilo PRNKA a Karel ŠPERLINK. *Příprava ultrajemnozrných a nanokrystalických kovových materiálů extrémní plastickou deformací a jejich vlastnosti*. Ostrava: Repronis, 2007. ISBN 978-80-7329-153-2. Dostupné také z: <http://www.nanotechnologie.cz/storage/strategie4.pdf>
8. Calculation of pitting resistance equivalent numbers. [Https://www.bssa.org.uk](https://www.bssa.org.uk) [online]. [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <https://www.bssa.org.uk/topics.php?article=111>
9. KOVAŘÍK, Rudolf a František ČERNÝ. *Technologie svařování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000, 185 s. ISBN 80-7082-697-5.
10. VEVERKA, Jan. Svařování korozivzdorných a žárupevných ocelí. [Https://www.omnitechweld.cz](https://www.omnitechweld.cz) [online]. [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: https://www.omnitechweld.cz/cze/clanky/svarovani_korozivzdornych_a_zarupevných_oceli.html
11. MA, Dang-shen, Hong-xiao CHI, Jian ZHOU a Qi-long YONG. Microstructure and Mechanical Properties of Martensitic Stainless Steel 6Cr15MoVn. *Journal of Iron and Steel Research, International*. 2012, **19**(3), 56-61. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1006706X12600740>
12. SMALLMAN, R. E. a A. H. W. NGAN. *Modern physical metallurgy*. 8th edition. Waltham, MA: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 978-0-08-098204-5. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/book/9780080982045>
13. AKRÉ, J., F. DANOIX, H. LEITNER a P. AUGER. The morphology of secondary-hardening carbides in a martensitic steel at the peak hardness by 3DFIM. *Ultramicroscopy*. 2009, **109**(5), 518-523. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304399108003185?via%3Dihub>

14. LEVÍČEK, Petr a Karel STRÁNSKÝ. *Metalurgické vady ocelových odlitků: Příčiny a odstraňování*. Praha: SNTL, 1984, 269 s.
15. ČERNÝ, Václav. Indukční ohřev. [Http://www.odbornecasopisy.cz](http://www.odbornecasopisy.cz) [online]. 2002 [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/indukcni-ohrev-3--14655>
16. ELBEL, Tomáš. *Diagnostika a řízení kvality odlitků* [online]. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/diagnostika-a-rizeni-kvality-odlitku/Elbel_Diagnostika-a-rizeni-kvality-odlitku.pdf
17. SHA, W., H. LEITNER, Z. GUO a W. XU. Phase transformations in maraging steels-11. *Phase transformations in steels*. Woodhead Publishing, 2012, s. 332-362. ISBN 978-1-84569-971-0.
18. Charakteristika korozivzdorných materiálů a základní informace o použití, zpracování, svařování a možné korozi. [Http://www.italinox.cz](http://www.italinox.cz) [online]. [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <http://www.italinox.cz/plechy/charakteristika-materialu/strana-1>
19. Martensitic stainless steels. [Https://www.bssa.org.uk](https://www.bssa.org.uk) [online]. [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: <https://www.bssa.org.uk/cms/File/Alans%20Angle%20February%202009%20-%20Martensitics.pdf>
20. Chromitový písek. [Http://www.h-glost.cz](http://www.h-glost.cz) [online]. [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: http://www.h-glost.cz/progres/lib/files.php?id=53&table=files_catalog

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 IRA diagram	10
Obr. 2 ARA diagram.....	10
Obr. 3 Martenzitická struktura.....	11
Obr. 4 Vliv uhlíku na parametry mřížky.....	11
Obr. 5 Vliv obsahu uhlíku na tvrdost martenzitu.....	12
Obr. 6 Rovnovážné stavové diagramy železa.....	13
Obr. 7 Schaefflerův diagram.....	14
Obr. 8 Pás prokalitelnosti.....	16
Obr. 9 Vliv kalící teploty na tvrdost oceli	16
Obr. 10 Navýšení tvrdosti oceli při popouštění vlivem precipitace karbidů	17
Obr. 11 Elektrická oblouková pec	19
Obr. 12 Elektrická indukční kelímková pec	21
Obr. 13 Rozložení výskytu nepřipustných vad (zmetků) v sedmi třídách vad odlitků.....	23
Obr. 14 Fotografie formy s 40 mm vrstvou chromitového písku	25
Obr. 15 Model odlitku	26
Obr. 16 Povrchová struktura vzorku 1-30-0	27
Obr. 17 Vnitřní struktura vzorku 1-30-0.....	27
Obr. 18 Povrchová struktura vzorku 2-30-40	28
Obr. 19 Vnitřní struktura vzorku 2-30-40.....	28
Obr. 20 Povrchová struktura vzorku 1-50-0	28
Obr. 21 Vnitřní struktura vzorku 1-50-0.....	28
Obr. 22 Povrchová struktura vzorku 2-50-40	28
Obr. 23 Vnitřní struktura vzorku 2-50-40.....	28
Obr. 24 Povrchová struktura vzorku 1-70-0	29
Obr. 25 Vnitřní struktura vzorku 1-70-0.....	29
Obr. 26 Povrchová struktura vzorku 1-70-40	29
Obr. 27 Vnitřní struktura vzorku 1-70-40.....	29

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Mechanické vlastnosti a teploty tepelného zpracování martenzitických ocelí	12
Tab. 2 Chemické složení martenzitických korozivzdorných ocelí	18
Tab. 3 Chemické složení první experimentální tavby	26
Tab. 4 Chemické složení druhé experimentální tavby.....	26
Tab. 5 Chemické složení oceli GX4CrNi13-4 dle normy EN 10283	26
Tab. 6 Značení odlitků dle tloušťky stěny odlitku a použitého chromitu.....	27