

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ

**Struktura a vlastnosti oceli na odlitky
G22NiMoCr5-6**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Autor: Tomáš Kment

Vedoucí práce: doc. Ing. Jana Sobotová, Ph.D

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kment** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **459863**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Struktura a vlastnosti oceli na odlitky G22NiMoCr5-6

Název bakalářské práce anglicky:

Structure and properties of steel for castings G22NiMoCr5-6

Pokyny pro vypracování:

- Literární rešerše
- Experimentální část
 - Příprava zkušebních vzorků a jejich tepelné zpracování
 - Provedení mechanických zkoušek
 - Metalografická analýza ve vybraných stavech
- Vyhodnocení výsledků, závěry, sepsání BP

Seznam doporučené literatury:

- [1] NĚMEC, M., B. BEDNÁŘ a B. BRYKSI STUNOVÁ. Teorie slévání. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické. 2016. ISBN 978-80-01-06026-1.
- [2] PTÁČEK, L. Nauka o materiálu II. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
- [3] SOBOTOVÁ, J. Nauka o materiálu I. a II.: cvičení. Dotisk 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické. 2016. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [4] SOIŇSKI, M.S., P. KORDAS a K. SKURKA. Trends in the Production of Castings in the World and in Poland in the XXI Century. Archives of Foundry Engineering. 2016, 16(2), DOI: 10.1515/afe-2016-0017. ISSN 2299-2944. Dostupné také z: <https://www.degruyter.com/view/afe.2016.16.issue-2/afe-2016-0017/afe-2016-0017.xml>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

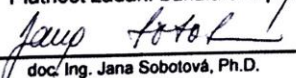
doc. Ing. Jana Sobotová, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **03.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **30.07.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


doc. Ing. Jana Sobotová, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


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


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

21.4.2018
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů,
které uvádím v seznamu použité literatury.

V Praze dne

.....

Tomáš Kment

Rád bych poděkoval paní doc. Ing. Janě Sobotové, Ph.D za veškeré rady, poznatky, trpělivost, ochotu a čas, který mi byla schopna věnovat. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Janu Eksteinovi a celé firmě Kdynium a.s. za možnost bakalářskou práci realizovat. A také děkuji své rodině za podporu, kterou mi nejen během psaní této práce poskytovala.

Anotace

Bakalářská práce se věnuje problematice slévárenské technologie se zaměřením na metodu vytavitelného modelu používanou ve firmě Kdynium a.s., kde autor práce působil v rámci praxe v technologickém oddělení. Je provedena analýza struktury a vlastností vysokopevnostní oceli na odlitky G22NiMoCr5-6 s dobrou svařitelností, a to v závislosti na parametrech tepelného zpracování. Byla použita metalografická analýza pomocí světelného mikroskopu, měření tvrdosti, zkouška tahem a zkouška rázem v ohybu v rozsahu -40 °C až 100 °C. Vzorky byly kaleny z teploty 950 °C a dále popuštěny variantně při teplotách 560 °C, 580 °C a 610 °C. Zjištěné mechanické vlastnosti se výrazně liší od hodnot, které pro tuto ocel uvádí světoví výrobci. Zároveň nebyly v celém rozsahu potvrzeny hodnoty mechanických vlastností oceli G22NiMoCr5-6, jak je uvádí norma SEW 520.

Klíčová slova

slévárenská technologie; metoda vytavitelného modelu; vysokopevnostní ocel na odlitky; mechanické vlastnosti; struktura

Annotation

The bachelor thesis deals with problematics of casting technology with a focus on the investment casting used in company Kdynium a.s., where the author of this thesis worked during the practice in technology department. An analysis of structure and mechanical properties of the high strength steel G22NiMoCr5-6 for casting with good weldability, depending on the heat treatment parameters. Metallographic analysis, hardness measurement, tensile test and Charpy impact energy test in the range -40 °C to 100 °C were made. Samples were quenched at 950 °C and variably annealed at 560 °C, 580 °C and 610 °C. The resulting properties are significantly different from the values given by the world producers of this steel. At the same time, mechanical properties of G22NiMoCr5-6 were not confirmed in the full range, as they are shown in the norm SEW 520.

Key words

casting technology; investment casting; high strength steel for casting; mechanical properties; structure

Seznam veličin a použitých zkratk

Označení	Veličina	Jednotky
%	procento	-
A	tažnost	[%]
a.s.	akciová společnost	-
Al	hliník	-
apod.	a podobně	-
atd.	a tak dále	-
BP	bakalářská práce	-
C	uhlík	-
°C	stupeň celsia	-
CCD	Charged-coupled device	-
Cr	chrom	-
Cu	měď	-
ČR	Česká republika	-
ČSN	česká státní norma	-
ČVUT	České vysoké učení technické	-
EN	evropská norma	-
F	síla (zátížení)	[N]
F_0	počáteční zatížení	[N]
Fe	železo	-
Fe_3C	karbid železa	-
F_m	maximální síla před přetržením zkušební tyče	[N]
$F_{p0,2}$	síla na mezi kluzu	[N]
GJS	označení litiny	-
HBW	tvrdost dle Brinella	[N/mm ²]
HRA	tvrdost dle Rockwella-stupnice A	[N/mm ²]
HRC	tvrdost dle Rockwella-stupnice C	[N/mm ²]
ISO	mezinárodní organizace pro normalizaci	-
J	joule	[N.m]
kg	kilogram	[N.s ² .m ⁻¹]
kp	kilopond	-
ks	kus/kusy	-
KV	nárazová práce	[J]
KV_{20}	nárazová práce při teplotě zkoušky 20 °C	[J]

KV _{stř}	střední hodnota nárazové práce	[J]
L ₀	počáteční měřená délka	[mm]
LKG	litina s kuličkovým grafitem	-
LLG	litina s lupínkovým grafitem	-
L _u	konečná délka zkušební tyče po přetržení	[mm]
max	maximum	-
Mg	hořčík	-
mil.	milión	-
min	minimálně	-
mm	milimetr	-
mm ²	milimetr čtvereční	-
Mn	mangan	-
Mo	molybden	-
MPa	megapascal	-
MVM	metoda vytavitelného modelu	-
N	newton	[kg.m.s ⁻²]
NaOH	hydroxid sodný	-
např.	například	-
Nb	niob	-
Ni	nikl	-
Ød ₀	počáteční průměr zkušební tyče	[mm]
P	fosfor	-
popř.	popřípadě	-
R	napětí	[MPa]
R _m	mez pevnosti	[MPa]
R _{p0,2}	mez kluzu	[MPa]
S	síra	-
s.r.o	společnost s ručeným omezeným	-
S ₀	počáteční průřez zkušební tyče	[mm ²]
SEW	německá norma	-
Si	křemík	-
SiO ₂	oxid křemičitý	-
temp.	temperovaná	-
Ti	titan	-
tis.	tisíc	-

TP	teplota popouštění	[°C]
Tt	přechodová teplota	[°C]
Tt ₁	přechodová teplota pro KV=27 J	[°C]
Tt ₂	přechodová teplota pro KV _{stř}	[°C]
TZ	tepelné zpracování	-
tzv.	takzvaný	-
V2	označení vrubu s hloubkou 2 mm	-
Z	kontrakce	[%]
Zn	zinek	-

Obsah

1	Úvod	8
2	Slévárenské technologie	9
2.1	Metodika technologie vytavitelného modelu	15
2.1.1	Historie	15
2.1.2	Princip technologie	16
3	Materiálové spektrum pro metodu vytavitelného modelu	30
3.1	Ocel na odlitky G22NiMoCr5-6 (1.6760).....	32
3.1.1	Chemické složení.....	33
3.1.2	Tepelné zpracování G22NiMoCr5-6.....	34
3.1.3	Mechanické vlastnosti G22NiMoCr5-6.....	35
3.1.4	Analýza informací z dostupné literatury	36
4	Experimentální část.....	38
4.1	Experimentální metody.....	40
4.1.1	Zkouška tahem.....	40
4.1.2	Zkouška rázem v ohybu dle Charpy	41
4.1.3	Zkoušky tvrdosti (dle Brinella a Rockwella)	42
4.1.4	Metalografická analýza	43
5	Výsledky a jejich diskuze.....	44
5.1	Zhodnocení struktury.....	44
5.2	Vyhodnocení zkoušek tvrdosti	45
5.3	Vyhodnocení tahové zkoušky.....	47
5.4	Vyhodnocení zkoušky rázem v ohybu.....	49
5.5	Celkové zhodnocení mechanických zkoušek.....	52
6	Závěry	54
7	Použitá literatura.....	55

1 Úvod

Strojírenská technologie je rozvíjena velkou rychlostí. Vysoké požadavky zákazníků na celkovou kvalitu, aplikovatelnost výrobků, ekonomičnost apod. s sebou přináší i vývoj nových perspektivních materiálů, které tyto požadavky dokáží uspokojit.

Nedílnou součástí strojírenské technologie je i slévárenský průmysl a výroba odlitků, která má ve světě pevné postavení a je tak nedílnou součástí většiny strojírenských odvětví. Dominantní oblastí využití slévárenských technologií je zejména sériová výroba složitých součástí. Jednou z mnoha výrobních metod odlitků je Metoda vytavitelného modelu, která je schopna produkovat i ty nejsložitější tvarové odlitky s vysokou přesností. [1] V ČR lze nalézt několik výrobců, kteří tuto složitou technologii ovládají a prosazují se i na světových trzích. Jedním takovým zástupcem je firma Kdynium a.s. se sídlem v Plzeňském kraji. [2]

Tato firma plánuje rozšíření svého materiálového portfolia. Jednou z uvažovaných oblastí jsou i vysokopevnostní oceli na odlitky s dobrou svařitelností, mezi které patří i ocel G22NiMoCr5-6.

V rámci zadání bakalářské práce absolvoval její autor tříměsíční praxi v technologickém oddělení pod vedením hlavního technologa, kde se podílel nejen na kompletní přípravě vzorků pro bakalářskou práci, ale také na různých firemních projektech, výrobních činnostech apod. Během této praxe autor pořídil fotografie uvedené v první části práce. Jedna z ilustračních fotografií je na Obrázku 1.

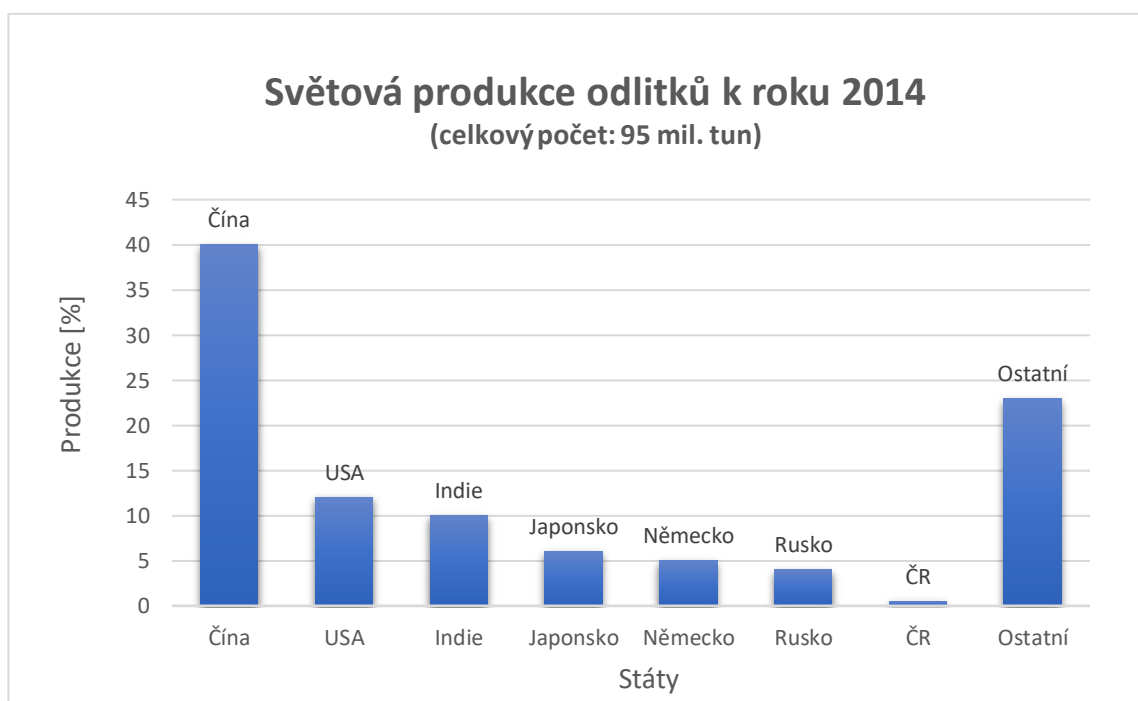
Cílem práce je popsat technologii metody vytavitelného modelu používanou v již zmíněné firmě. Dalším cílem je analýza struktury a vlastností oceli G22NiMoCr5-6 v závislosti na podmínkách tepelného zpracování a porovnání výsledků s hodnotami v dostupné literatuře.



Obrázek 1: Lití kovu do forem

2 Slévárenské technologie

Slévárství je technologické odvětví strojírenské výroby, které roztavením kovu a jeho vléváním do dutin forem získává výrobky požadovaného tvaru a chemického složení. Výsledné produkty jsou nazývány odlitky. Technologie slévání má pevné postavení ve strojírenském průmyslu a je jeho nenahraditelnou součástí. Za rok 2014 bylo na celém světě evidováno přes 95 mil. tun odlitků. [3] Česká republika vyprodukovala za rok 2014 přes 400 tis. tun odlitků [3], což tvoří necelých 0,5 % světové produkce. Ke konci 20. století byla tato hodnota mnohem vyšší a dosahovala skoro 1,5 mil. tun odlitků za rok. [3] Hlavní podíl na propadu produkce měla politická situace a zhoršení průmyslových podmínek v ČR. Celkové srovnání států ve světové produkci odlitků k roku 2014 je uvedeno na Obrázku 2.



Obrázek 2: Přehled světové produkce odlitků (rok 2014) [3]

Z Obrázku 2 je patrné, že Čína je dominantním slévárenským producentem. Její podíl tvoří skoro 40 % z celkového počtu odlitků za rok 2014. Česká republika se v těchto počtech nemůže světovým velmocím vyrovnat. Zajímavý pohled na produkci však nastává, když je počet odlitků vztažen na celkový počet obyvatel dané země. Tento trend je na Obrázku 3, kde data o počtu obyvatel jednotlivých států uvádí [4].



Obrázek 3: Srovnání odlitků s počtem obyvatel

Na Obrázku 3 můžeme vidět, že Česká republika je druhým největším producentem ve světové výrobě odlitků vzhledem k počtu obyvatel, kde na prvním místě je Německo a na třetím Japonsko. Tento fakt za rok 2014 dokazuje, že Česká republika není slévárenským „outsiderem“ na světovém trhu a že jsou kapacity ČR ve srovnání s ostatními velmocemi čerpány skoro na maximum.

Největší výhodou slévárenských technologií je dobrá konkurenceschopnost ve vztahu k ostatním výrobním technologiím. [5] Dosahuje vysoké sériové produktivity, složitých tvarů odlitku, úplné využitelnosti a recyklovatelnosti materiálu, který je možné volit prakticky libovolně. [5]

Největší nevýhodou této technologie je energetická náročnost, kdy je zapotřebí velkého množství tepelné energie pro docílení podmínek, za kterých je dosaženo požadovaných výsledků. Zároveň velkou nevýhodou je sklon výrobků k častým vadám (řediny, staženiny apod.).

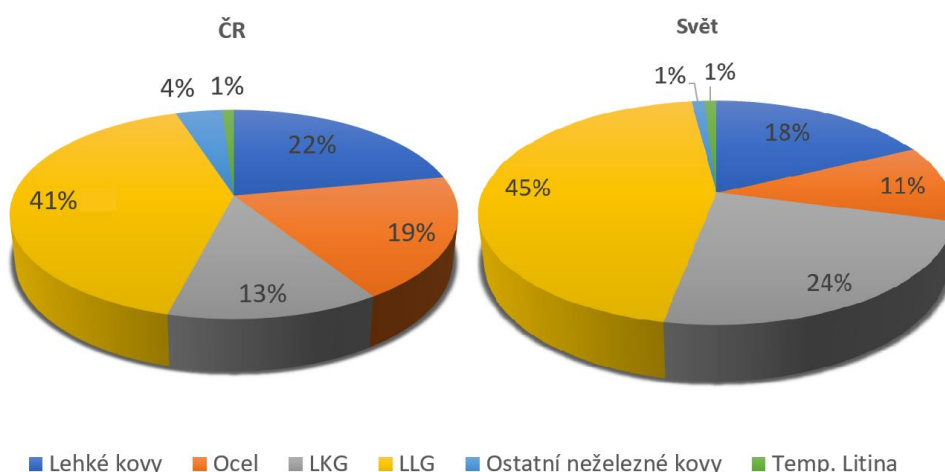
Slévárny v ČR využívají gravitačního odlévání do formovacích směsí pojených nasurovo, vodním sklem a pryskyřicemi vytvrzovanými za studena i za tepla. [5] Do kovových forem se odlévá gravitačně i pod tlakem. [5] Jsou zde však zastoupeny i speciální technologie výroby odlitků, jako je odstředivé lití, metoda spalitelného a vytavitelného modelu. [5] Poslední zmíněná technologie bude detailně diskutována v této práci.

Z materiálového hlediska kovů není prakticky výroba odlitků omezena. Nejčastějším materiálem ve slévárenském průmyslu jsou litiny. Světová produkce odlitků zaznamenala podíl necelých 70 % [3] odlitků z litiny za rok 2014 (45 % [3] litina s lupínkovým grafitem, 24 % [3] litina s kuličkovým grafitem). Litina je ideálním materiálem pro výrobu odlitků. Má výbornou tavitelnost, mechanické vlastnosti, zabíhavost apod.

Druhým nejčastějším materiálem ve světové produkci odlitků je ocel (11 % [3]), která je považována za složitější materiál pro výrobu kvůli jejím slévárenským vlastnostem. Ocel má v porovnání s litinou horší zabíhavost a je náročnější na čistotu taveniny.

Na třetím místě jsou lehké kovy s 18 % [3], kde je využíván převážně hliník. Tomuto druhu kovů je potřeba přizpůsobovat části výrobního procesu a celá výroba je mnohem komplikovanější než u ocelí a litin.

V České republice je trend produkce podobný, pouze podíl litiny je nižší (zhruba 55 % [3]) a více je produkována ocel 19 % [3]. Lehké kovy se pohybují okolo 22 % [3]. Srovnání světové a české produkce odlitků z materiálového pohledu k roku 2014 je uvedeno na Obrázku 4. (LLG = litina s lupínkovým grafitem, LKG = litina s kuličkovým grafitem).



Obrázek 4: Podíl jednotlivých materiálů na výrobu odlitků v ČR a ve světě [3]

Ze srovnání vyplývá, že ČR přebírá větší podíl ocelových odlitků než litinových, což je způsobeno nízkými výrobními náklady v zemích, jako je Čína apod., kde odlitky LKG (LLG) jsou mnohem levnější a zároveň ocel vyžaduje složitější proces výroby a s tím i vyspělejší technologii.

