

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TLAKOVĚ LITÉ ODLITKY Z MG SLITIN – TRENDY VÝVOJE

MG-ALLOY DIE-CASTINGS – TRENDS IN INDUSTRIAL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ROSTISLAV SVOBODA

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

PROF. ING. JAROSLAV ČECH, CSC.

BRNO 2008

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

ABSTRAKT

Cílem této závěrečné práce je na vzorcích odlitku ze slévárny Aalen (Německo), který byl tlakově odlit ze slitiny AZ91 D, zjistit vliv pórovitosti a parametru kulatosti na mechanické vlastnosti. Pro vyhodnocení těchto veličin byl využit program Olympus Five. Naměřené hodnoty byly podrobeny statistickým testům na odstranění hrubých chyb a zjištění lineární závislosti mezi mechanickými vlastnostmi a porezitou, popř. parametrem kulatosti pórů.

Klíčová slova

Slitina hořčíku, AZ91 D, vysokotlaké lití, porezita, parametr kulatosti.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to determine influence of porosity and shape-factor over mechanical properties, performed on cast samples from Aalen foundry (Germany), that were high pressure die casted from AZ91 D Alloy. Evaluation of these quantities was done using computer software Olympus Five. Measured values were subjected to statistical analysis in order to eliminate gross errors and determine linear dependence between mechanical properties and porosity eventually voids shape factor.

Key words

Mg-alloy, AZ91 D, high pressure die-casting, porosity, shape-factor.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Svoboda, R. *Tlakově lité odlitky z Mg slitin – trendy vývoje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008, 83 s., 4 s. příl. Vedoucí diplomové práce Prof. Ing. Jaroslav Čech, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Tlakově lité odlitky z Mg slitin – trendy vývoje“ vypracoval dle svého svědomí samostatně a pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně 20. 5. 2008

.....

Rostislav Svoboda

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto svému školiteli prof. Ing. Jaroslavu Čechovi, CSc., za cenné rady a ochotnou pomoc při zpracování mé diplomové práce. Děkuji Ing. Liboru Matulovi (Kovolit Modřice a.s.) za informace, týkající se odlévání prvních vzorků ve slévárně v Aalen.

Dále bych chtěl poděkovat prof. Ing. Tomáši Podrábskému, CSc., doc. Ing. Bohumilu Pacalovi, CSc. a v neposlední řadě Ing. Martinu Julišovi, všichni z Ústavu materiálových věd a inženýrství (VUT FSI v Brně), kteří mi pomohli při zpracování experimentální části této diplomové práce.

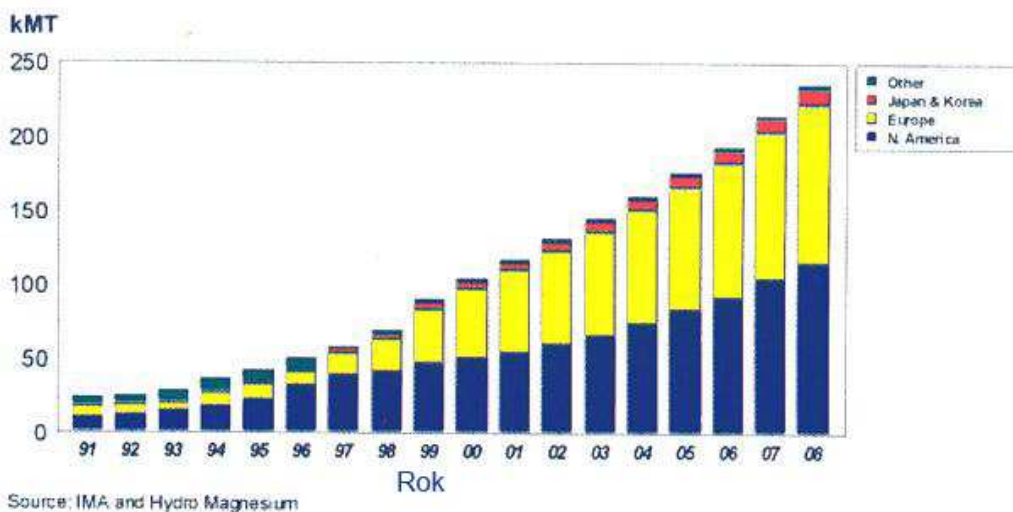
OBSAH

Abstrakt.....	3
Čestné prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah.....	6
Úvod.....	8
Cíl diplomové práce.....	10
1. Teoretická část.....	11
1.1. Hořčík.....	11
1.1.1. Krystalografie hořčíku.....	11
1.1.2. Výskyt v přírodě.....	12
1.1.3. Výroba primárního hořčíku.....	13
1.1.4. Využití hořčíku.....	14
1.2. Slitiny hořčíku.....	14
1.2.1. Fyzikálně metalurgická analýza slitin hořčíku.....	15
1.2.2. Slitiny hořčíku pro tváření.....	18
1.2.3. Slévárenské slitiny hořčíku.....	19
1.2.4. Systém značení slévárenských slitin.....	22
1.2.5. Slitiny hořčíku pro tlakové lití.....	26
1.2.6. Mechanické a fyzikální vlastnosti slitiny AZ91.....	27
1.2.7. Vlastnosti slitin hořčíku za vysokých teplot.....	28
1.2.8. Tepelné zpracování hořčíkových slitin.....	29
1.2.9. Koroze slitin hořčíku.....	32
1.3. Gravitační lití.....	35
1.3.1. Lití do pískových forem.....	35
1.3.2. Gravitační lití do kovových forem.....	35
1.4. Tlakové lití.....	36
1.4.1. Stroje se studenou licí komorou.....	37
1.4.2. Stroje s teplou licí komorou.....	38
1.4.3. Porovnání tlakových licích strojů.....	38
1.4.4. Vstřikovací mechanismus tlakového licího stroje.....	39
1.4.5. Periferie pracoviště tlakového lití.....	40
1.5. Tavení hořčíkových slitin.....	41
1.5.1. Předehřívací a tavící zařízení pro hořčíkové slitiny.....	43
1.5.2. Zařízení pro sekundární tavení slitin hořčíku.....	47
1.6. Mechanické zkoušky.....	48
1.7. Obrábění materiálů z hořčíkových slitin.....	49
1.8. Recyklace slitin hořčíku.....	50
1.9. Využití odlitků ze slitin hořčíku.....	51

2. Experimentální část	53
2.1. Popis odlitku	53
2.2. Odlévání zkušební série	54
2.2.1. Vybavení pracoviště	54
2.2.2. Návrh formy	58
2.2.3. Simulace v programech Magma a Simtec	60
2.2.4. Nastavení parametrů tlakového stoje	61
2.2.5. Kontrola vnitřní kvality odlitku	62
2.3. Měření mechanických vlastností.....	64
2.4. Obrazová analýza a popis operací před jejím vyhodnocením	66
2.4.1. Příprava vzorků a popis operací	66
2.4.2. Vyhodnocení obrazové analýzy	68
2.4.3. Vyhodnocení porezity	68
2.4.4. Určení tvarových faktorů pórů.....	72
2.5. Statistické vyhodnocení výsledků	76
2.5.1. Použité testy	76
2.5.2. Výsledky testů.....	76
Závěr.....	78
Seznam použitých zdrojů	80
Seznam použitých zkratk a symbolů	82
Seznam příloh.....	83

ÚVOD

Produkce slitin hořčíku se velmi rychle zvyšuje. Je to způsobeno čím dál vyššími nároky na spotřební materiál, do kterého můžeme zahrnout i automobilový a letecký průmysl. Jejich největší výhodou je nízká hmotnost, velmi příznivý poměr mezi pevností a hustotou, dobrá obrobitelnost a možnost recyklace těchto slitin. Naopak nevýhodou je nízká korozní odolnost a snížení mechanických vlastností za zvýšených teplot.



Obr. 1-1: Růst spotřeby slitin hořčíku tlakově litých [1]

Slitiny hořčíku jsou obsazeny ve všech konvenčních metodách lití, jmenovitě: lití do pískových forem, lití do trvalých a polotrvalých forem a v neposlední řadě tlakové lití. Volba metody lití závisí na faktorech, které ovlivňuje tvarová složitost modelu, aplikace odlitku, požadované vlastnosti odlitku, celkový počet odlitků v celé sérii a vlastnosti použité slitiny.

Hořčíkové odlitky všech typů nachází uplatnění v mnoha obchodních odvětvích, obzvláště tam, kde je jejich hlavní výhodou nízká hmotnost a tuhost. Mezi hlavní odvětví patří zejména počítačové komponenty, těla videokamer a přenosné nástroje a vybavení.

Automobilový průmysl je v současné době asi největším odběratelem odlitků z hořčíkových slitin. To je způsobeno snahou snížit hmotnost automobilů a tím i omezit vznik škodlivých látek. Proto se automobilky snaží nahrazovat „odlitky 19. století“, které bývaly nejčastěji z litiny, oceli nebo hliníku, těmi ze slitin hořčíku. Poptávka automobilového průmyslu vede k navyšování jakosti a tím i ke zvyšování konkurenceschopnosti oproti ostatním průmyslovým odvětvím.