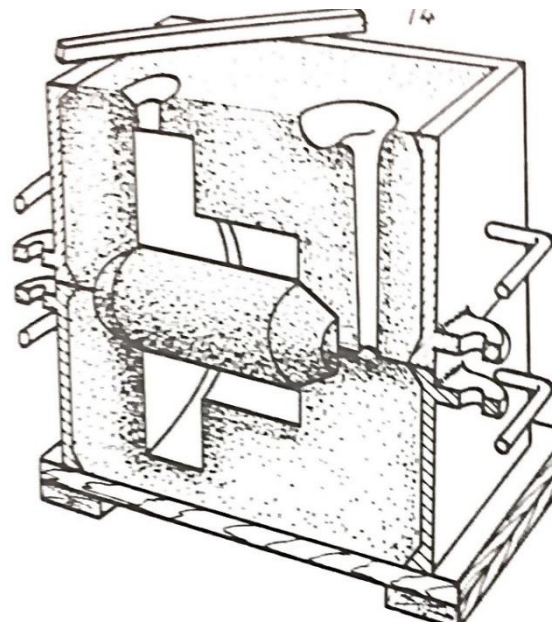
Jak již bylo zmíněno, tak existuje mnoho slévárenských technologií. Nejvíce využívané typy jsou uvedeny dále, kde je představen jejich princip, největší výhoda a nevýhoda. Slévárenské technologie se nejčastěji rozdělují dle přesnosti konečného produktu.

a) Metody méně přesných odlitků

Tyto metody jsou soustředěny spíše na produktivitu namísto kvality rozměrů odlitku. Jedná se zejména o vstupní polotovary pro další výrobní operace.

Lití do formovacích směsí

V případě lití do formovacích směsí je využito formovacího materiálu a modelového zařízení (modelu) k vytvoření dutiny. [6] Formovací materiál je složen ze dvou hlavních složek: ostřiva a pojiva. Ostřivo je žáruvzdorný materiál se zrnky většími než 0,02 mm a činí 50–90 % objemu formovací směsi. [7] Nejčastěji se jedná o křemenný písek, korund, šamot apod. [7] Druhou hlavní látkou je pojivo, které tvoří vazbu mezi jednotlivými zrny ostřiva a tím ovlivňuje především pevnostní charakteristiku formovací směsi. [7] Nejčastějším pojivem jsou pryskyřice, tuky, oleje, kaolinit apod. [7] Dutina je vytvořena ve formovací směsi pomocí modelového zařízení a formovacího rámu, kde model zanechává otisk ve formě a spojením dvou upěchovaných rovin vzniká dutina. Hotová forma je na Obrázku 5. Největší výhodou této metody je jednoduchost a cenová dostupnost. Nevýhodou je nepřesnost a sklon k typickým vadám vlivem formovací směsi (spečení apod.). V ČR tuto technologii používají například Vítkovice Machinery Group. [8]



Obrázek 5: Forma připravená k lití [6]

Lití do kokil

Gravitační lití využívá pro získání tvaru odlitku pevných forem. Pro tento druh technologie je vyrobena forma (kovová, písková, keramická) obsahující dutinu tvaru odlitku. Kokila je označení kovové formy tohoto typu. [6] K vyplnění formy je využito většinou gravitační síly kovu, která podporuje zaběhnutí roztaveného kovu do formy. Největší výhodou je opakovatelnost a produktivita této metody. [6] Také materiál má po rychlém chladnutí jemnozrnnou strukturu, což vyhovuje jeho mechanickým vlastnostem. [6] Nevýhodou je částečná nepřesnost a špatná zabíhavost do složitých tvarů. Technologii využívá například firma Silesia-Tech s.r.o. [9]

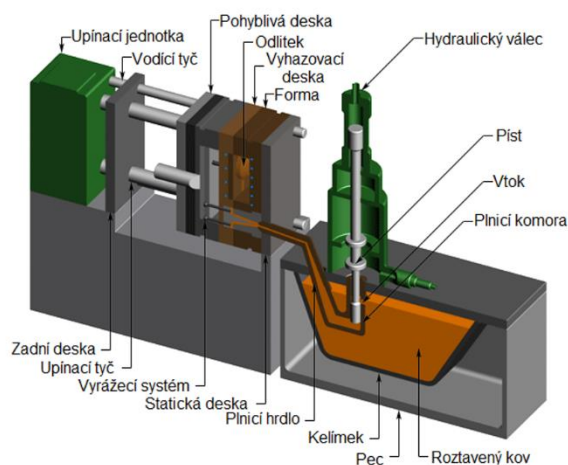
b) Metody přesných odlitků

U těchto metod se dosahuje vysoké přesnosti výsledných odlitků, kde není následně potřeba mnoha operací k dokončení finálního výrobku.

Lití tlakové

Jedná se o metodu přesného lití, kde se plní kovová forma přivedeným roztaveným materiálem pod určitým tlakem. Tento druh lití se dále rozděluje na dvě skupiny: vysokotlaké a nízkotlaké lití. [6]

Vysokotlaké lití spočívá ve vtláčování roztaveného kovu do dutiny kovové formy tlakem pístu hydraulického stroje. Podle velikosti stroje lze vyvinout tlaky od 2 do 500 MPa. [10] Vysokotlakým litím je dosahováno velmi přesných rozměrů a výsledný odlitek se nemusí po vyjmutí příliš upravovat. Nevýhodou je materiál, ze kterého je forma vyrobena, protože musí odolávat velkým tlakům a zároveň musí být vysoce tepelně odolná. Příklad stroje pro vysokotlaké lití je uveden na Obrázku 6.



Obrázek 6: Stroj pro vysokotlaké lití [10]

Nízkotlaké lití spočívá v působení malého tlaku na hladinu kovu plynem. [10] Kov je do formy vháněn přes trubici ponořenou v tavenině. [10] Dutina formy je zaplňována od svého dna, čímž je zajištěno klidné plnění formy a tím i lepší vnitřní kvalita odlévaného materiálu. Tlak je pouze závislý na překonání odporů proti působení toku kovu do formy. [10] Výhodou je tedy vnitřní

kvalita odlitků. Hlavní nevýhodou je pomalé plnění, což způsobuje malou produktivitu metody. Tlakové lití využívá například firma Alupress s.r.o., která tímto způsobem odlévá hliníkové výrobky. [11]

Vytavitelný model

Hlavní technologií, kterou se má tato práce zabývat je metoda lití na vytavitelný model. Rozměrové kvality je u odlitků nejlépe dosahováno pomocí podskupiny slévání nazývajících se „přesné lití“. Ačkoliv je metoda velmi náročná na optimalizaci a vyžaduje vysokou preciznost, stává se uplatnitelnou v široké škále průmyslových odvětví. Automobilový průmysl, zbrojní průmysl, letadlová technika, spotřebiče, zdravotnictví atd. jsou dominantní oblasti, kam putují výsledné produkty ze slévárny s technologií vytavitelného modelu. Příklad odlitků je uveden na Obrázku 7. Největší nevýhodou této výroby je však sklon odlitků k vadám (reakce skořepiny s kovem, řediny, staženiny apod.). Proto je třeba výrobní proces optimalizovat a zároveň tím minimalizovat výrobní ztráty. Příklad vady typu staženina je na Obrázku 8.

V následujících kapitolách bude představena metodika této technologie slévání, její historie a praktická aplikace.



Obrázek 7: Odlitky ze slévárny vytavitelného modelu



Obrázek 8: Staženina

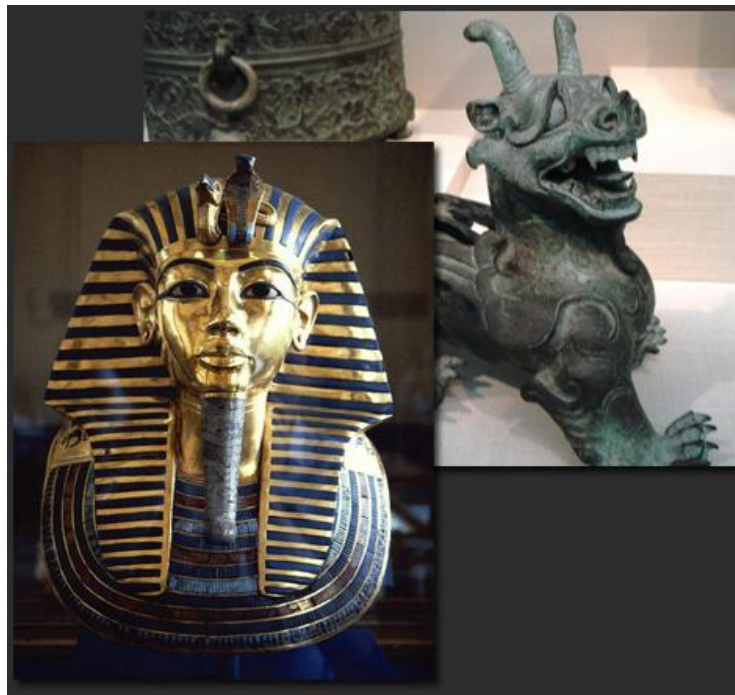
Další technologie

Ve světové výrobě je použito i minoritně zastoupených způsobů odlévání, jako je např.: odstředivé lití nebo lití na spalitelný model. [7] Tyto technologie nejsou předmětem bakalářské práce.

2.1 Metodika technologie vytavitelného modelu

2.1.1 Historie

Samotná metoda je velmi dlouho známa. V dávných dobách byl používán včelí vosk, který se obaloval za pomoci hlíny (bláta) a následně po vypálení pomocí ohně se do skořepin odléval bronz. Hlavními oblastmi využití byla Mezopotámie, Egypt, Čína, kde byly tímto způsobem vyráběny umělecké předměty. [12] Příklady takových děl pak uvádí Obrázek 9.



Obrázek 9: Historické odlitky – metoda vytavitelného modelu [12]

Dlouhá staletí se pak využívalo prioritně metody lití do písku, kde parametry odlitků této výroby byly dostačující pro jejich primární aplikace. Návrat metody vytavitelného modelu do praxe nastal až v pozdních letech dvacátého století, v období druhé světové války, kde se zvýšila poptávka po přesných tvarech z různých druhů speciálních slitin, které nebylo možno klasicky obrábět. [12] Právě z válečných potřeb se rozšířil tento způsob lití do průmyslu. [12]

Dnešní moderní lití vytavitelného modelu se principálně neliší od dávných technik, technologie pouze reaguje na nové materiály a požadavky zákazníků, což vede k vývoji této technologie.

2.1.2 Princip technologie

Na začátku výrobního procesu je podána objednávka zákazníkem, která je zpracována obchodním oddělením a konstrukčním oddělením pro návrh odlitku a vhodné umístění vtokové soustavy. U těchto fází je kladen důraz na správnou predikci ekonomické náročnosti samotné výroby a zároveň konstrukční složitosti odlitku (zaběhnutí, váha, počet odlitků na stromeček, nálitky apod. - tyto odborné termíny budou vysvětleny dále). Celý proces se poté přesouvá do výroby. Nejčastějším rozdělením výroby je do čtyř obecných stanovišť: Voskovna (2.1.2.1), Obalovna (2.1.2.2), Tavírna (2.1.2.3), Konečná úprava (2.1.2.4).

V následujících kapitolách budou popsány jednotlivá stanoviště procesu výroby odlitků metodou na vytavitelný model charakteristické pro firmu Kdynium a.s. Autor prošel celým výrobním procesem v rámci tříměsíční praxe ve firmě Kdynium a.s., kde se prakticky podílel na každém stádiu výroby. Autor měl dále možnost zdokumentovat proces pomocí fotografií, které jsou v kapitolách uvedeny. Tyto fotografie nejsou spojením sledu všech operací pro jeden výrobek, ale pro různé typy odlitků. Příklad odlitků je uveden na Obrázku 10.



Obrázek 10: Příklad odlitků z nízkouhlíkové oceli – metoda vytavitelného modelu

2.1.2.1 Voskovna

Výrobním procesem na voskovně je zajištěna příprava voskových modelů, které jsou následně montovány (lepeny) k vtokovým soustavám do tvaru tzv. stromečků. Pro lepší pochopení tématu je stromeček zobrazen na Obrázku 14.

Příprava vosku

Prvním postupem ve výrobě je příprava voskové hmoty. Hlavním účelem operace je získat homogenní kompozici vosku o předepsaném složení. [13] Voskové hmoty jsou ve firmě Kdynium a.s. používány dvě-syntetická a přírodní. Přírodní si firma sama vyrábí i recykluje, kde složení tohoto vosku je primárně tvořeno z parafinu, mikrovosků, a dalších složek. [13] Naopak syntetický vosk firma kupuje ve formě granulátu a vytavený vosk je posílán k recyklaci výrobci, protože během roztavení vosku je syntetický vosk zbaven některých aditiv a ztrácí potřebné vlastnosti.

Vosky lze od sebe snadno rozeznat, jelikož syntetický vosk má barvu zelenou a přírodní barvu černou. Příklady modelů z obou vosků jsou na Obrázku 11.

Přírodní vosk je narozdíl od syntetického tvrdý, křehký a má velkou teplotní roztažnost. [13] S tímto druhem vosku se nedá příliš dobře reagovat na složitost odlitků. [13] Největším plusem je jeho nízká cena.

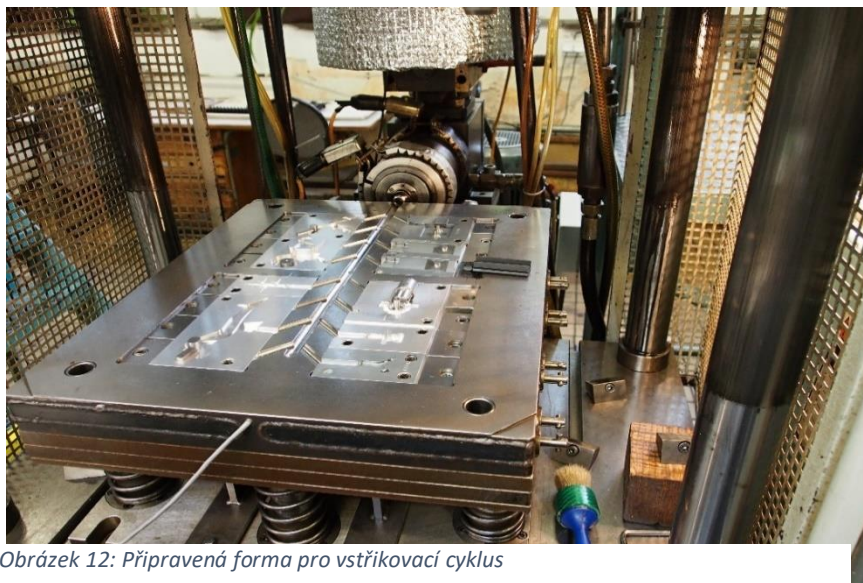


Obrázek 11: Model ze syntetického vosku (vlevo) a přírodního vosku (vpravo)

Zelený syntetický vosk je velmi variabilní pro různá použití, protože jeho složení lze dobře upravovat. Tento typ vosku je měkčí, houževnatější a má menší teplotní roztažnost než vosk přírodní. [13] Poslední jmenovaný faktor je velmi důležitý pro skořepinu. Vlivem vyšší okolní teploty se vosk roztahuje a tlačí na skořepinu, která následně může prasknout. Hlavní nevýhodou syntetického vosku je však jeho cena, která značně převyšuje cenu přírodního.

Výroba modelů

Po zhotovení kvalitní, homogenní voskové hmoty následuje výroba voskových modelů na vstřikovacích lisech. Tyto lisy fungují na základě hydraulických principů, kde do zařízení vstupuje roztavený vosk o teplotě 60-90 °C [13] a je pod tlakem vstřikován do kovové dvoudílné formy. Příklad formy je na Obrázku 12. Lisy mají zásobníky vosku, ze kterých je vosk veden do vstřikovacích trysek. Formy jsou primárně vyráběny z kovu. Rychle tuhnoucí vosky jsou během pár vteřin vyjmutelné z lisu po rozevření formy v místě dělící roviny jako hotové modely. Formu je třeba promazávat oddělovacím prostředkem, aby modely byly lehce vyjmutelné. [13] Výsledek procesu je na Obrázku 13.



Obrázek 12: Připravená forma pro vstřikovací cyklus



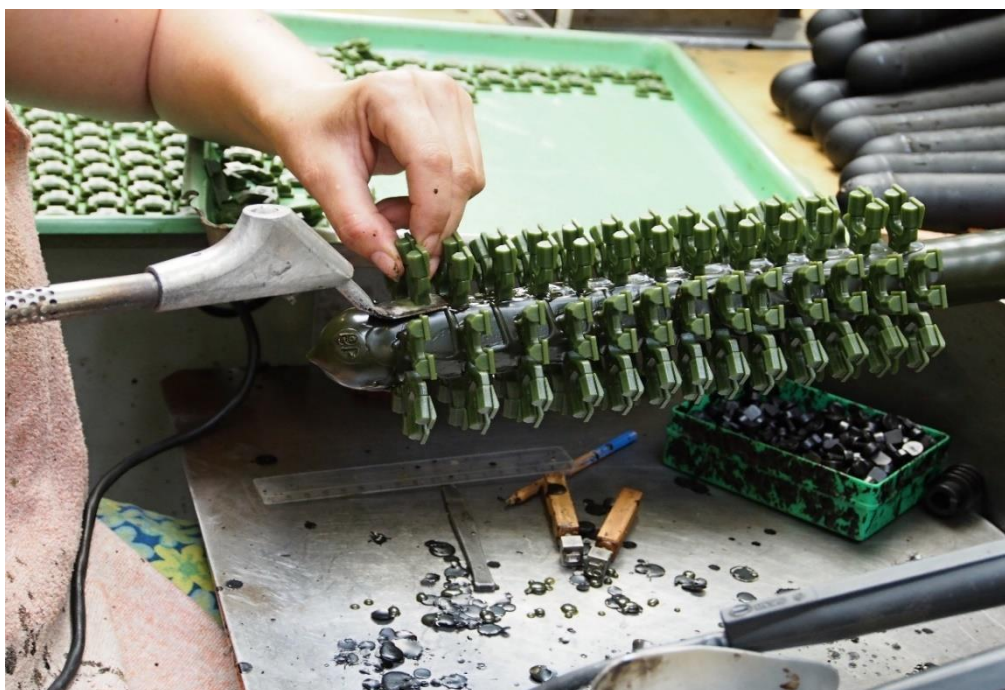
Obrázek 13: Hotový model připravený k vyjmutí z formy

Sestavení

Následující operací ve voskovně je sestavení stromečků. K voskovým modelům je připojena vtoková soustava, protože modely jsou z lisů získávány bez nich. Vtoková soustava je soubor vtoků, kterými je do dutiny formy přiváděn roztavený kov. Tyto soustavy jsou výsledkem výrobní činnosti, při které se vytváří vosková vrstva na kovovém držáku (kruhový, čtvercový apod.) se síťovým potahem tzv. „kůl“. Kovové držáky se namáčí ve voskové hmotě, dokud vrstva nedosáhne potřebné tloušťky. [13]

Vtokové soustavy jsou předem připraveny a mají většinou jednotnou podobu, pokud se nejedná o speciální odlitek. Správné umístění modelů na stromeček je velmi důležitou fází výroby z návrhového i praktického hlediska. Návrh musí zohlednit umístění tak, aby došlo k dolití veškerých modelů a zároveň bylo zaplnění stromečku co největší. V technologickém předpisu výroby je dáno umístění modelů na vtokovou soustavu, počet řad, dílů na jeden stromeček, vzdálenost mezi jednotlivými díly dle jednotlivých zakázek a praktických zkušeností.