Letecký průmysl vyvolal potřebu nových konstrukčních materiálů, k nim patří hlavně materiály kompozitní. Jejím pronikáním mohou čelit jen nové slitiny s lepšími mechanickými vlastnostmi při zachování hmotnosti.

Mezi nejčastější technologie výroby hořčíkových odlitků patří tlakové a gravitační lití. U tlakového lití se používají stroje se studenou i teplou licí komorou. Častou vadou při těchto technologiích je pórovitost, vznikající při

rozstříku kovu v lici komoře tlakového stroje. Pórovitost snižuje tlakotěsnost, povrchovou kvalitu a mechanické vlastnosti a tudíž má vliv na výslednou jakost odlitků.

Hořčíkové slitiny se začaly používat v automobilovém průmyslu v roce 1933 u firmy Volkswagen a to zásluhou prof. Ferdinanda Porsche. Ten navrhl dnes již legendární „lidové“ vozidlo VW „brouk“. Na jeho konstrukci bylo použito více jak 20 kg hořčíkových slitin. Těchto vozidel se vyrobilo do roku 1981 více než 20 mil a celková spotřeba hořčíku se odhaduje na 400 000 tun. Nejvíce hořčíkových slitin na jeden automobil je v USA a s odstupem v Evropě, kde má využití hořčíkových slitin stoupající tendenci.

CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této diplomové práce je zjistit možnosti výskytu porezity na odlitcích tlakově odlitých ve slévárně v Aalen (Německo). Tyto odlitky byly odlity jako zkušební série na základě jejichž výsledků by mohla být výroba zavedena v Kovolitu Modřice a.s. Odlitky se v současné době v Kovolitu Modřice a.s. odlévají z hliníkové slitiny, jež by měla být nahrazena slitinou AZ91D. Z odlitku budou vyřezány vzorky, z kterých se budou vyhodnocovat:

- Mechanické vlastnosti
- Porezita
- Vliv porezity na mechanické vlastnosti
- Statistické vyhodnocení výsledků

Výsledky experimentální části budou uvažovány jako dílčí. Pro větší statistickou věrohodnost by mělo být zajištěno větší množství zkoušených vzorků.

1. TEORETICKÁ ČÁST

1.1. Hořčík

Hořčík je stříbrolesklý, měkký a kujný kov s nízkou hustotou. Využívá se zejména při výrobě lehkých a pevných slitin. Značka je Mg (podle latinského názvu magnesium) a byl objeven roku 1755. Leží na 12. místě periodické soustavy prvků. Patří mezi nepřechodné prvky II. A skupiny, tzv. kovy alkalických zemin [2].

Při slučování hořčíku s jinými prvky jeho atomy snadno odevzdají valenční elektrony a tvoří kationty Mg^{2+} . Ve sloučeninách vystupují tyto atomy vždy s oxidačním číslem 2 např.

$MgCl_2$ – chlorid hořečnatý

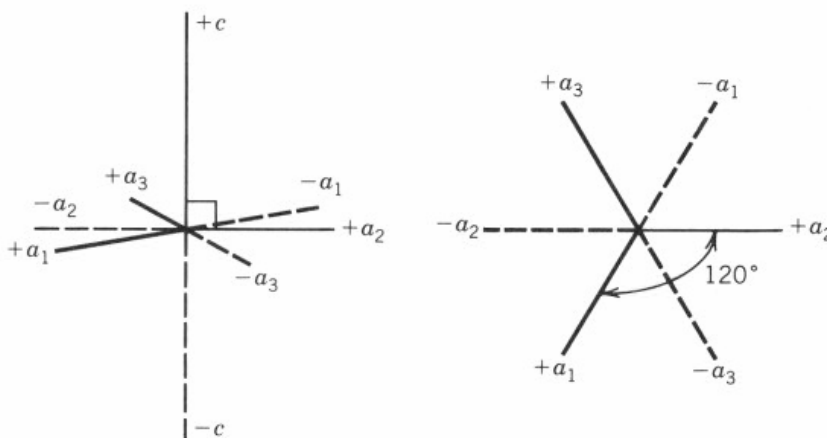
$Mg(OH)_2$ – hydroxid hořečnatý

MgF_2 – fluorid hořečnatý

MgO – oxid hořečnatý

1.1.1. Krystalografie hořčíku

Hořčík krystalizuje v hexagonální (šesterečné) mřížce. Pro krystalografický osní kříž hexagonální a trigonální soustavy platí: $a_1 = a_2 = a_3 = 0,323 \text{ nm}$, $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$. Pevnost technicky čistého hořčíku (190 MPa) je vyšší než pevnost čistého hliníku (90 MPa), ale pro konstrukční účely je přesto nízká. Hořčík má velmi špatnou tvárnost za nízkých teplot. Jako konstrukční kov je pro přenos zátěžných sil nepoužitelný. Proto se využívá zejména jako slitina s jinými prvky [3].



Obr. 1-1: Hexagonální mřížka hořčíku

Atomové číslo	12
Relativní atomová hmotnost	24,305
Tvrdość	2,6
Hustota	1,738 g/cm ³ v tuhém stavu
	1,584 g/cm ³ v tekutém stavu
Teplota tavení	650 °C ± 0,5 °C
Teplota varu	1107 °C
Měrná tepelná kapacita při 20 °C	1,03 kJ/kg·K
Skupenské teplo tavení	372 kJ/kg
Tepelná vodivost při 20 °C	155 W/m·K
Modul pružnosti	45 GPa
Součinitel smrštění	4,2 – 5%
Mez pevnosti v tahu	80 – 180 MPa
Tažnost A	1 – 12%

Tab. 1-1: Mechanické vlastnosti hořčíku [2]

Jeho elektrochemický potenciál je velmi nízký (-1,77 V), z toho lze vyvodit, že se jedná o kov, který je velmi náchylný na korozi [2].

Mechanické vlastnosti hořčíku lze výrazně zvýšit legováním hliníkem (do 10%), zinkem (do 5 – 6%), manganem (do 2,5%) a zirkonem (do 1,5%).

1.1.2. Výskyt v přírodě

Hořčík je rozptýlen ve velkém množství v zeminách (1,9 – 2,5% zemské kůry) a rozpuštěn v mořské vodě, kde se koncentrace iontů uvádí jako 1,35 g/l. Mořská voda obsahuje zejména chlorid hořečnatý, bromid hořečnatý a síran hořečnatý. Obsah hořčíku (obvykle uváděný jako chlorid hořečnatý MgCl_2) v mořské vodě tvoří významný podíl jeho zastoupení na Zemi.

V zemské kůře se nejvíce vyskytuje jako dolomit (uhličitan hořečnatovápennatý) a magnezit (uhličitan hořečnatý), který je poněkud vzácnější. Naleziště dolomitu se nacházejí skoro na všech kontinentech v jižní Evropě, Brazílii, Austrálii a v Severní Americe. Na magnezit lze narazit zejména v Alpách, Koreji, Číně a na Slovensku [2].

Dále se hořčík vyskytuje v ne tolik významných minerálech. Např. olivín, spinel, karnalit, brucit, espomit, atd.

Název	Vzorec	Teoretický obsah Mg [%]
brucit	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	41.6
olivín	Mg_2SiO_4	34.6
magnezit	MgCO_3	28.8
dolomit	$\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$	13.2
bischofit	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	12
karnalit	$\text{MgCl}_2 \cdot \text{KCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	8.8

Tab. 1-2: Nejdůležitější minerály hořčíku

1.1.3. Výroba primárního hořčíku

Hořčík zaznamenává ze všech neželezných kovů největší expanzi výroby. Je to způsobeno novými aplikacemi hořčíkových slitin, zejména v automobilovém průmyslu, ale také i v oblasti legování slitin hliníku a v neposlední řadě využití hořčíku jako reaktivní látky při odsíření surového železa. Oproti jiným neželezným kovům, i přes své rozšíření v přírodě, se hořčík vyrábí jen v 11 oblastech a jeho výroba je určitou charakteristikou technologické a ekonomické vyspělosti daného státu.

Kovový hořčík se vyrábí dvěma metodami. Obvyklejší je elektrolýza roztavené směsi chloridu hořečnatého a chloridu draselného, přičemž chlorid draselný slouží jako přísada ke snížení teploty tání chloridu hořečnatého. Chlorid hořečnatý se získává z mořské vody nebo tavením karnalitu. Při elektrolýze se na grafitové anodě uvolňuje chlor a na železné katodě hořčík. Rztavený hořčík stoupá v tavenině k povrchu, kde se sbírá děrovanými lžicemi. Další možností je termický způsob, který spočívá v redukci oxidu hořečnatého karbidem vápníku (karbotermický) nebo křemíku (silikotermický) [4]. Karbotermický způsob se provádí v elektrické obloukové peci při teplotě nad 2000 °C, aby nedocházelo k reakci oxidu uhelnatého s parami hořčíku. Jednodušší je redukce oxidu hořečnatého karbidem vápenatým, která probíhá při teplotě 1200°C, ale jen za předpokladu nízké ceny karbidu vápenatého. Silikotermický způsob se provádí reakcí páleného dolomitu s křemíkem nebo ferrosiliciem v ocelolitinových retortách zahřívaných na 1200°C nebo ve vysokovakuových pecích. D estilující hořčík, jehož čistota je 98-99%, kondenzuje v předchlazených nádobách.