Vtoková soustava je včetně nálitků a modelu k sobě přitavena pomocí natavení vosku nebo je lepena speciálními přípravky. Proces sestavení stromečku je na Obrázku 14. Výsledný stromeček je kontrolován vizuálně aby neobsahoval vady např. malé díry ve spojích.



Obrázek 14: Umísťování modelů na stromeček

2.1.2.2 Obalovna

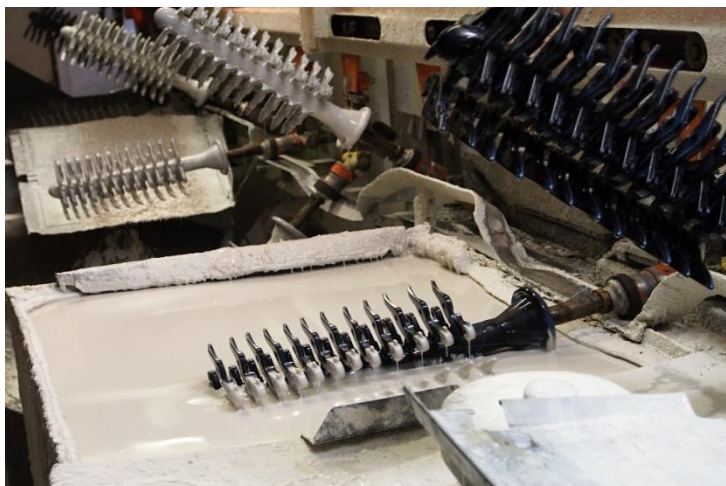
Principem metody vytavitelného modelu je odlévání kovů do keramických forem. Obalovna je tedy pracovním místem, kde se na voskovém modelu vytváří keramická skořepina (také nazývána „obal“). Skořepina poskytuje metodě vytavitelného modelu rozsah z hlediska odlévaného materiálu a je podle zkušeností firmy Kdynium a.s. jedním z nejdůležitějších parametrů celé výroby. Výhodou této operace je velmi snadná automatizace prostřednictvím robotiky. Výsledný obal po zbavení voskového obsahu funguje jako jednodílná forma, která se po vlití a zchlazení kovu mechanicky odstraní.

Principem vytvoření keramického obalu je vázání tuhé substance různé zrnitosti organickými sloučeninami křemíku jako pojiva. [14] Během sušení je skořepina vytvrzována a výsledný obal je částečně odolný vůči chemickému i fyzikálnímu působení. [14]

Obalovací směs (Pojivo)

Obalovací směs musí mít správnou konzistenci, aby skořepina dokonale kopírovala požadovaný tvar voskového modelu a zároveň poskytla potřebné vlastnosti při lití (pevnost, žáruvzdornost atd.). Automatizovaný proces namáčení do obalovací směsi je na Obrázku 15.

Základní složkou je kapalné pojivo, které může být různého druhu. Nejčastěji se jedná o alkosoly nebo více používané hydrosoly SiO_2 . [14] Hydrosolové pojivo pomaleji schne, ale obal není náchylný k praskání, je ekologičtější a potřebuje menší vlhkost při sušení (50-55 %). [14] Alkosolový obal je více náchylný k praskání, což je způsobeno jeho výhodou rychlého schnutí. Naopak tento druh obalu potřebuje vysokou vlhkost při sušení (60-70 %). V dnešní době se alkosol spíše nepoužívá. Výsledná obalovací směs je zhotovena po přidání žáruvzdorného plnidla tzv. moučky. [14] Tyto druhy obalovacích směsí se používají ve firmě Kdynium a.s. Dnes jsou známy i jiné druhy pojiv a v jiných firmách se tedy druh pojiva může lišit.



Obrázek 15: Automatizované namáčení stromečků v obalovací směsi

Posyp

Voskový stromeček je ponořen do obalovací směsi a dokončen posypem. Ve spojení s obalovací směsí tvoří pevnou a dostatečně prodyšnou formu vhodnou pro lití. [14] Nejčastěji se používá křemenný písek, ale v různých aplikacích může dojít k použití jiného posypového materiálu.

Nanesení obalu

Samotná forma je složena z několika vrstev. Vrstvy jsou rozděleny podle pořadí, v jakém jsou postupně nanášeny. První (lící) obal je nanášen přímo na voskový materiál a je pro něj použit jemný posyp (vysoká zrnitost na mm^2), aby byla zajištěna povrchová jakost odlitku a zároveň došlo k dobrému přilnutí a okopírování tvaru modelu. [14] Na první obaly je do obalovací směsi přidáván zirkon pro zlepšení vlastností a žáruvzdornosti keramické skořepiny. Příklad lícího obalu je na Obrázku 16. Další vrstvy jsou nazývány zesilovacími. Obalovací směs je používána stejná jako u prvního obalu, avšak u posypového materiálu se zmenšuje jeho zrnitost na mm^2 s rostoucím počtem vrstev. Stromeček po zesilovacích obalech je uveden na Obrázku 17. Počet obalů se u jednotlivých výrobků může pohybovat v intervalu 6 až 10, u velkých odlitků může být počet vrstev i 12 a více. [15]



Obrázek 16: Stromečky po prvním obalu



Obrázek 17: Stromečky po sedmém obalu

Obaly jsou nanášeny buď ručně nebo automaticky pomocí robotické linky. Nejdříve je ponořen celý stromeček v obalovací směsi a poté je gravitačně spouštěn posyp nebo se vibračně rozprašuje do vzduchu a posyp je přichycován na stromeček. Po nanesení obalu je vždy třeba stromeček určitou dobu sušit (v řádu hodin), aby byla vrstva vytvrzena a výsledná forma měla dostatečnou pevnost. [15]

Po aplikaci všech obalů a dobrém vysušení jsou stromečky vizuálně kontrolovány. Schválené kusy jsou poslány na další výrobní stanoviště-tavírnu.

2.1.2.3 *Tavírna*

Tavírna je místem, kde je připravována skořepina a zároveň výsledný materiál odlitku do požadovaných vstupních parametrů. Na konci procesu v tavírně dojde k vlití kovu do skořepiny a vzniká odlitek. Proces výroby na tavírně je celkově energeticky náročný.

Vytavení skořepin

Úkolem vytavení je zbavování skořepiny voskové výplně. Vytavení skořepin má spoustu možností, kde nejčastějším postupem je použití vodní páry. Tato činnost je uskutečněna v boilerklávech (popř. autoklávech). Stromečky jsou umístěny na kovové držáky upevněné k vozíku, tak aby vosk mohl volně vytékat. Tento vozík je následně zasunut do boilerklávu a pára je pod velkým tlakem a teplotou vstříkována do forem. [16] Zde je přítomný technologický problém dvou různých materiálů. Vosk má velkou teplotní roztažnost, kdežto skořepina velmi malou, proto je třeba vytavit vosk velmi rychle. [16] Pokud vytavení probíhá příliš pomalu, je vosk pod vlivem teploty roztahován, tlačí na skořepinu, není vytvořena dilatační spára mezi skořepinou a voskem a skořepina pod následným tlakem praská. Problém je spojený i s vysokou teplotou okolí a byl by zajímavým námětem pro další absolventskou práci. Při vysoké okolní teplotě je vosk roztahován a skořepina praská i při jinak správných parametrech vytavení.

Boilerklávy jsou velké parní kotle, do kterých jsou umísťovány vozíky s již obalenými stromečky. [16] Celé pracoviště je zobrazeno na Obrázku 18. Po spuštění vytavovacího cyklu je ze stromečků většina vosku odstraněna. Vytavovací tlaky se pohybují v rozmezí 0,3- 0,6 MPa



Obrázek 18: Pracoviště pro vytavování

při teplotách 130-160 °C. [1] Vosk stéká do odkapávacích van a je recyklován. Vytavené stromečky jsou následně vizuálně kontrolovány, skladovány a zajištěny proti vnikání nečistot, prachu apod. Pokud skořepina během vytavování praskne, tak je možné ji ve většině případů opravit pomocí speciálních lepicích hmot. [5]

Formování skořepin

Po vytavení skořepin je připraveno formování pro jednotlivé tavby. Podle předem plánované výroby jsou skořepiny formovány (skládány) na vozíky v určitém počtu a vzdálenostech. Všechny tyto informace jsou uvedeny ve výrobních kartách nebo technologických předpisech. Vozíky jsou vyplněny žáruvzdorným materiálem, aby nedocházelo k ovlivnění chladicího procesu odlitku, které by mohlo způsobit nižší jakost výsledného materiálu (odlitku). [17]

Vypalování keramických skořepin

Poslední operací před litím kovu do forem je vypálení keramických skořepin ve vypalovacích pecích. V praxi jsou nazývány tyto pece také jako pece žíhací, proto se můžeme setkat se synonymem vypálené skořepiny „vyžíhaná skořepina“.

Hlavními úkoly jsou:

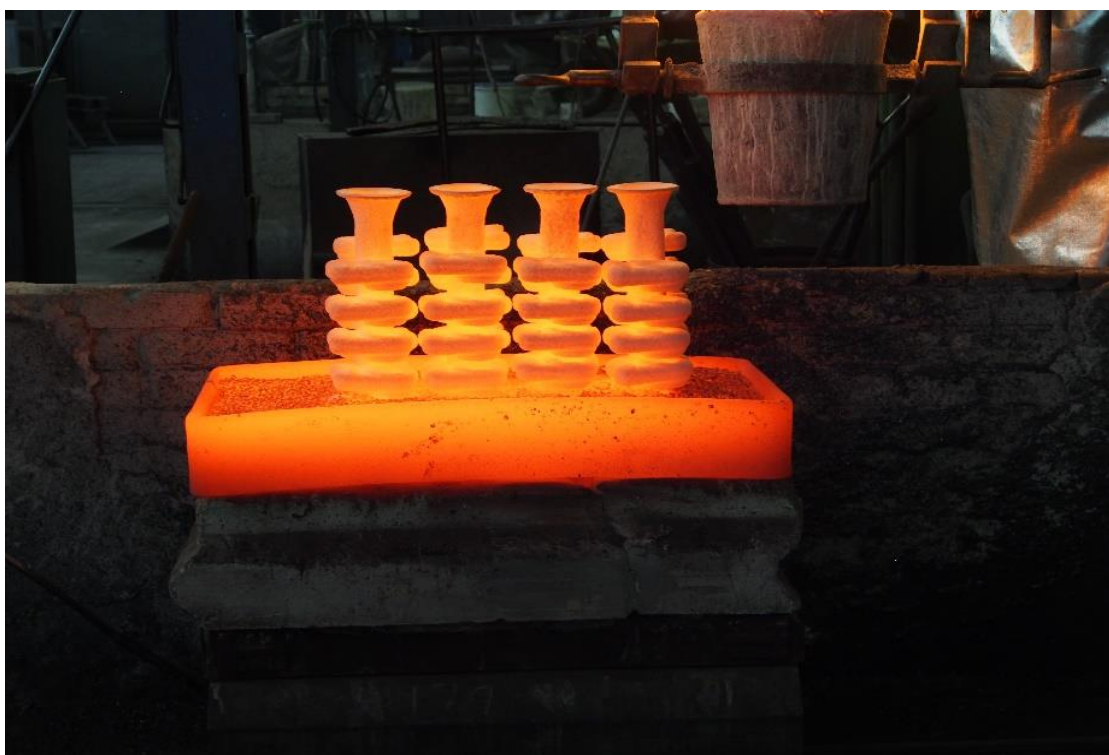
- odstranění zbytků vosku po vytavování (vyhoření voskové hmoty) a těkavých látek
- zpevnění formy
- zlepšení licích podmínek pro kov (zabíhavost)

Vypalování je uskutečněno v dlouhých tunelových pecích složených z různě vyhřívaných pásem. Plášť je tvořen plechovým krytem a vnitřek je vyzděn žáruvzdornými cihlami. [17] Vytápění je zajištěno různými technikami. Nejčastěji jsou pece vytápěny elektricky pomocí elektrického odporu ve spirálách, kde teploty v pecích dosahují až 1000 °C. [17] Pohyb vozíků je uskutečněn většinou automaticky pomocí pneumatických zařízení. Vozíky jsou posunovány na kolejích až do prostoru lití. Naformované skořepiny před žíhací pecí jsou k vidění na Obrázku 19. Po projetí skořepiny celou pecí formovač dostává pokyn pro vyjetí vozíku z pece a ten je přistaven k licí plošině. Pro správné vypálení skořepiny je důležité po celou dobu dodávat dostatečné množství kyslíku do prostoru pece za účelem podpory hoření. [1]



Obrázek 19: Naformované skořepiny směřující do vypalovací pece

Před vypálením má skořepina malou pevnost, proto je jí třeba zpevnit. Pokud projde křemen změnou fáze, dojde ke zpevnění celé skořepiny. Pro docílení tohoto jevu, je důležité zajistit rovnoměrný ohřev forem. Amorfnní forma vazné vrstvičky SiO_2 je převedena na formu krystalickou. [1] Tato přeměna je ukončena při teplotě 800 °C [1], kdy proběhne překrystalizace křemene beta na alfa. Tato fáze má nejvyšší pevnost a nejmenší roztažnost. [1] Zároveň při správném vytavení skořepiny nedochází k naplynění kovu při lití, což je nežádoucí jev, který má za následek četné vady na odlitcích. Ohřevem skořepin je zároveň podpořena zabíhavost kovu do dutin formy, kdy teplota skořepiny je nejdůležitějším faktorem pro správné zaběhnutí do dutin formy. [18], [1] Příklad správně vyžíhaných skořepin je na Obrázku 20.



Obrázek 20: Správně vypálené skořepiny připravené k lití

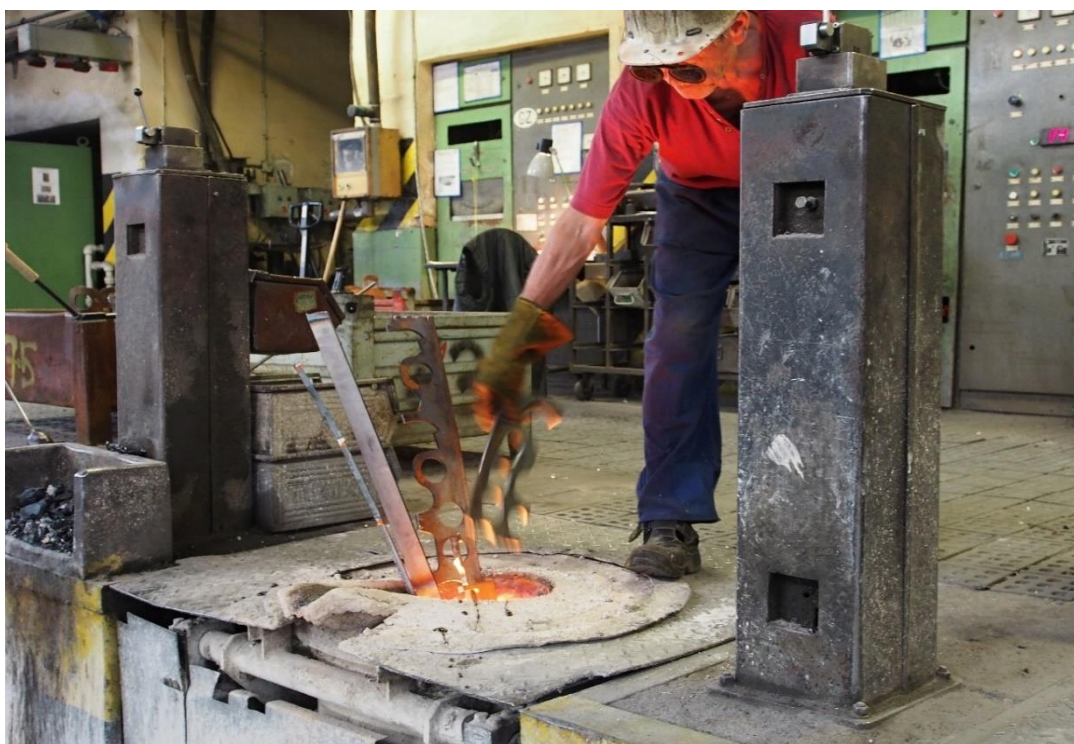
Dalším důvodem vypalování je zbavování nežádoucích látek ve skořepině. Zbytky vosku se během vytavování v peci spálí. Popeloviny jsou minimální (0 až 1 % původního obsahu [1]), ale je třeba sledovat jejich podíl a strukturu za pomoci laboratorních zkoušek. Další nežádoucí látky jsou těkavé alkoholy, které vznikají při použití alkosolové obalovací směsi. [18]

Skořepina a její správná příprava je jedním z nejdůležitějších faktorů celé výroby, proto je třeba dbát na dodržování technologických postupů ve výrobě a čistotu práce.

Tavba a lití

Tavení je operace, při které dochází k natavení základního materiálu a přidáním vhodných legur je dosaženo chemické struktury požadovaného materiálu pro odlitek. Zároveň se za vhodných opatření dezoxiduje kov, stahují nečistoty, u litin se může aplikovat očkování, modifikace apod. Připravený kov se vlévá do vyžíhaných skořepin, následně chladne a krystalizuje (tuhne).

K natavení materiálu dochází v tavících pecích. Proces tavení je na Obrázku 21. Tavící pec je nejčastěji založena na principu indukční cívky [1], kde je materiál rychle natavován. Tavící pec má buď kyselou, zásaditou nebo neutrální vyzdívku [19], což má velký vliv na chování materiálu při samotném tavení. Například při použití zásadité vyzdívky se Si v tavenině snižuje, kdežto naopak při použití kyselé se Si zvyšuje. [19] Pec se skládá z hlavních částí: cívka, kelímek, licí límec, ovládací panel, sklápěcí zařízení apod. Materiál, který v peci vzniká, je složen ze vsázkového materiálu, legur a dohazovaného materiálu (stejně chemické složení jako výsledné). Během tavení mohou vznikat technologické problémy. Například kelímek pece během používání ztrácí základní materiál a zvětšuje se. [19] Zároveň může být například základní vsázka špatně zanalyzována a aktuální chemické složení v peci se může značně lišit. Všechny tyto parametry výroby musí zkušený pracovník slévárny znát a podle toho s materiálem zacházet a zároveň být schopný tyto situace vyřešit.