Produkce v tisících tun							
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
USA	74 *	43 *	35 *	43 *	43 *	43 ****	43 ****
Brazílie	9 *	9 *	7 *	6 *	11 *	6 ****	6 ****
Kanada	55 *	65 *	86 *	50 *	55 *	54 *	50 ****
Čína	218 *	195 *	232 *	354 **	450 ***	470 ***	526 ***
Francie	17 *	7 *	0 *	0 *	0 *	0 ****	0 ****
Izrael	2 *	30 *	34 *	30 *	33 *	28 ****	28 ****
Kazachstán	10 *	10 *	10 *	14 *	14 *	20 ****	20 ****
Norsko	50 *	35 *	10 *	0 *	0 *	0 ****	0 ****
Rusko	40 *	50 *	52 *	45 *	45 *	45 ****	50 ****
Ukrajina	2 *	2 *	0 *	0 *	0 *	2 *****	2 ****
Srbsko	2 *	2 *	2 *	2 *	4 *	2 ****	1 ****
Součet	479	448	468	544	655	670	726
Roční změna		(-6%)	4%	16%	20%	2%	8%

Tab. 1-3: Produkce primárního hořčíku [5]

Zdroje k **tab. 1-3**:

* Mining Journal Annual Review for 2004; MAGNESIUM by Robert E. Brown

** Stejně číslo zveřejněné Mining Journal Annual Review a China Magnesium Association

*** China Magnesium Association

**** U. S. Geological Survey

1.1.4. Využití hořčíku

Využití hořčíku, ať už jako slitiny nebo v elementární formě je velmi široké.

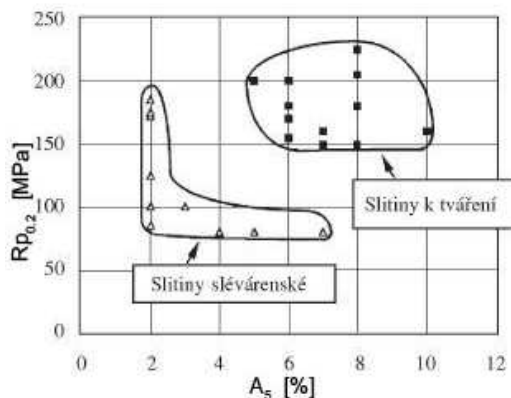
- Jako legura ve slitinách hliníku
- Jako vlastní slitina
- Výroba litiny s kuličkovým grafitem
- Odsiřování ocelí
- Ochrana proti elektrochemické korozi
- Redukční látka při výrobě titanu, zirkonu, hafia a uranu
- Blízká afinita hořčíku ke kyslíku a síře, se využívá v metalurgii ocelí

1.2. Slitiny hořčíku

Vedle nízké hustoty hořčíkových slitin je také výhodná jejich výborná obrobiteľnosť, schopnosť zlepšiť kvalitu povrchu ďalším spracovaním, relatívne nízka cena a dobrá dostupnosť. Nevýhodou je naopak zhoršená svařitelnosť, špatná korozní odolnosť, nízká odolnosť za vyšších teplot, vysoká reaktivita (ekologická náročnosť spracovania) a nedostatečná vrubová houževnatosť.

Slitiny hořčíku mají dobré slévárenské vlastnosti, ke kterým výrazně přispívá nízká tavící teplota. Při vhodné volbě legur lze snížit možnost vzniku slévárenských vad, jako jsou trhliny a mikrostaženiny. Další pozitivní vlastností slitin hořčíku je schopnost silné absorpce mechanických kmitů [6].

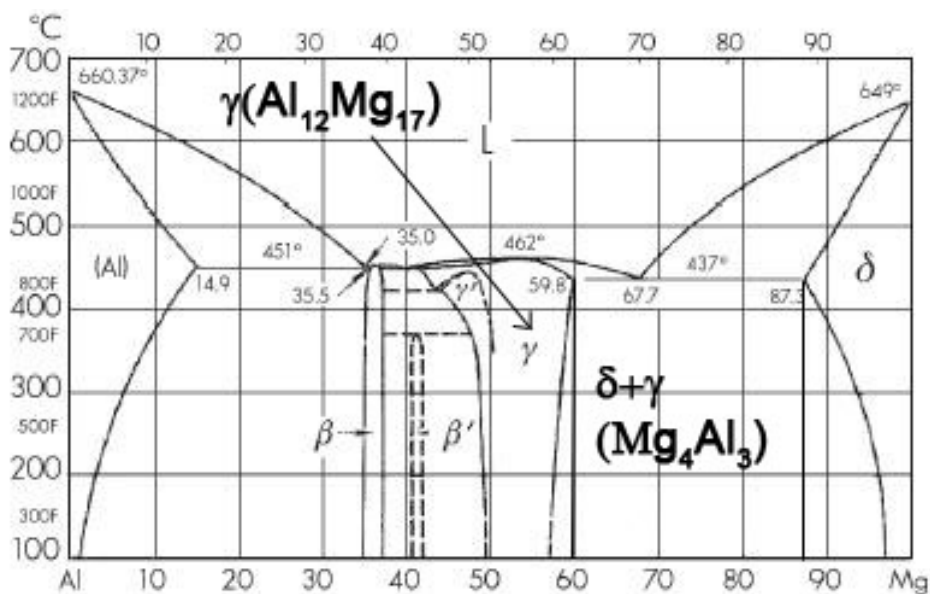
Slitiny hořčíku se rozdělují na slitiny slévárenské a slitiny pro tvářeni (**obr.1-2**).



Obr. 1-2: Rozdělení slitin hořčíku [6]

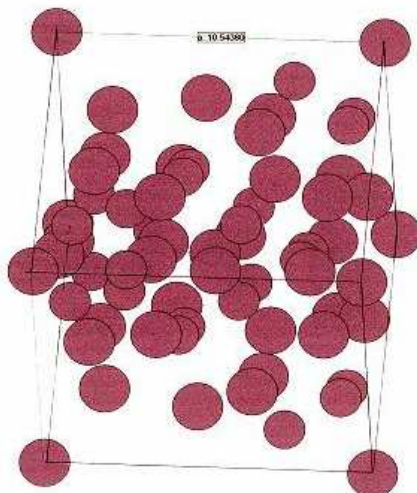
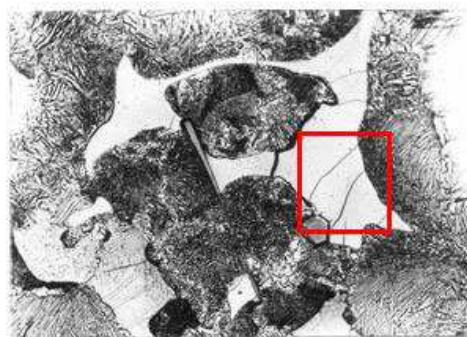
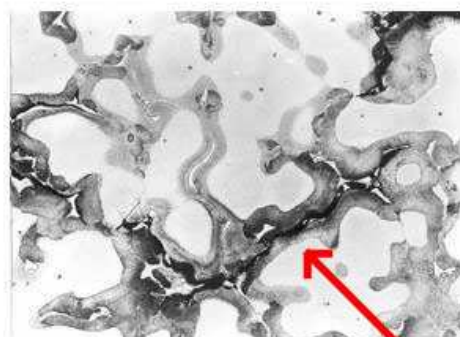
1.2.1. Fyzikálně metalurgická analýza slitin hořčíku

Hliník tvoří s hořčíkem tuhý roztok (δ) a při vyšších obsazích eutektikum Mg_4Al_3 (**obr. 1-3**), které zvyšuje základní mechanické vlastnosti.