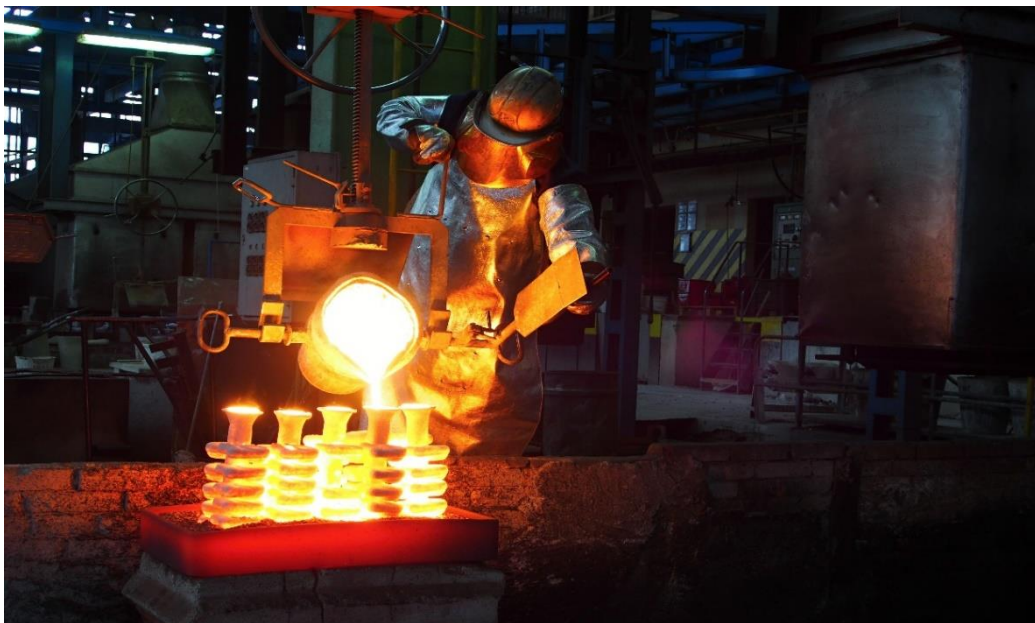


Obrázek 21: Tavič připravující tavbu pomocí šrotu v tavící peci

Základní vsázkový materiál obsahuje legující prvky do určitého obsahu (např. maximální uhlík do 0,2 %), podle něhož je následně řízena legovací operace. Po přidání legujících prvků se odejme malý vzorek z taveniny, který je poslán k analýze a zpětně je zasláno chemické složení aktuální tavby. [19] Podle výsledků jsou „dohozeny“ finální legury a materiál je připraven k lití. U tohoto procesu se však nejčastěji využívá největší výhody slévání: maximální využití materiálu. Vtokové soustavy, zmetky, odřezky, nálitky z předchozích taveb jsou vhazovány jako vsázkový materiál, protože mají již správné chemické složení a pouze se doplní v potřebném množství.

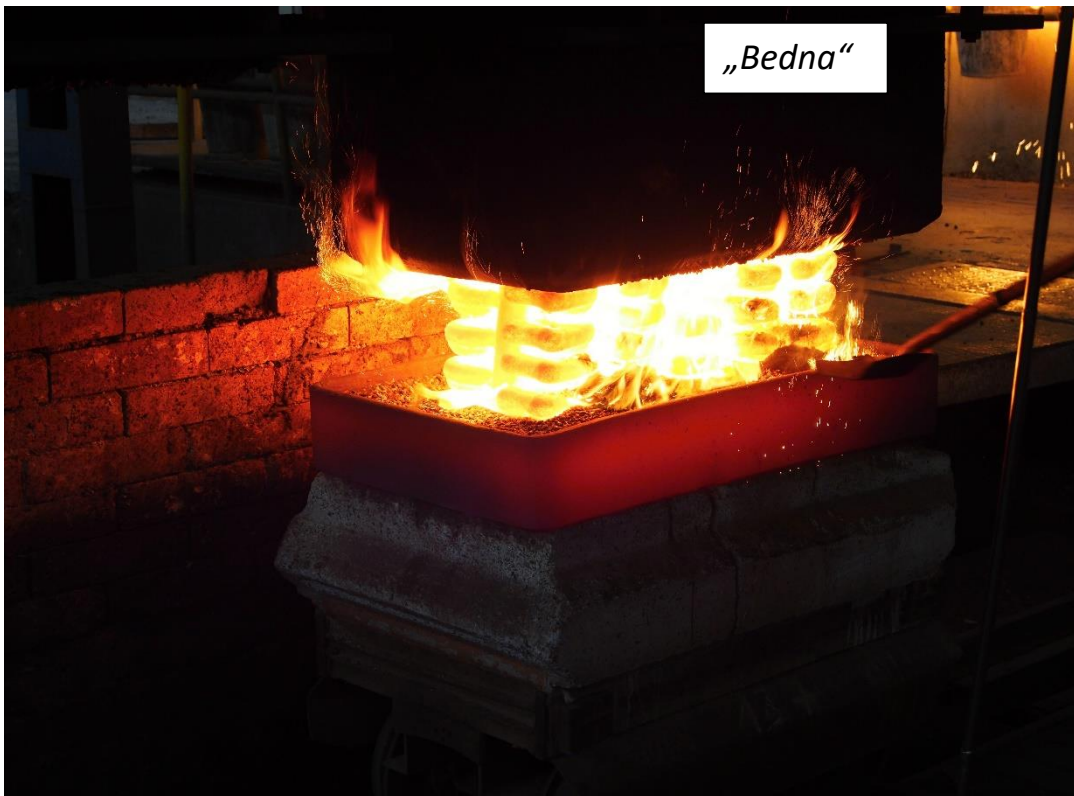
Velmi důležitým parametrem je v tavírně i teplota lití samotného kovu. Teplota je orientována podle větve likvidu daného materiálu. S každým přidáním legujícího prvku se teplota likvidu mění a nelze ji vždy přesně určit. Tématika je proto hodně problematická a každá slévárna ji řeší spíše experimentálně. Teplota lití by se měla pohybovat 50-60 °C nad teplotou likvidu. [20] Zároveň je však třeba počítat s tepelnými ztrátami během manipulace se žhavým kovem a podle toho orientovat teplotu kovu v peci. Pokud se tyto zákonitosti nerespektují, dochází k utuhnutí kovu v lící pánvi a jejímu zničení. Na druhou stranu, pokud je teplota taveniny příliš vysoká, dochází k naplynění kovu a tím k nežádoucím charakteristikám materiálu.

Při samotném lití je zapotřebí velké zručnosti slévače, který musí být schopen vhodnou rychlostí nalít všechny naformované skořepiny tak, aby nedocházelo k vylití kovu, nedolití formy, příliš rychlému lití nebo naopak nedošlo k vychladnutí skořepin. Lící proces je uveden na Obrázku 22.



Obrázek 22: Vlévání kovu do vyžíhaných skořepin

Po dolití je podle druhu materiálu zaveden doplňující postup chladnutí. Některé materiály vyžadují uhlíkový zásyp, který se aplikuje na hrdlo vtokové soustavy ihned po dolití. Zásyp vyvolá exotermickou reakci s kyslíkem a podporuje tak existenci tepelného uzle ve vtokové soustavě, čímž se vyvaruje staženinám v odlitku. [20] Naopak některé odlitky vyžadují chladnutí v ochranné atmosféře, která se vyvolá izolací od okolního vzduchu a vypálením kyslíku v izolované „bedně“. [20] Proces chladnutí v ochranné atmosféře je zobrazen na Obrázku 23.



Obrázek 23: Chladnutí odlitých skořepin v ochranné atmosféře

Následně po dokončení lití a zchladnutí odlitků, jsou poslány stromečky na dokončovací operace. Z popsaného procesu je patrné, že výroba na tavírně je velmi náročná po technologické, energetické i po fyzické stránce pro pracovníky.

2.1.2.4 Konečná úprava a kontrola

Hlavními úkoly procesu jsou:

- Odstranění keramiky
- Odstranění nálitků, vtokových soustav
- Povrchová úprava
- Kontrola vnějších a vnitřních vad
- Apretace a distribuce

Pro hrubé odstranění keramické skořepiny je využíváno vibračních strojních zařízení, do kterých je upnut stromeček a vibracemi se křehká keramika odstraní. Rozdíl stromečků před a po vibračním odstraněním keramiky je uveden na Obrázku 24. Následně jsou stromečky paletovány a jsou poslány na úplné odstranění zbytkové keramiky. Přímo ve firmě Kdynium a.s. se tento proces realizuje pomocí louhování v roztoku NaOH.

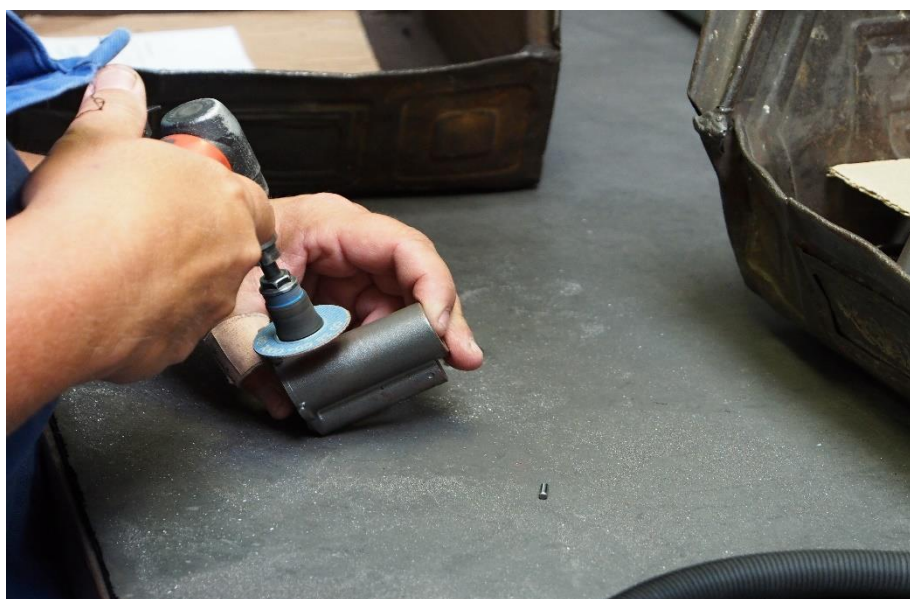


Obrázek 24: Stromečky před vibračním odstraněním keramiky (vlevo) a po jejím odstranění (vpravo)

Dále jsou odstraňovány nálitky a vtokové soustavy za pomoci odřezávání, odklepávání apod. Tyto části vtokové soustavy jsou velmi důležité, protože jak již bylo zmíněno se využívají jako vsázkový materiál do pecí.

Po odstranění vtokových soustav jsou odlitky vyhodnoceny kontrolními stanovišti (zjišťují se vnitřní i vnější vady). Vnitřní vady se detekují zejména rentgenovými a ultrazvukovými zkouškami. Povrchové vady se kontrolují kapilárními, vizuálními a magnetickými zkouškami. Na základě těchto zkoušek jsou odlitky rozděleny dle směrnic firmy Kdynium a.s. na dobré, přípustné, opravitelné nebo neopravitelné. Většina odlitků se pak dále tepelně zpracovává.

Povrchové kvality se obecně v metodě vytavitelného modelu dosahuje velmi snadno i bez dalších úprav. Jak již bylo uvedeno, tak samotná kvalita povrchu je závislá na zrnitosti prvního obalu stromečku. [1] Po dolití je však žádoucí odstranit všechny nečistoty, opravitelné vady a zabrousit požadované plochy. Nečistoty po louhování, tepelném zpracování apod. se odstraňují pomocí tryskačů s abrazivy. Úprava ploch a oprava vad je nedílnou součástí slévárny. Používá se různých stolních, ručních brusek pro dosažení požadovaných drsností dle dokumentací. Pro opravu vad se používá navařovací technika, zabrušování, případně je třeba dané problematické místo konzultovat se zákazníkem. Proces ručního broušení je na Obrázku 25.



Obrázek 25: Broušení ploch při konečné úpravě odlitku

Všechny tyto závěrečné kroky výroby jsou doprovázeny doplňkovými pracemi jako je např. obrábění, kontrola rozměrů apod. Pokud odlitek prošel všemi operacemi a nebyl vyřazen pro nějaký nedostatek, pak je vhodný k distribuci. Cesta odlitku od podání objednávky zákazníkem až po výsledný produkt je náročná a optimalizace procesu může trvat rok i déle. Optimalizace odlitku pro sériovou výrobu je realizována nejdříve výrobou zkušební formy a montáží zkušebních stromečků. Jakmile výsledný produkt dosáhne požadovaných kvalit, je zavedena sériová výroba a odlitky se kontrolují důkladně jen v určitých množstvích nebo náhodně. Způsob a četnost kontroly je předepsána pro každý výrobek jednotlivě.

3 Materiálové spektrum pro metodu vytavitelného modelu

Požadované kvality odlitku vyrobeného metodou vytavitelného modelu (dále je MVM) lze dosáhnout pouze na základě dostatečných znalostí a zkušeností v oblasti technologie, která byla popsána v předchozích kapitolách. Technologické postupy však nelze aplikovat na všechny druhy materiálů stejně. Je tedy třeba odlišovat materiály nejen z hlediska technologické zpracovatelnosti, ale také chemického složení a mechanických vlastností.

Materiály použité pro MVM musí plnit aplikační požadavky zákazníka mezi které patří: tvrdost, pevnost, houževnatost, svařitelnost, prokalitelnost apod. Např. pokud je požadováno svaření součásti po jejím zhotovení s jiným dílem, nelze použít ocel s vyšším obsahem uhlíku než 0,2 % při standartních postupech svařování. [7]

Materiály pro výrobu odlitků metodou vytavitelného modelu jsou nejčastěji oceli, litiny, neželezné kovy a jejich slitiny (např. hliník, hořčík, zinek apod.). [3]

Oceli

Ocel je slitina železa, uhlíku, síry, fosforu a jiných prvků, kde je podíl obsahu uhlíku nižší než 2,11 % a je vylučován ve formě karbidu železa Fe_3C . [21] Oceli používané pro odlitky jsou specifické označením, které začíná písmenem G.

Oceli na odlitky jsou ve většině případů podeutektoidní (nachází se v oblasti diagramu Fe- Fe_3C pod hranicí eutektoidního bodu-pod 0,77 % obsahu C). Oceli nadeutektoidní (oblast nad eutektoidním bodem v diagramu Fe- Fe_3C neboli vyšší obsah C než 0,77 %) se odlévají velmi málo nebo vůbec. Kompletní diagram Fe- Fe_3C a jeho vysvětlení uvádí např. [21].

Oceli na odlitky jsou z pohledu technologie slévání méně výhodné než např. litiny a to z důvodů vysoké teploty lití (až 1600 °C), velkého smršťování (až 2,4 %) a stahování (6-7 %). [3] Výsledné vlastnosti ocelového odlitku jsou také ovlivněny podmínkami tuhnutí, zejména rychlostí odvodu tepla. [22] Různá rozpustnost prvků v tuhé fázi je příčinou výsledné heterogenity materiálů. Největší podíl na heterogenitě mají síra, kyslík, fosfor, ale také uhlík. [22]

V současné době jsou pro MVM ve firmě Kdynium a.s. nejvíce používané uhlíkové, austenitické, austeniticko-feritické oceli. Firma výhledově uvažuje o zařazení oceli G22NiMoCr5-6 do svého výrobního portfolia. Ocel je i předmětem této bakalářské práce a bude popsána v další kapitole.

Celkové technické dodací podmínky pro ocelové odlitky uvádí ČSN EN 1559-2.

Litiny

Litina je slitina železa, uhlíku, křemíku, manganu a dalších prvků, kde podíl obsahu uhlíku činí minimálně 2,11 %. [22] Tento druh slitiny se vyskytuje v mnoha modifikacích a může krystalizovat buď podle metastabilního rovnovážného diagramu Fe-Fe₃C nebo podle stabilního diagramu Fe-C (železo-grafit). [21]

Ve slévárenském průmyslu jsou obecně nejvíce používány litiny, které krystalizují podle stabilního rovnovážného diagramu Fe-C. Jedná se o litiny grafitické, kde grafit podle typu vyloučení získává různé modifikace. [22] Firma Kdynium a.s. se v oblasti litin orientuje na litiny grafitické a to převážně litiny s kuličkovým grafitem (např. EN-GJS-600-3).

Hliník a jeho slitiny

Hliník a slitiny hliníku jsou dnes velmi často používaným a důležitým konstrukčním materiálem. K jeho hlavním přednostem patří nízká měrná hmotnost a poměrně dobrá pevnost. Tu je možno zvýšit pomocí tepelného zpracování (tzv. vytvrzování) nebo legování. [22] Nejčastěji se však jedná o kombinaci těchto způsobů. V oblasti metody vytavitelného modelu je hliník využíván zejména v leteckém, elektrotechnickém a automobilovém průmyslu. [23]

Nejčastější slévárenské slitiny hliníku: [22]

- Binární siluminy-slitiny Al-Si
- Speciální siluminy-slitiny Al-Si s přísadou dalších prvků (např. Ti, Zn, Ni apod.)
- Duraly-slitiny Al-Cu
- Slitiny Al-Mg (popř. s přísadou dalších prvků)

Lití hliníku a jeho slitin je částečně odlišné od lití železných kovů a nelze na něj používat stejné výrobní procesy jako na oceli nebo litiny. Tento neželezný kov vyžaduje speciální zařízení. Např. kvůli afinitě hliníku ke kyslíku je zapotřebí při tavení využívat odplyňovacího zařízení. Firma Kdynium a.s. se tomuto materiálu věnuje velmi okrajově. Firmy, které se litím hliníku na vytavitelný model zabývají, se nachází spíše na východě republiky (např. Alucast s.r.o.).

Jiné druhy materiálů

Jak již bylo zmíněno, tak MVM pokrývá velkou škálu materiálů. Dalšími materiály používané pro odlévání na vytavitelný model mohou být např. slitiny zinku, mědi, titanu apod. Jednou z nejvíce zajímavých položek jsou však materiály aplikovatelné v biomedicíně. Jedná se o slitiny, které jsou dobře slučitelné s lidským tělem a dobře odolávají vlivům každodenní činnosti. Jednou z těchto slitin je např. Oralium, které je obsaženo i v portfoliu firmy Kdynium a.s.

3.1 Ocel na odlitky G22NiMoCr5-6 (1.6760)

Materiál G22NiMoCr5-6 je vysokopevnostní, podeutektoidní ocel. Je vhodná jak pro slévárenské účely (tloušťky stěn odlitku mezi 30 až 500 mm), ale také pro aplikaci v technologii svařování. [24] Používá se pro výrobu vysoce namáhaných součástí v převodových systémech, součástí vozidel jako jsou autobusy, stavební stroje apod. [25]

Z důvodu náročnosti aplikací je vyžadována při dodávání výrobků z tohoto materiálu certifikace, která prokazuje schopnost dosažení mechanických vlastností dle normy. V německé normě je dokonce materiál rozdělen na dva typy (I a II) podle výsledných mechanických vlastností, které se dosahují různými parametry tepelného zpracování (viz dále). [24], [25]

Aktuálně není materiál v ČR příliš znám a jeho produkce je orientována spíše v zahraničí (Německo, Dánsko). Tento typ materiálu je kompletně specifikovaný v německé normě SEW 520, která udává vhodné aplikace, chemické složení a jeho odchylky, tepelné zpracování a mechanické hodnoty, kterých by měl materiál dosahovat.

Je známo, že v současné době se hlavně využívají dva systémy označování ocelí. Podle ČSN EN 10027-1 je popisovaná ocel označena G22NiMoCr5-6. První písmeno v názvu „G“ označuje ocel, která je určena pro výrobu odlitků. Druhý znak je stonásobkem středního obsahu uhlíku v oceli. Třetí (tentokrát skupina znaků) udává chemické značky legujících prvků. Následující čísla oddělena pomlčkami. Tato čísla jsou výsledkem středního obsahu daného prvku v oceli vynásobeným o určitý koeficient dle již uvedené normy. [22]

Dále se může používat systém číselného označování dle normy ČSN EN 10027-2 (1.6760). První číslo (před tečkou) je hlavní číslo skupiny materiálu 1 = ocel. První dvojčíslí za tečkou udává číslo skupiny materiálu. Poslední dvě čísla (druhé dvojčíslí) je pořadové číslo oceli v dané skupině. [22]

3.1.1 Chemické složení

Je známo, že chemické složení je nejvíce ovlivňujícím parametrem vlastností oceli. Ovlivňuje nejen výslednou strukturu, mechanické a chemické vlastnosti, ale také možnost aplikovat materiál pro další technologie (např. svařování). Chemické složení definované normou SEW 520 pro materiál G22NiMoCr5-6 je uvedeno v Tabulce 1.

Tabulka 1: Chemické složení G22NiMoCr5-6 dle SEW 520 [24]

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
[%]	0,18	max	0,8	max	max	0,5	0,8	0,5
	0,24	0,6	1,2	0,015	0,005	1	1,3	0,7

Zákazníci však podle zkušeností firmy Kdynium a.s. vyžadují i modifikace z hlediska chemického složení (prvků, které norma SEW 520 neuvádí). Jedna z takových modifikací je předmětem sledování této bakalářské práce.

Obecně platí, že výsledného chemického složení je dosahováno legováním (přidáváním chemických prvků do roztaveného kovu v peci). Legování v praxi se ve většině případů neprovádí přidáváním čistých legur, ale různými feroslitinami (ferochrom, feromolybden apod.). Čistota těchto legur se může lišit podle možností výrobce. Dodávány jsou např. 60%, 30% feroslitiny, ale mohou být dodávány i jako 100% (99,999%) prvky. Způsob legování a samotná volba legur závisí většinou na požadované čistotě taveniny a vlivu doprovodných prvků v již zmíněných feroslitinách. [3]

Podle zkušeností autora bakalářské práce (dále jen BP) ve firmě Kdynium a.s. je při přípravě taveniny této oceli obtížné zvláště dodržení předepsaného obsahu síry (max. 0,005 %) a fosforu (max. 0,015 %). Tyto dva prvky mají velký vliv na výsledné mechanické vlastnosti materiálu. Oba dva snižují vrubovou houževnatost a celkově zhoršují mechanické vlastnosti materiálu, proto je jejich množství omezeno. [22] Pro výrobu tohoto materiálu je tedy třeba použít kvalitní počáteční vsázku, která obsahuje nízký podíl obou dvou prvků. Zároveň je třeba volit legury, které podíl těchto prvků nebudou příliš navyšovat, protože nekvalitní legury mohou obsahovat vysoký podíl síry nebo fosforu.

Pro dosažení opravdu nejvyšší jakosti v ohledu na chemické složení materiálu G22NiMoCr5-6, je třeba průběžně zbavovat taveninu nečistot, které by následně mohly působit jako vruby při zatěžování. Firma Kdynium a.s. k vytváření strusky na povrchu taveniny využívá nejen jemného prášku drceného skla, ale také pro tento materiál používá technologii argonování, kdy je do

taveniny přiváděn inertní plyn (argon), který pomáhá vázat veškeré nečistoty a přivádět je na povrch taveniny k jejich snadnému odstraňování. [26]

3.1.2 Tepelné zpracování G22NiMoCr5-6

Tepelným zpracováním se rozumí řízené využívání fázových a strukturních přeměn v tuhém stavu. Jeho cílem je získat požadované mechanické, technologické či jiné užité vlastnosti. [22] Veškeré tyto procesy jsou založeny na základě změn rozpustnosti prvků, fázových přeměnách, difuzních vlastnostech jednotlivých prvků apod., které vysvětluje např. [22].

Pro ocel G22NiMoCr5-6 je v německé normě předepsáno tepelné zpracování zušlechťováním. Zároveň je v normě pouze doporučeno před tímto krokem aplikovat normalizační žihání. [24] Žihání je tepelné zpracování, jehož cílem je snížení vnitřního pnutí, dosažení rovnovážnější jemnozrnné struktury a homogenity materiálu. Normalizační žihání je realizováno za účelem zjemnění austenitického zrna a zrovnoměnění struktury. Zušlechťováním je označováno tepelné zpracování, které realizuje kalení s následovaným vysokoteplotním popouštěním. Cílem kalení je dosažení nerovnovážných stavů ocelí a tím zvýšení tvrdosti, pevnosti a odolnosti proti opotřebení. Cílem popouštění je snížení vnitřních pnutí v materiálu z procesu kalení, zvýšení houževnatosti, které je doprovázeno snížením pevnosti materiálu. [22]

Celkově je tepelné zpracování v normě SEW 520 pro G22NiMoCr5-6 definováno ve dvou různých rozmezích, které následně rozděluje materiál na již zmíněné dva typy. Předepsané parametry tepelného zpracování jsou uvedeny v Tabulce 2.

Tabulka 2: Parametry tepelného zpracování pro G22NiMoCr5-6 [24]

	Typ	Teplota austenitizace [°C]	Kalící prostředí	Teplota popouštění [°C]
G22NiMoCr5-6	I	900-980	Není předepsáno („kapalina“)	560-610
	II			550-600

Norma však neuvádí některé důležité parametry tepelného zpracování (dále TZ), které ovlivňují výsledné vlastnosti materiálu. Například norma nspecifikuje časové výdrže na teplotách austenitizace nebo kalící prostředí, které je v normě specifikováno pouze jako „kapalina“. [24]

Firma Kdynium a.s. si v současné době nechává veškeré své odlitky, u kterých je to vyžadováno, tepelně zpracovávat externě. Pro úplnou definici parametrů TZ tedy využívá buď doporučení externích firem nebo na základě zkušeností technologa (popř. literatury) tyto parametry předepisuje.

3.1.3 Mechanické vlastnosti G22NiMoCr5-6

Mechanické vlastnosti jsou nejdůležitějším parametrem volby materiálu vůbec. Jsou to hodnoty, které musí vyhovovat pevnostním podmínkám dané aplikace (silovému zatížení), způsobu zatěžování, ale také musí být materiál schopen tyto aplikační požadavky plnit v různých teplotách. Nejčastěji jsou mechanické vlastnosti materiálů popsány v normách následujícími hodnotami [21] :

- Mez kluzu $R_{p0,2}$ (R_e) [MPa]
- Mez pevnosti R_m [MPa]
- Tažnost A [%]
- Tvrdost (značení podle způsobu zkoušky-viz dále)
- Hodnota nárazové práce při dané teplotě KV
- Přechodová teplota T_t [°C]

Jak již bylo zmíněno, tak materiál G22NiMoCr5-6 je v normě uveden ve dvou typech I a II. U obou typů materiálu jsou definovány odlišné hodnoty mechanických vlastností. Tyto hodnoty uváděné normou [24] jsou shrnuty v Tabulce 3.

Tabulka 3: Mechanické hodnoty G22NiMoCr5-6 [24]

	Typ	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	KV (20 °C) [J]	KV _{8=27 J=(T_t)} [°C]
G22NiMoCr5-6	I	min. 825	930-1080	10	min. 50	-50
	II	min. 950	1050-1200	10	min. 40	-30

Hodnotu tvrdosti norma SEW 520 neuvádí. Pro úplnou představu o jmenovaném materiálu lze podle převodních tabulek ČSN EN ISO 18265 pro oceli určené k zušlechťování převést hodnoty meze pevnosti na hodnoty tvrdosti. Ta by se měla orientačně pohybovat kolem hodnot 310 HBW až 330 HBW [27] v zušlechťovaném stavu a kolem 275 HBW až 310 HBW [27] v normalizovaném stavu. Zmíněná norma také uvádí, že převedené hodnoty se mohou značně lišit od hodnot experimentálně získaných. [27]

3.1.4 Analýza informací z dostupné literatury

Materiál G22NiMoCr5-6 není doposud obecně dobře znám, proto je zde značná rozdílnost informací dle různých zdrojů. Autor z toho důvodu zařazuje do BP porovnání tří vybraných zdrojů. Specifikace z těchto zdrojů jsou uvedeny v Tabulkách 4,5 a 6.

Zdroje:

- Zdroj 1: Norma SEW 520 [24]
- Zdroj 2: Dijkkamp (Nizozemský dodavatel ocelí) [25]
- Zdroj 3: Stavanger Steel AS (Norský dodavatel hutních materiálů) [28]

Tabulka 4: Porovnání specifikace chemického složení G22NiMoCr5-6 [24], [25], [28]

Prvek	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]
Zdroj 1	0,18	max	0,8	max	max	0,5	0,8	0,5
	0,24	0,6	1,2	0,015	0,005	1	1,3	0,7
Zdroj 2	0,2	0,8	1	-	-	0,65	1,1	0,6
Zdroj 3	0,2	0,8	1	max 0,02	max 0,01	0,65	1,1	0,6

Chemické složení jmenovaných zdrojů v Tabulce 4 se prakticky neliší. Zdroj 2 a Zdroj 3 uvádí pouze střední hodnoty obsahu chemických prvků v materiálu. Jediným a patrným rozdílem je povolený obsah síry mezi Zdrojem 1 a Zdrojem 3. Tato odchylka může ve výsledku způsobovat rozdíl mezi mechanickými vlastnostmi výsledných materiálů.

Tepelné zpracování a jeho celková doporučení všech jmenovaných zdrojů uvádí Tabulka 5.

Tabulka 5: Porovnání specifikace tepelného zpracování G22NiMoCr5-6 [24], [25], [28]

	Normalizace	Kalení	Popouštění	Pozn.
Zdroj 1	Doporučena	Ano (900-980 °C)	Typ I: Ano (560-610 °C)	
			Typ II: Ano (550-600 °C)	
Zdroj 2	Neuvedeno	Neuvedeno	Neuvedeno	
Zdroj 3	Neuvedeno	Ano (cca. 900 °C)	Ano (500-700 °C)	Zdroj 3 uvádí pouze obecné teploty tepelného zpracování

Z Tabulky 5 je patrné, že tepelné zpracování materiálu G22NiMoCr5-6 přesněji specifikuje pouze Zdroj 1. Zarážející položkou je rozdělení materiálu na typ I a II, kde posunutí popouštěcích teplot o rozdíl 10 °C, způsobuje podle Zdroje 1 rozdíl v mechanických vlastnostech o poměrně značné hodnoty. Mechanické vlastnosti udávané jednotlivými zdroji a jejich srovnání jsou uvedeny v Tabulce 6.

Tabulka 6: Srovnání mechanických vlastností G22NiMoCr5-6 zdroji [24], [25], [28]

	Typ	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	KV (20°C) [J]	T _t [°C] (KV=27 J)	Tvrđost HBW	Tvrđost HRC
Zdroj 1	I	min. 825	930-1080	10	min. 50	-50	-	-
	II	min. 950	1050-1200	10	min. 40	-30	-	-
Zdroj 2	-	700	900	14			280-310	-
Zdroj 3	-	700	900	14	min 42 *	-	280-310	-

* hodnota při 0 °C

Z Tabulky 6 vyplývá značná rozdílnost mechanických vlastností jmenovaných zdrojů pro stejný materiál. Zdroj 2 a 3 se ve většině parametrů shodují. Naopak Zdroj 1 uvádí značně vyšší hodnoty pevnosti, které jsou částečně kompenzovány hodnotou tažnosti. Jak je však obecně známo, tak hodnota tažnosti klesá s rostoucí pevností materiálu. [22] Tento rozdíl by mohl být tedy způsobem např. rozdílnými parametry tepelného zpracování, které nejsou u všech zdrojů pevně specifikovány.

Veškeré uvedené hodnoty v Tabulkách 4-6 budou dále diskutovány ve výsledcích experimentální části předložené BP.

4 Experimentální část

V experimentální části BP byly odlity vzorky ve firmě Kdynium a.s. z materiálu G22NiMoCr5-6 pro mechanické zkoušky (vzorky pro tahovou zkoušku, zkoušku rázem v ohybu dle Charpy a zkoušky tvrdosti) a také pro metalografické pozorování. Jako počáteční vsázka byl použit materiál od finské firmy OUTO KUMPU s chemickým složením uvedeným v Tabulce 7. Dále byly použity legury FeSi75 (75% obsah Si), FeCr010 (60% obsah Cr), Ni (99,999% čistota), FeMo (67,5% obsah Mo), Mn (99,999% čistota) a 100% uhlík C. Výsledné chemické složení tavby (evidenční číslo tavby 1258/6), které bylo stanoveno spektrální analýzou ve firmě Kdynium a.s. je v Tabulce 8.

Tabulka 7: Chemické složení počáteční vsázky pro výrobu zkušebních vzorků

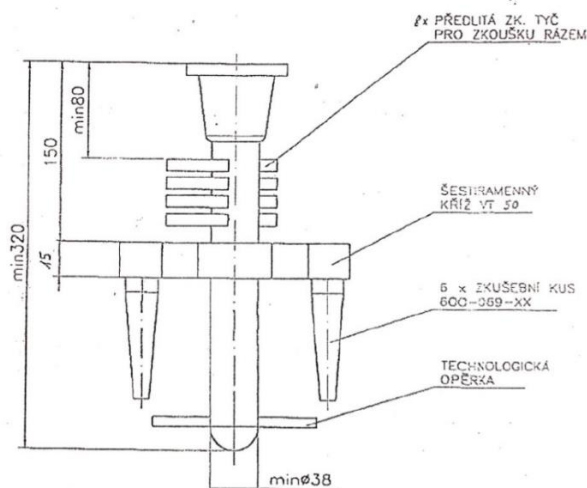
C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	Al [%]	Nb [%]
0,076	0,01	0,64	0,008	0,002	0,02	0,04	0,01	0,029	0,022

Tabulka 8: Výsledné chemické složení zkušebních vzorků

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	Al [%]	Nb [%]
0,24	0,48	0,94	0,013	0,005	1,01	1,23	0,52	0,017	0,020

Vzorky byly odlity na peci s neutrální vyzdívkou, indukčním ohřevem a doplňkovou technologií argonování do stromečků, pro jejichž výrobu byl použit syntetický vosk, hydrosolové pojivo a křemenný písek pro posyp. Celkem bylo odlito 110 kg kovu ve 13 stromečcích. Na každém stromečku je 6 kusů polotovarů pro výrobu tahového vzorku společně s vzorkem pro měření tvrdosti a 8 kusů pro zkoušku rázem v ohybu. Odlévaný stromeček je na Obrázku 26.

Vyrobené vzorky byly tepelně zpracovány podle požadavků firmy Kdynium a.s. (viz Tabulka 9) ve třech různých skupinách firmou Czechmetal (Olomouc).



Obrázek 26: Stromeček pro odlití zkušebních vzorků [2]

Tabulka 9: Tepelné zpracování zkušebních vzorků pro mechanické zkoušky

Kalící teplota	Teploty popouštění	Chladicí médium	Normalizace
950 °C	560 °C	Olej	Před kalením nebyla provedena
	580 °C		
	610 °C		

Tepelně zpracovaný materiál byl následně obroben firmou Kdynium a.s. na normalizované rozměry pro zkoušku tahem a rázem v ohybu. Výsledná podoba vzorků včetně základních parametrů je na Obrázku 27. Princip zkoušek bude vysvětlen dále.



Obrázek 27: Vzorky pro mechanické zkoušky materiálu G22NiMoCr5-6

Autor uvádí, že výroba tahového vzorku a vzorku pro měření tvrdosti pochází ze stejného „kuželu“ (Obrázek 26), proto byly jednotlivé vzorky řádně označeny, a tedy hodnoty pro jednotlivá čísla vzorků mohou být vzájemně porovnávána. Pro potřeby BP bylo použito množství vzorků, které uvádí tabulka Tabulka 10 a to vždy pro jeden režim TZ (celkem tři).

Tabulka 10: Počty vzorků

Typy vzorků	Použité
Tahové	10 ks
Pro zkoušku rázem v ohybu	15 ks
Pro měření tvrdosti	10 ks

4.1 Experimentální metody

V rámci experimentu bylo provedeno metalografické pozorování struktury (litého a tepelně zpracovaných stavů) a tři typy mechanických zkoušek se vzorky materiálu G22NiMoCr5-6. Byla provedena zkouška tahem, zkouška rázem v ohybu a zkoušky tvrdosti podle Brinella a Rockwella.

4.1.1 Zkouška tahem

V rámci experimentu byla provedena Zkouška tahem ocelí podle normy ČSN EN ISO 6892-1. Princip spočívá v postupném tahovém zatěžování vzorku až do jeho přetržení. Byl použit normalizovaný vzorek (poměrná zkušební tyč) s průměrem $\varnothing d_0=6$ mm a počáteční měřenou délkou pro krátkou tyč $L_0=30$ mm. Z této zkoušky budou vyhodnoceny následující charakteristiky [21]:

- Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \quad [MPa]$$

- Mez pevnosti R_m [MPa]

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [MPa]$$

Kde $F_{p0,2}$ [N] je síla na mezi kluzu, S_0 [mm²] počáteční plocha příčného průřezu zkušební tyče, F_m [N] maximální síla před přetržením zkušební tyče, L_0 [mm] počáteční délka zkušební tyče a L_u [mm] je konečná změřená délka tyče po přetržení.

Veškeré informace a definice měřených hodnot uvádí norma ČSN EN ISO 6892-1 nebo např. [21].

Zkouška byla provedena v laboratořích ČVUT Fakulty strojní na Karlově náměstí v Praze pomocí univerzálního trhacího stroje INSTRON 5582. Pracoviště je na Obrázku 28.



Obrázek 28: Pracoviště pro zkoušku tahem, FS ČVUT, Praha

4.1.2 Zkouška rázem v ohybu dle Charpy

Zkouška rázem v ohybu dle Charpy je mechanická zkouška, která vyhodnocuje odolnost materiálu proti křehkému porušení s měnící se teplotou. Odolnost proti křehkému porušení je schopnost materiálu odolávat vzniku křehkého lomu při dané teplotě. Spolu se snižující teplotou se tato schopnost materiálu zhoršuje.

Během experimentu byla provedena zkouška normalizována podle ČSN ISO 148. Princip zkoušky spočívá v dynamickém přeražení normalizovaného vzorku s vrubem, kde je následně sledována hodnota spotřebované energie během přeražení (tzv. nárazová práce KV). Pokud je tato zkouška provedena alespoň při 7 různých teplotách (pro každou min. 3 vzorky), pak lze vyhodnotit tzv. přechodovou křivku. Přechodová křivka je závislost nárazové práce na teplotě $KV=f(T)$. Z této křivky lze následně získat tzv. přechodovou teplotu, kdy u materiálu začne převažovat křehkolomové chování. [21], [29]

Pro experiment byl použit normalizovaný vzorek s „V2“ vrubem, kde „V“ je označení pro tvar vrubu a číslovka 2 značí vzdálenost špičky vrubu od čelní plochy (= hloubka vrubu). [21] Celý princip zkoušky včetně vyhodnocovaných veličin, rozměrů zkušebního vzorku uvádí již zmíněná norma nebo např. [21]. Zkouška byla provedena při teplotách $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a pokojové teplotě. Pro záporné teploty bylo použito chladičí zařízení, kde byly vzorky po dosažení teploty v zařízení ochlazovány po dobu jedné hodiny.