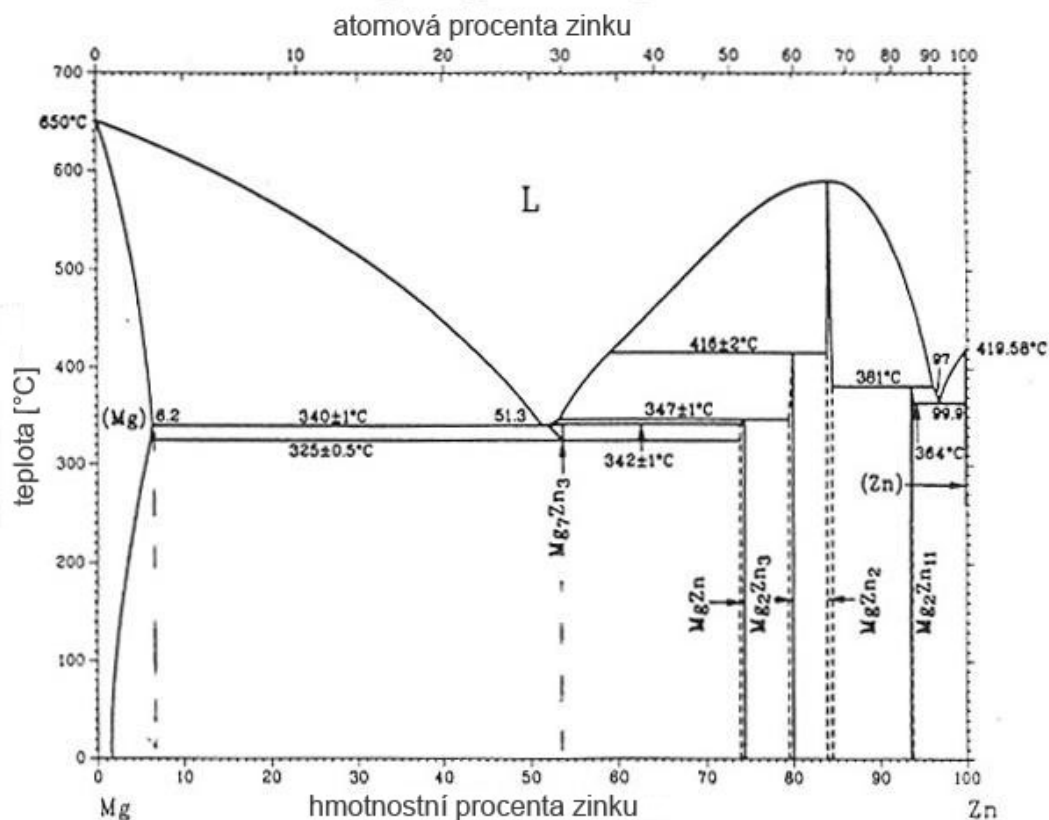


Obr. 1-3: Binární diagram Al-Mg

Horší vlastnosti slitin hořčíku a hliníku jsou způsobeny vyloučením fáze $\gamma (\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17})$. Tato fáze má kubickou mřížku (**obr. 1-4**) o parametrech $a = 10,5438 \text{ nm}$, $\alpha = 90^\circ$.

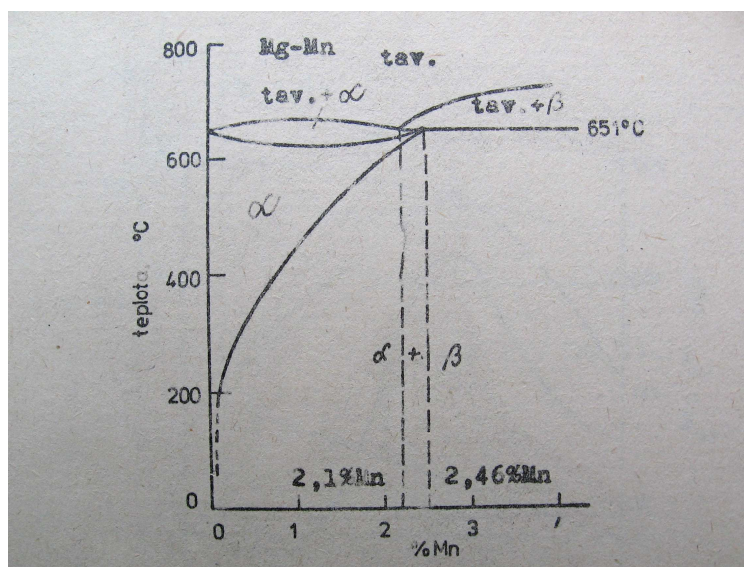
Obr. 1-4: Mřížka fáze γ Trhliny ve fázi γ Lom součásti kopíruje průběh fáze γ
(interdendritický lom)Obr. 1-5: Vady způsobené fází γ

Ve slitinách hořčíku je často kromě hliníku i určitý obsah zinku, manganu a zirkonu. Zinek tvoří spolu s hliníkem a hořčíkem tuhý roztok a při vyšším obsahu hliníku se také vylučují intermetalické fáze Mg_4Al_3 a MgZn_2 . Intermetalická fáze MgZn_2 má stejný vliv na pevnostní charakteristiky jako fáze Mg_4Al_3 .



Obr. 1-6: Rovnovážný diagram hořčík - zinek

Mangan s hořčíkem tvoří tuhý roztok α . Se snižující teplotou se mění rozpustnost manganu v hořčíku a z tuhého roztoku precipituje fáze β (**obr. 1-7**). Přísada manganu neovlivňuje mechanické vlastnosti jako hliník a zinek, ale její výhodou je zvýšení korozní odolnosti, což je způsobeno vylučováním tenké vrstvy kysličníku Mg-Mn na povrchu. Další výhodou manganu je schopnost tvořit se železem sloučeninu o vysoké specifické hmotnosti. Tyto sloučeniny se usazují na dně tavicího kelímku [7].



Obr. 1-7: Část diagramu Mg-Mn [7]

Přísada zirkonu a zinku do slitin hořčíku vede k zjemnění zrna, zvyšuje úroveň mechanických vlastností, ale snižuje odolnost proti korozi.