Experiment byl proveden na zařízení PH 300/450-Charpy (300 J) v laboratořích Fakulty strojní, ČVUT v Praze. Zařízení je na Obrázku 29.



Obrázek 29: Zařízení pro rázovou zkoušku

4.1.3 Zkoušky tvrdosti (dle Brinella a Rockwella)

Tvrdot je mechanická vlastnost, která je definována jako odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa. Je obecně známo, že hodnoty tvrdosti se liší nejen podle způsobu měření, ale také dle zkušebních podmínek (velikost vnikajícího tělesa, použitá síla apod.). Pro experimentální část BP byly použity dle požadavků firmy Kdynium a.s. dva měřící způsoby (zkouška tvrdosti dle Brinella a zkouška tvrdosti dle Rockwella). Vzhledem k rozsáhlosti BP budou tyto metody popsány jen okrajově. Veškerou metodiku měření tvrdosti popisuje např. [21]

Hodnoty tvrdostí byly měřeny na tvrdoměru Reicherter Briro VA-Digital (Obrázek 30), který umožňuje oba dva zmíněné typy měření tvrdostí ve firmě Kdynium a.s.



Obrázek 30: Tvrdoměr Reicherter, Briro Va-Digital, Kdynium a.s.

Zkouška tvrdosti dle Brinella [30]

Zkouška tvrdosti dle Brinella používá jako vnikací těleso kuličku z tvrdokovu. Zkušební zatížení F [N] je určeno podle volby velikosti vnikacího tělesa a předpokládané tvrdosti materiálu. Vnikací těleso zanechá vtisk na povrchu materiálu, kde výsledná tvrdost je určena jako poměr zátěžné síly a plochy vtisku.

Pro měření tvrdosti materiálu G22NiMoCr5-6 byla použita kulička z tvrdokovu o průměru 5 mm, z čehož podle normy ČSN EN ISO 6506 vyplývá zkušební zatížení 750 kp (1 kp = 9,81 N). [21] Výsledné označení tvrdosti pro zmíněné podmínky je např. ve formě 350 HBW 5/750, kde 350 je hodnota naměřené tvrdosti. Dle zkušeností autora se však v praxi spíše používá jen zkrácené označení např. 350 HBW.

Zkouška tvrdosti dle Rockwella [31]

Zkouška tvrdosti dle Rockwella je normalizována podle ČSN EN ISO 6508, která popisuje celý princip a metodiku provedení zkoušky. Vnikacím tělesem je zde diamantový kužel nebo kulička

z tvrdokovu podle zvolené stupnice. Již zmíněná norma definuje až 15 stupnic (A, B, C apod.). Nejčastěji se však používá stupnice C, neboli označení tvrdosti HRC.

Pro stupnici C je používán indentor v podobě diamantového kužele, který je vtlačován do povrchu materiálu ve dvou krocích. Prvním krokem je předběžné zkušební zatížení F_0 za účelem proniknutí povrchovou vrstvou materiálu, která může mít odlišné vlastnosti a strukturu. Druhým krokem je celkové zkušební zatížení, kdy materiál pronikne do určité hloubky materiálu, z čehož je následně stanovena hodnota tvrdosti materiálu.

Označení tvrdosti dle Rockwella je v podobě např. 50 HRC, kde 50 je naměřená hodnota tvrdosti.

4.1.4 Metalografická analýza

Vzorky k pozorování byly připraveny ze zkušebních těles pro zkoušku rázem v ohybu, a to v příčném řezu v $\frac{1}{4}$ délky vzorku. Vzorky byly zafixovány v dentacrylu, dále broušeny a leštěny pomocí brusky/leštičky MTH KOMPAKT 1031 a leptány pomocí 5% Nitalu. Pozorování proběhlo na světelném mikroskopu NEOPHOT 32 (Obrázek 31) vybaveným CCD kamerou umožňující pořízení fotografií, které jsou v BP uvedeny.



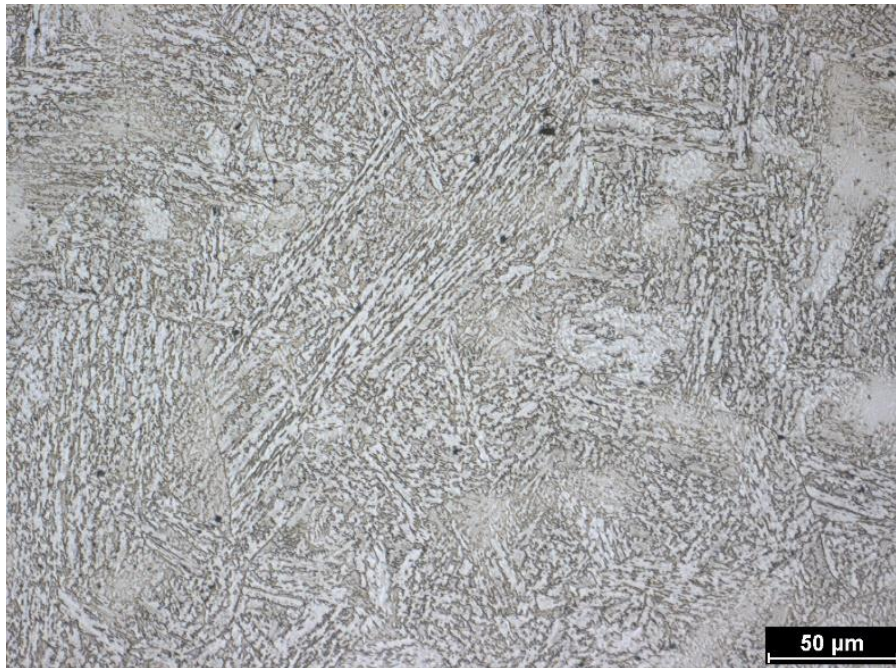
Obrázek 31: Světelný mikroskop NEOPHOT 32 s CCD kamerou

5 Výsledky a jejich diskuze

V této kapitole BP budou zhodnoceny veškeré výsledky z experimentální části. Vzorky byly rozděleny do tří skupin podle teploty popouštění (dále jen TP).

5.1 Zhodnocení struktury

Výchozí materiálový stav („litý stav“) je zdokumentován na Obrázku 32.



Obrázek 32: Výchozí stav materiálu G22NiMoCr5-6 v litém stavu, leptáno (Nital)

Strukturu tvoří jehlice acikulárního feritu (proeutektoidní fáze), která vzniká mezi feritem a bainitem. Přítomnost této fáze lze vysvětlit velikostí odlitého vzorku, kdy malý vzorek rychleji chladne. Pro celkové zjemnění zrna by bylo vhodné zařadit normalizační žihání, které se obvykle před konečným TZ provádí, ale na základě požadavků firmy Kdynium a.s. nebylo zařazeno. Hodnocení velikosti zrna by mohlo být provedeno např. průsečkovou metodou [21]. Tato podrobnější analýza je však nad rámec BP a bude zařazena v jejím pokračování v následujícím akademickém roce.

Černé „flíčky“ byly způsobeny přílišným leptáním, kde vzorek během poměrně krátké chvíle začal na leštěném povrchu oxidovat. Autor si je vědom skutečnosti, že kvalitu metalografických snímků mohla ovlivnit jeho malá zkušenost s jejich přípravou.

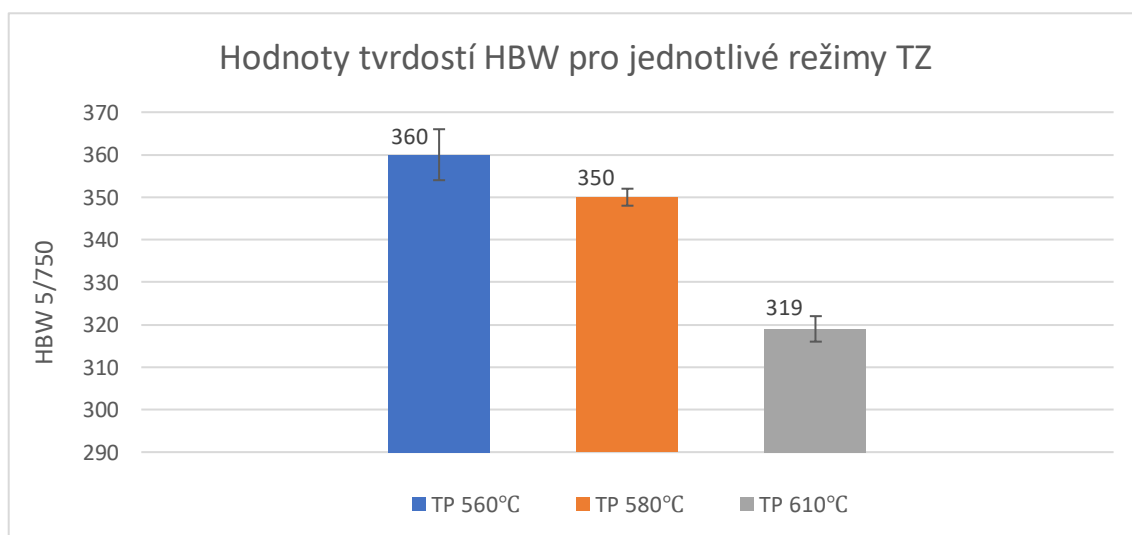
5.2 Vyhodnocení zkoušek tvrdosti

Tvrдость výchozího stavu byla měřena na čtyřech vzorcích pro zkoušku rázem v ohybu. Povrch vzorků byl před vlastním měřením broušen, aby byla dosažena jeho požadovaná kvalita. Pro měření byla použita metoda dle Brinella viz kap. 4.1.3. Na každém vzorku bylo provedeno 5 měření. Ze všech výsledků byla vypočtena průměrná hodnota a směrodatná odchylka. Tvrдость ve výchozím stavu je 287 ± 5 HBW 5/750. Naměřená hodnota odpovídá tvrdostem garantovaným výrobcem viz Tabulka 6.

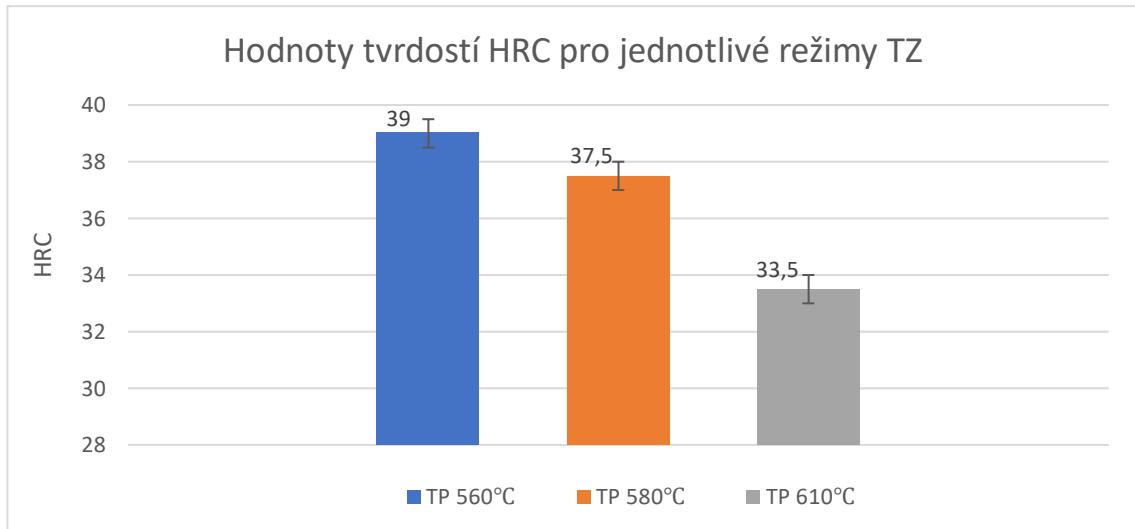
K měření tvrdosti po TZ byly použity dvě metody viz kapitola 4. Pro každý typ vzorku i zkušební metodu byly aplikovány tři zkušební vtisky. Průměrné hodnoty tvrdostí z 30 měření a jejich směrodatné odchylky pro každý režim TZ uvádí Tabulka 11. Výsledné hodnoty jsou zároveň zpracovány graficky na Obrázku 33 a 34.

Tabulka 11: Průměrné hodnoty tvrdostí oceli G22NiMoCr5-6 pro jednotlivé režimy TZ

TP	HBW 5/750	HRC
560 °C	360 ± 6	$39 \pm 0,5$
580 °C	350 ± 2	$37,5 \pm 0,5$
610 °C	319 ± 3	$33,5 \pm 0,5$



Obrázek 33: Tvrdosti HBW oceli G22NiMoCr5-6 pro různé režimy TZ



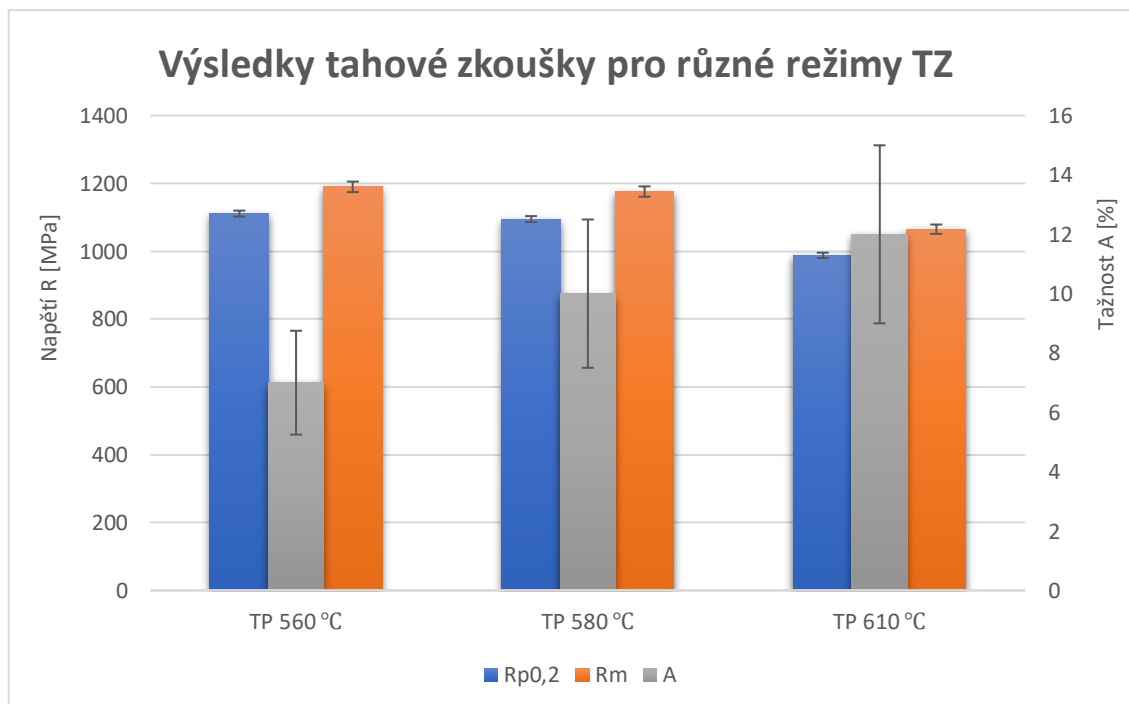
Obrázek 34: Tvrdosti HRC oceli G22NiMoCr5-6 pro různé režimy TZ

Dle očekávání zvyšující se TP způsobila u materiálu G22NiMoCr5-6 pokles tvrdosti. Obecně lze konstatovat, že směrodatné odchylky odpovídají přesností použitých metod měření. Je patrné, že změna teploty popouštění z 560 °C na 580 °C způsobila minimální pokles tvrdosti. Naopak změna TP z 580 °C na 610 °C způsobila značně větší pokles tvrdosti. Odůvodnění tohoto faktu by mohla odhalit případná metalografická analýza.

Dostupná literatura neuvádí hodnoty tvrdosti sledovaného materiálu po zušlechťování. Naměřené tvrdosti HBW a HRC po kalení z teploty 950 °C a popouštění v oblasti teplot 560 °C až 610 °C lze tedy považovat za doplnění charakteristik po TZ oceli G22NiMoCr5-6.

5.3 Vyhodnocení tahové zkoušky

Jak již bylo zmíněno, tahová zkouška byla provedena při pokojové teplotě (21,7 °C) pro zkušební vzorky kalené z 950 °C a ve třech skupinách rozdělené podle teploty popouštění (TP). Výsledné hodnoty se směrodatnými odchylkami ze zkoušky tahem jsou číselně i graficky uvedeny na Obrázku 35 a v Tabulce 12.



Obrázek 35: Vliv režimů TZ na výsledky zkoušky tahem pro ocel G22NiMoCr5-6

Tabulka 12: Výsledné hodnoty ze zkoušky tahem

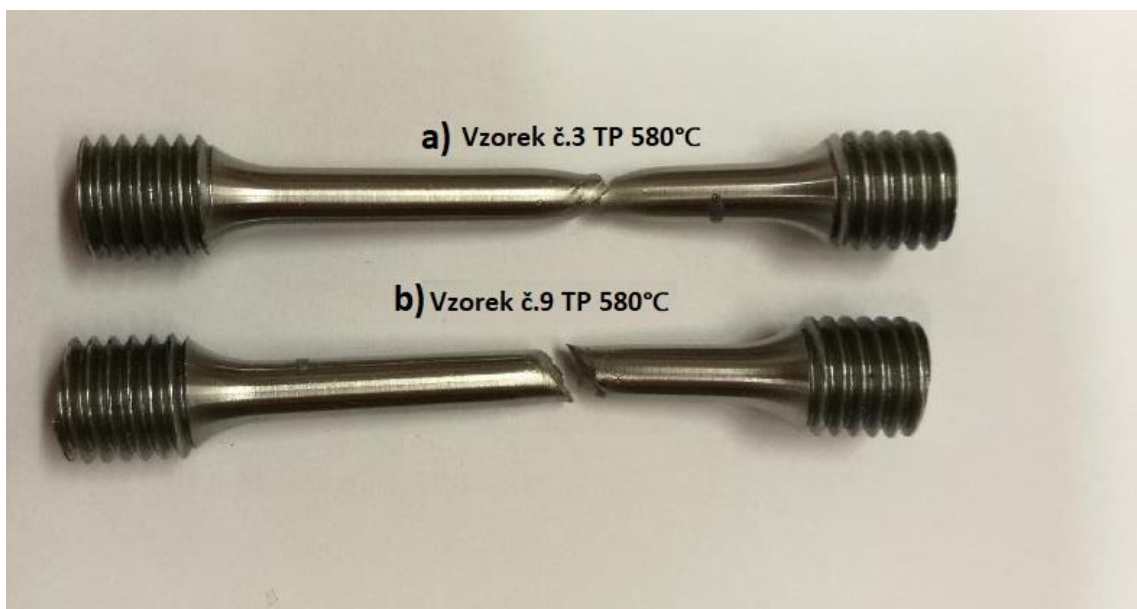
	TP 560 °C	TP 580 °C	TP 610 °C
Rp0,2 [MPa]	1111 ± 5	1095 ± 13	988 ± 5
Rm [MPa]	1190 ± 16	1176 ± 21	1065 ± 8
A [%]	7 ± 2	10 ± 2,5	12 ± 3

Na základě porovnání dosažených hodnot pevností s pevnostmi dle normy SEW 520 budou dále výsledky BP porovnávány s hodnotami pro sledovaný materiál typ II (viz Tabulka 6).

Při všech způsobech TZ byla zjištěna smluvní mez kluzu vyšší, než udává norma SEW 520 a meze pevnosti v rozsahu specifikovaném touto normou (viz Tabulka 6). Hodnoty tažnosti se v závislosti na TP mírně liší. Po TP 560 °C byla zjištěna mírně nižší tažnost, než uvádí norma SEW 520 po TP 580 °C a po TP 610 °C je mírně vyšší. Je možné konstatovat, že hodnoty pevností při daném způsobu TZ jsou na horní hranici hodnot uvedených v normě SEW 520 a více než o 250 MPa vyšší, než uvádí zdroje [25] a [28]. Autor práce se domnívá, že zvolený technologický postup

hlavním technologem výroby (argonování apod.), kvalitní počáteční vsázka, čisté skořepiny a celkový dohled autora nad správným provedením veškerých prací spojených s výrobou vzorků. Pevnost oceli, v souladu s výsledky měření tvrdosti mírně klesá s narůstající TP. Ze směrodatné odchylky je zřejmé, že pevnostní chování vzorků bylo po celou dobu převážně stabilní a vzorky nevykazovaly velké výkyvy naměřených hodnot. Ve shodě s výsledky měření tvrdosti je změna pevnostních charakteristik se změnou TP z 560 °C na 580 °C minimální. Zvýšení TP na 610 °C se na pevnostních charakteristikách naopak projevuje výrazněji. Při nárůstu TP z 580 °C na 610 °C dochází k poklesu výsledné tvrdosti o 4 HRC a tomu odpovídá pokles pevnosti přibližně o 110 MPa.

Z hlediska tažnosti vzorky prokazovaly značný rozptyl hodnot, který je typický pro lité materiály. Jev potvrzují směrodatné odchylky těchto hodnot uvedených v Tabulce 12. V souvislosti s hodnocením tažnosti je třeba popsat způsob lomového chování zkušebních tyčí. Při přechodu na TP 580 °C a 610 °C se lomové chování vzorků odlišovalo. Některé tvořily „krčky“ (tedy projevovaly značnou houževnatost) a některé naopak vykazovaly převážně křehkolomové chování (v poměru zhruba polovina), k lomu došlo bez tvorby lokálního zúžení. Tuto skutečnost dokumentuje Obrázek 36. V následující práci by bylo vhodné provést podrobnou fraktografickou analýzu lomových ploch, která je však nad rámec této BP.



Obrázek 36: Porovnání vzhledu vzorků oceli po zkoušce tahem (oba vzorky po TP 580 °C)
a) lom s tvorbou krčku b) lom bez tvorby krčku

Ačkoliv byly v předložené práci zjištěny vyšší pevnostní charakteristiky než v dostupné literatuře a tvárné charakteristiky jsou přibližně porovnatelné, je však třeba upozornit, že v případě tažností byly zjištěny velké směrodatné odchylky. Např. pro TP 560 °C tvoří směrodatná odchylka 25 % skutečné hodnoty. Lze usuzovat, že neprovedená normalizace je možnou příčinou

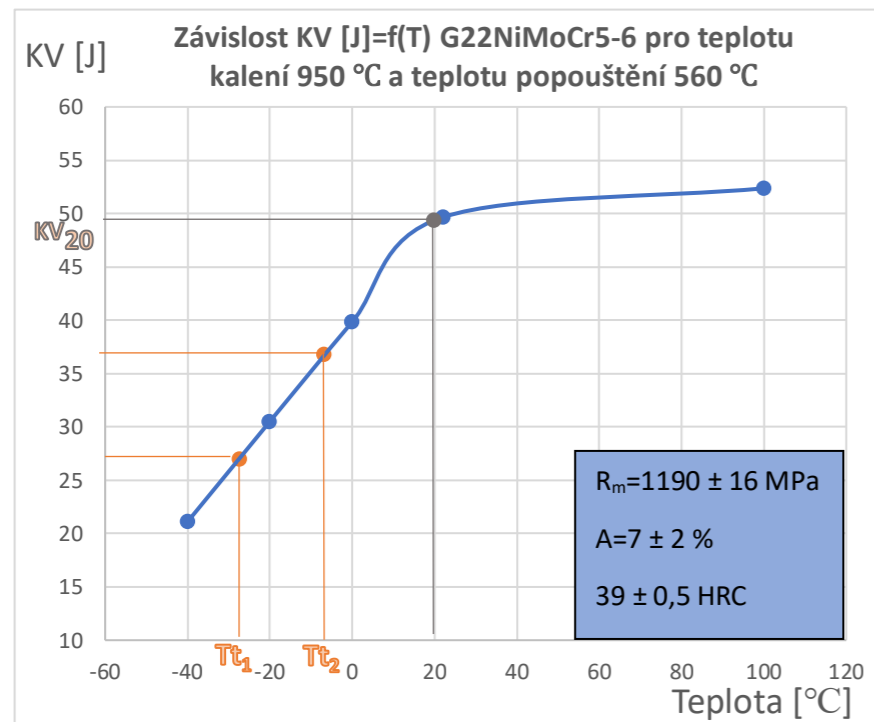
tohoto chování, kde nehomogenita materiálu způsobuje nestabilní chování všech vzorků. Tento problém bude dále komentován ve výsledcích zkoušky rázem v ohybu a v závěru BP.

5.4 Vyhodnocení zkoušky rázem v ohybu

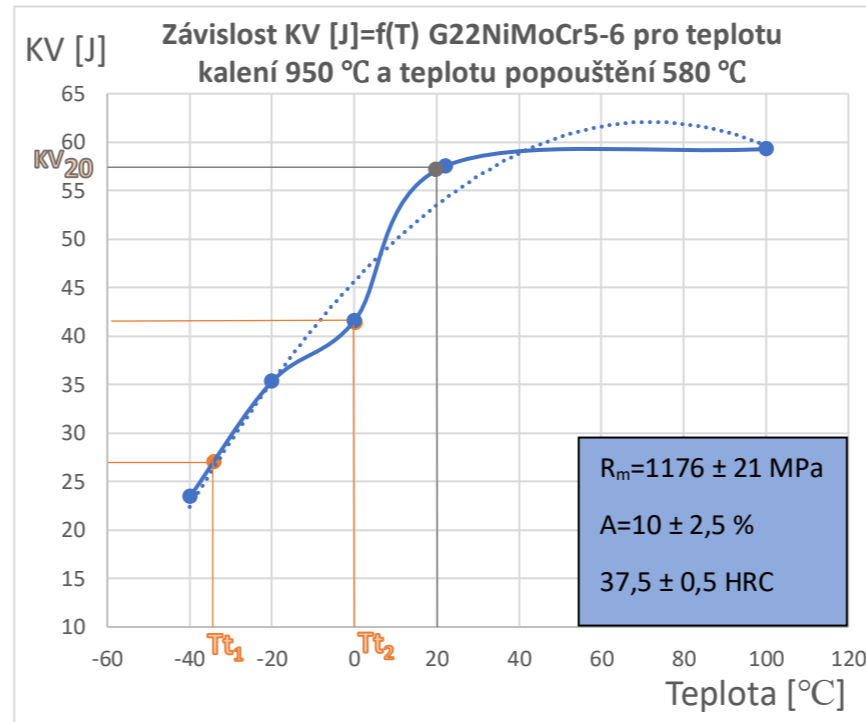
Jak již bylo zmíněno, zkouška rázem v ohybu byla provedena pro tři režimy TZ materiálu G22NiMoCr5-6 při teplotách $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a pokojové teplotě, která byla v době měření $22,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Souhrnně jsou výsledky zkoušek rázem v ohybu uvedeny na Obrázcích 37-39 a v Tabulce 13. Autor si je vědom skutečnosti, že pro stanovení celé „S-křivky“ by bylo potřeba zkoušku rázem v ohybu provést celkem při 7 teplotách. V tomto případě se jedná zejména o doplnění zkoušky při teplotě nižší než $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, která bude doplněna v následujícím pokračování práce. Veškeré závislosti byly zpracovány pomocí softwaru Microsoft Excel, kde bylo primárně využito bodových grafů s vyhlazenými spojnicemi.

Norma SEW 520 pro tento materiál vyhodnocuje křehkolomové chování dvěma způsoby, jako nárazovou práci při $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (KV_{20}) nebo teplotu při které byla dosažena nárazová práce $KV=27\text{ J}$ (označení Tt_1). Toto vyhodnocování bylo doplněno o teplotu Tt_2 , kdy materiál dosáhne tzv. hodnoty nárazové práce $KV_{stř}$ [J], která je stanovena z průměru maximální a minimální naměřené hodnoty KV [21] pro daný režim TZ. Výsledky hodnocení odolnosti proti křehkému porušení dle uvedených metodik jsou přehledně uvedeny v Tabulce 14 a dále jsou barevně označeny na Obrázcích 37-39. Tyto obrázky jsou také doplněny výsledky zkoušky tahem pro odpovídající TZ. Autor si je dále vědom, že stupnice na osách y na Obrázcích 37-39 by bylo vhodné volit shodně vzhledem k následné možnosti porovnání jednotlivých režimů TZ. Toto porovnání je však viditelné v Tabulce 13.

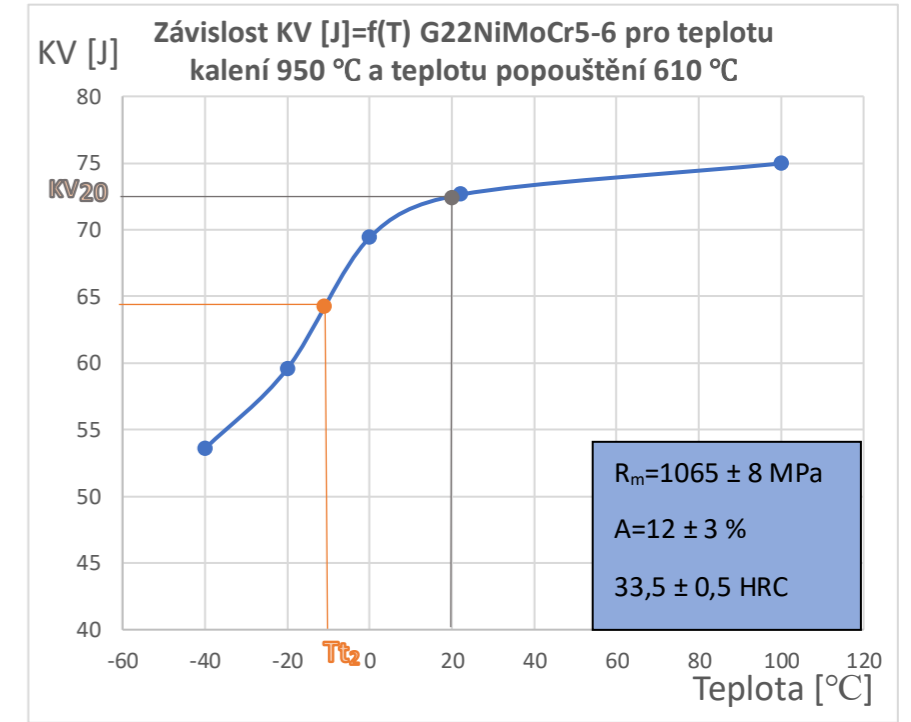
Z porovnání Obrázků 37-39 je možno konstatovat, že ocel G22NiMoCr5-6 po kalení z teploty $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ nezávisle na TP v rozsahu $560\text{-}610\text{ }^{\circ}\text{C}$ vykazuje v oblasti nad pokojovou teplotou chování houževnatého lomu. Naopak pro veškeré sledované TP vykazuje materiál při zkoušce rázem v ohybu v oblasti pod pokojovou teplotou výrazný pokles nárazové práce KV [J]. Průběhy závislostí budou komentovány jednotlivě pro daný režim TZ ve zbytku této kapitoly.



Obrázek 37: KV [J]=f(T) G22NiMoCr5-6 pro teplotu kalení 950 °C a teplotu popouštění 560 °C



Obrázek 38: KV [J]=f(T) G22NiMoCr5-6 pro teplotu kalení 950 °C a teplotu popouštění 580 °C

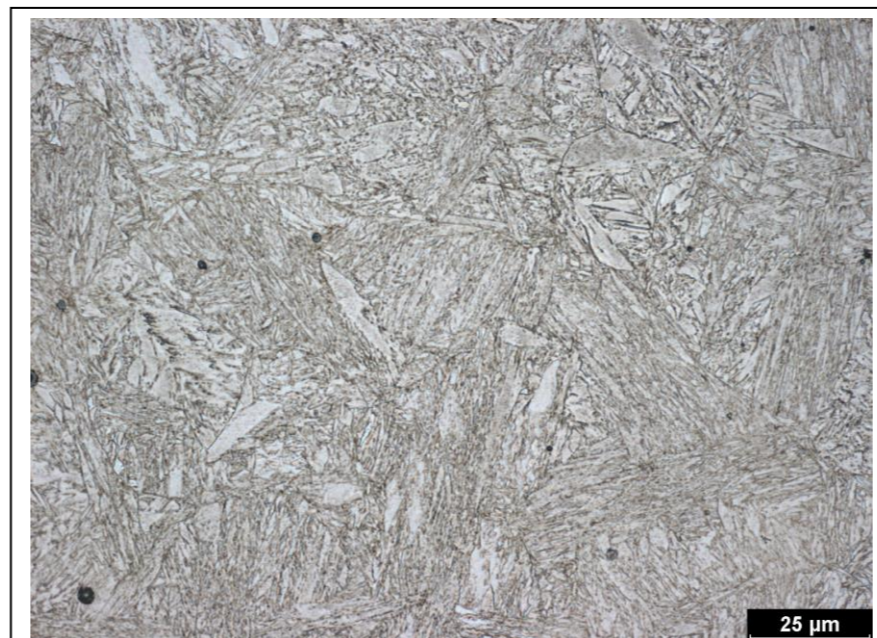


Obrázek 39: KV [J]=f(T) G22NiMoCr5-6 pro teplotu kalení 950 °C a teplotu popouštění 610 °C

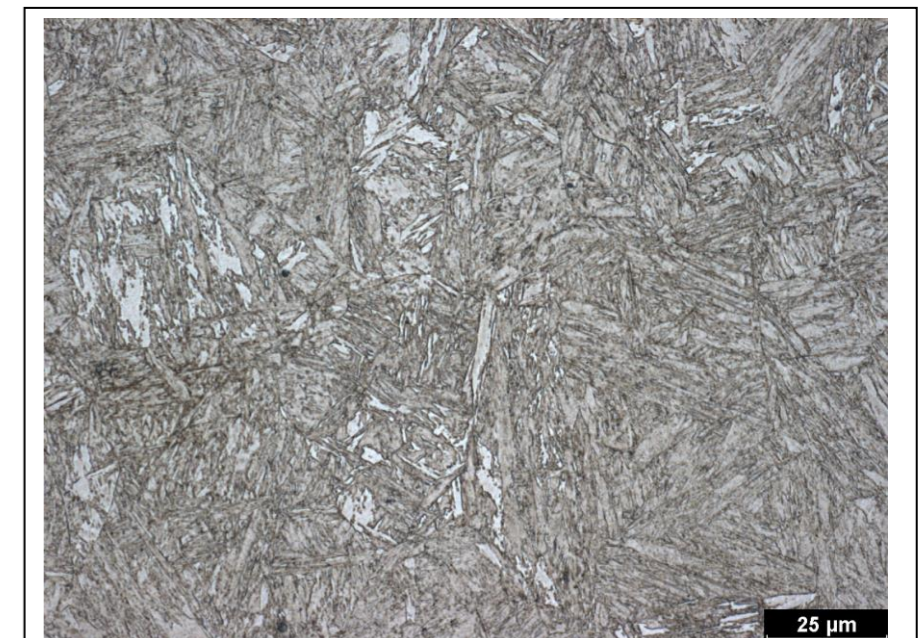
Tabulka 13: Naměřené hodnoty a vyhodnocení odolnosti proti křehkému porušení pro zkoušku rázem v ohybu materiálu G22NiMoCr5-6 (kaleno z 950 °C + 3 různé TP)

Teplota pouštění ↓	Teplota zkoušky [°C]	-40	-20	0	22,1	100
560 °C	ØKV [J]	21,1 ± 3	30,5 ± 6	39,8 ± 4	49,7 ± 7	52,4 ± 4
580 °C		23,4 ± 4	35,3 ± 7	41,6 ± 4	57,5 ± 9	59,3 ± 5
610 °C		53,5 ± 12	59,6 ± 1	69,4 ± 10	72,6 ± 4	75 ± 4

Hodnocení odolnosti proti křehkému porušení	TP [°C]	KV _{stř} [J]	KV (20°C) [J]	Tt ₁ [°C]	Tt ₂ [°C]
	560	36,7	49,3	-27,4	-6,7
	580	41,4	57,2	-34,2	0,1
	610	64,3	72,4	-	-11,1



Obrázek 40: Struktura G22NiMoCr5-6, kaleno 950 °C, popouštěno 580 °C, leptáno (Nital)



Obrázek 41: Struktura G22NiMoCr5-6, kaleno 950 °C, popouštěno 610 °C, leptáno (Nital)

Zhodnocení zkoušky rázem v ohybu pro kalící teplotu 950 °C a TP 560 °C

Průběh závislosti $KV=f(T)$ pro kalící teplotu 950 °C a TP 560 °C je na Obrázku 37. Z obrázku je patrné, že hodnoty nárazové práce v oblasti pod pokojovou teplotou klesají prakticky lineárně. Pokles teploty o 20 °C v této oblasti odpovídá zhruba poklesu nárazové práce o 10 J. Zároveň ve shodě s výsledky tažnosti lze říci, že materiál vykazuje nejnižší nárazovou práci ze všech sledovaných stavů. Z porovnání dosažených výsledků s hodnotami v Tabulce 6 (Zdroj 1, typ II) je možno říci, že zjištěná nárazová práce při 20 °C, je o 9,3 J vyšší než minimální předepsaná. Nárazové práce 27 J bylo dosaženo při teplotě o 2,6 °C vyšší, než udává norma pro tuto ocel typ II. Zjištění je v souladu s mírně nižší tažností v tomto stavu.

Na základě zjištěných vlastností je možno konstatovat, že pro ocel G22NiMoCr5-6 odlitou MVM nelze kalením z teploty 950 °C a popouštěním při 560 °C zajistit v celém rozsahu vlastnosti uvedené v normě SEW 520.

Zhodnocení zkoušky rázem v ohybu pro kalící teplotu 950 °C a TP 580 °C

Průběh závislosti $KV=f(T)$ pro kalící teplotu 950 °C a TP 580 °C je na Obrázku 38. Ze závislosti je patrné, že propojením hodnot vyhlazenými spojnicemi pomocí softwaru Microsoft Excel nebyl dosažen předpokládaný průběh, a to zejména v oblasti -20 °C až 20 °C. Nicméně ani proložení polynomem 3. stupně (čárkovaně) nevedlo k uspokojivému výsledku. Z tohoto důvodu by bylo v následující práci vhodné ověřit hodnotu nárazové práce pro teplotu zkoušky 0 °C. Lze předpokládat, že při této teplotě by hodnota nárazové práce mohla být vyšší, než je uvedená v Tabulce 13.

Hodnota nárazové práce KV_{20} dosáhla vyšší hodnoty, než je specifikovaná v normě SEW 520 zhruba o 17 J. Nárazové práce 27 J bylo dosaženo při teplotě o 4 °C nižší, než udává Tabulka 6.

Na základě zjištěných vlastností je možno konstatovat, že pro ocel G22NiMoCr5-6 odlitou MVM lze kalením z teploty 950 °C a popouštěním při 580 °C zajistit pevnostní charakteristiky na horní hranici a tvárné charakteristiky odpovídající hodnotám uvedeným v normě SEW 520.

Zhodnocení zkoušky rázem v ohybu pro kalící teplotu 950 °C a TP 610 °C

Průběh závislosti $KV=f(T)$ pro kalící teplotu 950 °C a TP 610 °C je na Obrázku 39. Průběh závislosti odpovídá výsledkům zkoušky tahem i měření tvrdosti. Hodnoty nárazové práce jsou výrazně vyšší než po popouštění při 560 °C a 580 °C. Nárazové práce 27 J v rozsahu použitých teplot zkoušky rázem v ohybu nebylo vůbec dosaženo, ačkoliv pevnost odpovídá dolní hranici hodnot uvedených v normě SEW 520.

Na základě zjištěných vlastností je možno konstatovat, že pro ocel G22NiMoCr5-6 odlitou MVM lze kalením z teploty 950 °C a popouštěním při teplotě 610 °C zajistit pevnost na dolní hranici uvedených normě SEW 520 v kombinaci s vyšší tažností.

Jak již bylo uvedeno, dle očekávání s narůstající TP (560 °C až 610 °C) po kalení z teploty 950 °C dochází u oceli G22NiMoCr5-6 odlité metodou MVM k výraznému nárůstu houževnatosti. Z průběhu měření a vyhodnocení směrodatných odchylek (Tabulka 13) je evidentní, že některé vzorky se projevovaly nestejnorodě. Důvod naznačily již předchozí mechanické zkoušky. Normalizační žíhání před vlastním zušlechťováním bude zřejmě důležitým parametrem pro vyrovnanější chování tohoto materiálu. V další práci by bylo vhodné odpovídající experimenty provést pro sledovaný materiál, kde bude uvedena normalizace zařazena. Dále by bylo ke komplexnímu popisu vhodné vyhodnotit lomové plochy a určit podíl houževnatého lomu. Vzhledem k rozsáhlosti BP jsou však tyto experimenty nereálné.

Výsledky mechanických zkoušek jsou doplněny metalografickou analýzou vzorků kalených z teploty 950 °C a popouštěných při 580 °C (Obrázek 40) a teplotě 610 °C (Obrázek 41). Struktura je v obou případech tvořena sorbitem a dolním bainitem, lze očekávat malý podíl zbytkového austenitu, který však nelze světelnou mikroskopií patřičně identifikovat. V souladu s výchozí strukturou je i struktura po zušlechťování poměrně hrubá. Z porovnání Obrázku 40 a 41 je patrné, že popouštění při vyšší teplotě dle očekávání způsobilo větší rozpad martenzitu. Podrobnější metalografická analýza všech sledovaných stavů bude předmětem další práce.

5.5 Celkové zhodnocení mechanických zkoušek

Přehledný souhrn dosažených výsledků a porovnání vlastností oceli G22NiMoCr5-6 uvedených v dostupné literatuře je v Tabulce 14. Jak již bylo uvedeno, výsledky dosažené v předložené BP jsou porovnávány s hodnotami, které specifikuje norma SEW 520 pro ocel G22NiMoCr5-6 typ II (viz zvýrazněný řádek v Tabulce 14). Pro typ II uvádí norma doporučené kalící teploty v rozsahu 900 °C až 980 °C a popouštěcí v rozsahu 550 °C až 600 °C viz Tabulka 5. Pro ocel G22NiMoCr5-6 vyrobenou MVM při zvolených parametrech TZ bylo dosaženo odpovídajících nebo vyšších pevnostních charakteristik. Výsledky uvedené v Tabulce byly podrobně komentovány v předcházejících kapitolách.

Rozdíly v mechanických vlastnostech sledovaného materiálu tak, jak je uvádí dostupná literatura ve srovnání s výsledky předložené BP, mohou být způsobeny mnoha faktory. Jedná se o podmínky TZ, které ani jeden ze zdrojů přesně nedefinuje. Dalšími důvody mohou být vyšší

kvalita výroby, která byla aplikována při přípravě vzorků ve firmě Kdynium a.s. nebo/i vlastní použitá slévárenská technologie.

Tabulka 14: Porovnání mechanických hodnot G22NiMoCr5-6 získaných experimentální částí a zdroji [24], [25] a [28]

	Typ	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	KV (20°C) [J]	T _{t1} [°C] (KV=27 J)	Tvrdość HBW	Tvrdość HRC
Zdroj 1	I	min. 825	930-1080	10	min. 50	-50	-	-
	II	min. 950	1050-1200	10	min. 40	-30	-	-
Zdroj 2	-	700	900	14			280-310	-
Zdroj 3	-	700	900	14	min. 42*	-	280-310	-
Výsledky mech. zkoušek	TP 560 °C	1111±5	1190±16	7±2	49,7	-27,4	360±6	39±0,5
	TP 580 °C	1095±16	1176±21	10±2,5	57,5	-34,2	350±2	37,5±0,5
	TP 610 °C	988±5	1065±8	12±3	72,6	-	319±3	33,5±0,5

*při 0 °C

Z dosažených výsledků je možné usuzovat, že v normě uvedené rozdělení materiálu na typ I a II v závislosti na parametrech TZ není pro praxi dostatečně vypovídající.

V každém případě bude výsledná volba podmínek TZ v konečném důsledku záviset na aplikaci materiálu G22NiMoCr5-6 v praxi, kde může být zákazníkem požadována různá kombinace pevnostních a tvárných charakteristik.

6 Závěry

Byla popsána technologie výroby odlitků metodou vytavitelného modelu ve firmě Kdynium a.s.

Bylo provedeno hodnocení struktury a vlastností oceli na odlitky G22NiMoCr5-6 po kalení při teplotě 950 °C a tři varianty teplot popouštění. Lze konstatovat, že:

- 1) Struktura ve výchozím stavu je tvořena acelkulárním feritem a její tvrdost je 287 ± 5 HBW 5/750.
- 2) Zušlechťováním lze tvrdost v závislosti na teplotě popouštění zvýšit o 32 až 73 HBW. Výsledná tvrdost s rostoucí teplotou popouštění klesá.
- 3) Naměřené tvrdosti HBW a HRC po použitém tepelném zpracování nebyly dosud v odborné literatuře publikovány.
- 4) Při všech způsobech tepelného zpracování byla zjištěna smluvní mez kluzu vyšší, než udává norma SEW 520 a meze pevnosti v rozsahu specifikovaném touto normou.
- 5) Po teplotě popouštění 560 °C byla zjištěna mírně nižší tažnost, než uvádí norma SEW 520, po teplotě popouštění 580 °C srovnatelná a po teplotě popouštění 610 °C je mírně vyšší.
- 6) Nárazové práce 27 J bylo dosaženo při různých teplotách v závislosti na podmínkách popouštění:
 - a) Teplota popouštění 560 °C - bylo dosaženo při vyšší teplotě o +2,6 °C než předepisuje norma SEW 520.
 - b) Teplota popouštění 580 °C - bylo dosaženo při nižší teplotě o -4 °C než předepisuje norma SEW 520.
 - c) Teplota popouštění 610 °C - nárazové práce 27 J nebylo v použitém rozmezí teplot zkoušky rázem v ohybu vůbec dosaženo.
- 9) Struktura je po popouštění při teplotách 580 °C a 610 °C tvořena sorbitem a dolním bainitem, lze očekávat malý podíl zbytkového austenitu, který však nelze světelnou mikroskopií přesně identifikovat.
- 10) Výsledky bakalářské práce použije firma Kdynium a.s. jako vstupní parametry pro certifikaci materiálu a jeho zařazení do svého materiálového portfolia.
- 11) Pro další práci autor doporučuje:
 - a) V experimentu použít zařazení normalizačního žhání před zušlechťováním.
 - b) Provedení zkoušek rázem v ohybu při teplotách nižších než -40 °C.
 - c) Doplnit podrobnější metalografickou a fraktografickou analýzu.
- 12) Cíle práce byly splněny.

7 Použitá literatura

- [1] HERMAN, Aleš. Lítí na vytavitelný model. In: *Fs.cvut.cz* [online]. b.r., s. 1-30 [cit. 2017-07-14]. Dostupné z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/32/presne-liti-na-vytavitelny-model.pdf>
- [2] Kdynium a.s.: Výroba přesných odlitek metodou vytavitelného modelu. *Kdynium a.s.* [online]. Kdyně: Kdynium a.s., b.r. [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: www.kdynium.cz
- [3] NĚMEC, Milan, Bohumír BEDNÁŘ a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. *Teorie slévání*. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06026-1.
- [4] *Population Reference Bureau: 2014 WORLD POPULATION DATA SHEET* [online]. Washington, DC 2009: Population Reference Bureau, 2014 [cit. 2017-12-17]. Dostupné z: http://www.prb.org/pdf14/2014-world-population-data-sheet_eng.pdf
- [5] NĚMEC, Milan, Bohumír BEDNÁŘ a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. *Teorie slévání*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04395-0.
- [6] HLUCHÝ, Miroslav a Václav HANĚK. *Strojírenská technologie 2*. 1. vyd., dot. Praha: Scientia, 1999. ISBN 80-718-3127-1.
- [7] *Technologie I: (slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy)*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-010-2351-6.
- [8] VÍTKOVICE MACHINERY GROUP. *Vítkovice Machinery Group* [online]. b.r. [cit. 2017-11-03]. Dostupné z: <http://www.vitkovice.cz/profil>
- [9] Silesia-Tech s.r.o. *Silesia-Tech s.r.o.* [online]. b.r. [cit. 2017-11-03]. Dostupné z: <http://www.silesia-tech.cz/o-spolecnosti>
- [10] HAVEL, JIŘÍ. *TLAKOVĚ LITÉ ODLITKY Z AISLITIN PRO AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL*. Brno, 2010. VUT Brno. Vedoucí práce Prof. Ing. JAROSLAV ČECH CSc.
- [11] ALUPRESS s.r.o. *ALUPRESS* [online]. b.r. [cit. 2017-11-03]. Dostupné z: <https://www.alupress-sro.cz/slevarna/>

- [12] Tamboli Casting Limited. *Tamboli Casting Limited* [online]. b.r. [cit. 2017-07-04]. Dostupné z: <http://www.tcl.in/products/product-history/>
- [13] ZMRHAL, Lubomír a Jan EKSTEIN. *Technologický postup TP-2/06-01: Výroba voskových modelů*. Kdynium a.s., Kdyně, 2013.
- [14] ROUS, Stanislav a Jiří POLÍVKA. *Technologický postup TP3/20-06: Obalování voskových modelů*. Kdyně, Kdynium a.s., 2009.
- [15] ROUS, Stanislav a Jiří POLÍVKA. *Technologický postup TP3/02-07.4: Výroba keramických forem*. Kdyně, Kdynium a.s., 2009.
- [16] ROUS, Stanislav a Jiří POLÍVKA. *Technologický postup TP 3/03-08.3: Postup vytavování vosku z keramických forem v boilerklávu*. Kdyně, Kdynium a.s., 2008.
- [17] EKSTEIN, Jan a Zdeněk FORSTER. *Technologický postup TP 4/04-09: Formování keramických skořepin*. Kdyně, Kdynium a.s., 2004.
- [18] EKSTEIN, Jan a Zdeněk FORSTER. *Technologický postup TP 4/04-10: Vypalování keramických skořepin*. Kdyně, Kdynium a.s., 2004.
- [19] EKSTEIN, Jan a Zdeněk FORSTER. *Technologický postup TP 4/04-11: Tavení kovu*. Kdyně, Kdynium a.s., 2004.
- [20] EKSTEIN, Jan a Zdeněk FORSTER. *TP 4/04-12: Odlévání kovu*. Kdyně, Kdynium a.s., 2004.
- [21] SOBOTOVÁ, Jana. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [22] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
- [23] Alucast s.r.o. - Reference. *Alucast s.r.o.* [online]. Tupy: Alucast s.r.o., 2018 [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: <http://alucast.cz/cs/reference>
- [24] SEW 520. *Hochfester Stahlguss mit guter Schweisseignung*. Dusseldorf: Verlag Stahleisen, 1996.

- [25] Gieterij Dijkkamp B.V.: Characteristics of G22NiMoCr56. *Gieterij Dijkkamp B.V* [online]. Nizozemsko, Daam Schijfweg 15, 1507 BD Zaandam: Gieterij Dijkkamp B.V., 2016 [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <http://www.dijkkamp.nl/en/materials/g22nimocr56/>
- [26] ISPATGURU: Argon gas and its usage in Steel Plant. *ISPATGURU* [online]. 2015 [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <http://ispatguru.com/argon-gas-and-its-usage-in-steel-plant/>
- [27] *Kovové materiály - Převod hodnot tvrdosti*. ČSN EN ISO 18265. Český normalizační institut: Český normalizační institut, 2004.
- [28] STAVANGER STEEL AS: Steel handbook. *STAVANGER STEEL AS* [online]. Norway, 2017 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: http://www.stavangersteel.no/Dokumenter/Steelhandbook/Stavanger_Steel-Steelbook.pdf
- [29] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-720-4283-1.
- [30] *ČSN EN ISO 6506 - Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Brinella*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [31] *ČSN EN ISO 6508 Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Rockwella*. Praha: Český normalizační institut, 2006.

Seznam použitých obrázků:

Obrázek 1: Lití kovu do forem	8
Obrázek 2: Přehled světové produkce odlitků (rok 2014) [3].....	9
Obrázek 3: Srovnání odlitků s počtem obyvatel	10
Obrázek 4: Podíl jednotlivých materiálů na výrobu odlitků ve světě a v ČR [3]	11
Obrázek 5: Forma připravená k lití [6]	12
Obrázek 6: Stroj pro vysokotlaké lití [10]	13
Obrázek 7: Odlitky ze slévárny vytavitelného modelu.....	14
Obrázek 8: Staženina.....	14
Obrázek 9: Historické odlitky – metoda vytavitelného modelu [12]	15
Obrázek 10: Příklad odlitků z nízkouhlíkové oceli – metoda vytavitelného modelu	16
Obrázek 11: Model ze syntetického vosku (vlevo) a přírodního vosku (vpravo).....	17
Obrázek 12: Připravená forma pro vstřikovací cyklus.....	18
Obrázek 13: Hotový model připravený k vyjmutí z formy.....	18
Obrázek 14: Umísťování modelů na stromeček	19
Obrázek 15: Automatizované namáčení stromečků v obalovací směsi.....	20
Obrázek 16: Stromečky po prvním obalu.....	21
Obrázek 17: Stromečky po sedmém obalu	21
Obrázek 18: Pracoviště pro vytavování.....	22
Obrázek 19: Naformované skořepin směřující do vypalovací pece.....	23
Obrázek 20: Správně vypálené skořepiny připravené k lití	24
Obrázek 21: Tavič připravující tavbu pomocí šrotu v tavicí peci	25
Obrázek 22: Vlévání kovu do vyžíhaných skořepin	26
Obrázek 23: Chladnutí odlitých skořepin v ochranné atmosféře	27
Obrázek 24: Stromečky před vibračním odstraněním keramiky (vlevo) a po jejím odstranění (vpravo).....	28
Obrázek 25: Broušení ploch při konečné úpravě odlitku	29
Obrázek 26: Stromeček pro odlití zkušebních vzorků [2].....	38
Obrázek 27: Vzorky pro mechanické zkoušky materiálu G22NiMoCr5-6	39
Obrázek 28: Pracoviště pro zkoušku tahem, FS ČVUT, Praha.....	40
Obrázek 29: Zařízení pro rázovou zkoušku.....	41
Obrázek 30: Tvrdoměr Reichert, Briro Va-Digital, Kdynium a.s.	42
Obrázek 31: Světelný mikroskop NOPHOT 32 s CCD kamerou.....	43
Obrázek 32: Výchozí stav materiálu G22NiMoCr5-6 v litém stavu, leptáno (Nital).....	44

Obrázek 33: Tvrdosti HBW oceli G22NiMoCr5-6 pro různé režimy TZ	45
Obrázek 34: Tvrdosti HRC oceli G22NiMoCr5-6 pro různé režimy TZ.....	46
Obrázek 35: Vliv režimů TZ na výsledky zkoušky tahem pro ocel G22NiMoCr5-6	47
Obrázek 36: Porovnání vzhledu vzorků oceli po zkoušce tahem (oba vzorky po TP 580 °C) a) lom s tvorbou krčku b) lom bez tvorby krčku.....	48
Obrázek 37: KV [J]=f(T) G22NiMoCr5-6 pro teplotu kalení 950°C a teplotu popuštění 560°C...50	
Obrázek 38: KV [J]=f(T) G22NiMoCr5-6 pro teplotu kalení 950°C a teplotu popuštění 580°C...50	
Obrázek 39: KV [J]=f(T) G22NiMoCr5-6 pro teplotu kalení 950°C a teplotu popuštění 610°C...50	
Obrázek 40: Struktura G22NiMoCr5-6, kaleno 950°C, popuštěno 580°C, leptáno (Nital).....	50
Obrázek 41: Struktura G22NiMoCr5-6, kaleno 950°C, popuštěno 610°C, leptáno (Nital).....	50

Seznam použitých tabulek:

Tabulka 1: Chemické složení G22NiMoCr5-6 dle SEW 520 [24]	33
Tabulka 2: Parametry tepelného zpracování pro G22NiMoCr5-6 [24]	34
Tabulka 3: Mechanické hodnoty G22NiMoCr5-6 [24]	35
Tabulka 4: Porovnání specifikace chemického složení G22NiMoCr5-6 [24], [25], [28]	36
Tabulka 5: Porovnání specifikace tepelného zpracování G22NiMoCr5-6 [24], [25], [28]	36
Tabulka 6: Srovnání mechanických vlastností G22NiMoCr5-6 zdroji [24], [25], [28]	37
Tabulka 7: Chemické složení počáteční vsázky pro výrobu zkušebních vzorků.....	38
Tabulka 8: Výsledné chemické složení zkušebních vzorků.....	38
Tabulka 9: Tepelné zpracování zkušebních vzorků pro mechanické zkoušky	39
Tabulka 10: Počty vzorků.....	39
Tabulka 11: Průměrné hodnoty tvrdostí oceli G22NiMoCr5-6 pro jednotlivé režimy TZ	45
Tabulka 12: Výsledné hodnoty ze zkoušky tahem	47
Tabulka 13: Naměřené hodnoty a vyhodnocení odolnosti proti křehkému porušení pro zkoušku rázem v ohybu materiálu G22NiMoCr5-6 (kaleno z 950 °C + 3 různé TP)	50
Tabulka 14: Porovnání mechanických hodnot G22NiMoCr5-6 získaných experimentální částí a zdroji [24], [25] a [28].....	53