Další možnou přísadou je cín. Cín je rozpustný až do obsahu okolo 10% (při teplotě 645°C), přičemž rozpustnost prudce klesá s teplotou za současné precipitace fáze β (Mg₂Sn). Například komplexně legovaná slitina Mg-Al-Mn dodatečně legovaná okolo 5% Sn má velmi dobrou svařitelnost za tepla.

Křemík je nerozpustný v hořčíku, ale tvoří s ním intermetalickou fázi Mg₂Si, která silně zpevňuje základní matici. Vzhledem k obrovskému zvýšení křehkosti je obsah Si držen pod 0,3% [7].

1.2.2. Slitiny hořčíku pro tváření

Slitiny hořčíku krystalizují v hexagonální, těsně uspořádané soustavě a za normální teploty vykazují pouze jeden skluzový systém. Tvárnost těchto materiálů se zlepšuje nad teplotou 220 °C, kdy vstupují do funkce další skluzové systémy a projevují se rekrystalizační procesy.

Nejčastějšími technologiemi tváření je protlačování profilů, válcování plechů, popř. volné nebo zápusťkové kování. Tvářecí teploty tedy leží v intervalech: kování 200 až 300 °C, protlačování 300 až 400 °C a válcování 400 až 500 °C.

Strukturně typy slitin pro tváření odpovídají slitinám slévarenským. Tvářená struktura má však svoje specifika. Pro tvářené slitiny se nepoužívají jako legury kovy vzácných zemin. Slitiny tvoří výrazné textury a s nimi spojenou anizotropii mechanických vlastností. Deformační zpevnění lze u slitin hořčíku využít pouze v omezeném rozsahu. Slitiny s hliníkem mají obvykle přísadu zinku (do 1,5 %) a některé i přísadu manganu (zvyšuje odolnost proti korozi). Slitiny s manganem mají nízké mechanické vlastnosti, dobrou korozní odolnost a jsou výrobně i zpracovatelsky jednoduché. Mají dobrou tvárnost i svařitelnost. Vyrábějí se z nich výlisky a válcují plechy. Slitiny se zinkem a zirkonem mají vhodnou kombinaci legur. Zinek zvyšuje mechanické vlastnosti, zirkon zjemňuje zrna. Nejvyšší

mechanické vlastnosti mají slitiny po precipitačním vytvrzení. Poněkud specifické slitiny jsou slitiny s thoriem vyvinuté v Rusku. Tyto slitiny jsou vhodné pro vysoké teploty. Mechanické vlastnosti těchto slitin zůstávají stabilní až do teplot 350 °C [6].

Nejuniverzálnější metodou zlepšení tvařitelnosti, kdy nedochází ke vzniku trhlin, je vyvození všestranné tlakové napjatosti. Obecně lze touto metodou tvářet i křehké materiály, tj. hořčíkové slitiny za studena. Tlakovou napjatost můžeme vyvodit mechanicky, tj. pomocí speciálních konstrukcí nástroje, jako je např. tváření ve zděři, kování v uzavřené dutině nebo aplikace hydrostatického tlaku [8].

1.2.3. Slévárenské slitiny hořčíku

V technické praxi se hořčík používá hlavně jako součást slitiny. Největší část hořčíkových slitin se zpracovává odléváním. Jsou to hlavně slitiny binární, kdy hlavním prvkem je hořčík a druhým prvkem bývá často hliník. Tyto slitiny bývají rozšířeny také o další prvky, nazýváme je legury. Legury se do slitin přidávají hlavně z důvodu zlepšení mechanických a slévárenských vlastností a případně kvůli zvýšení odolnosti proti korozi. Nejčastějším typem jsou slitiny Mg-Al, Mg-Zn, Mg-Mn a super lehké slitiny Mg-Li. Tyto základní typy slitin hořčíku bývají doplněny o další kovy, např. Th, Zr, Si, Ag, Ti a kovy vzácných zemin. Typickým slévárenským problémem je hořlavost hořčíkových slitin v tekutém stavu. Tomu lze zabránit struskou a nebo tavením pod ochrannou atmosférou. Slitiny hliníku můžeme rozdělit do čtyř skupin.

Slitiny hořčíku s hliníkem

Slitiny typu Mg-Al jsou nejrozšířenějším typem pro slévárenské účely. Jsou nejstarší skupinou slitin hořčíku. Přidávají se do nich další legující prvky (Zr, Zn, Th, Ag, Ce). Jejich užitečné vlastnosti jsou dány existencí relativně široké oblasti tuhého roztoku δ v rovnovážném diagramu Mg-Al a možností změnit chemické složení přidáním dalších prvků.

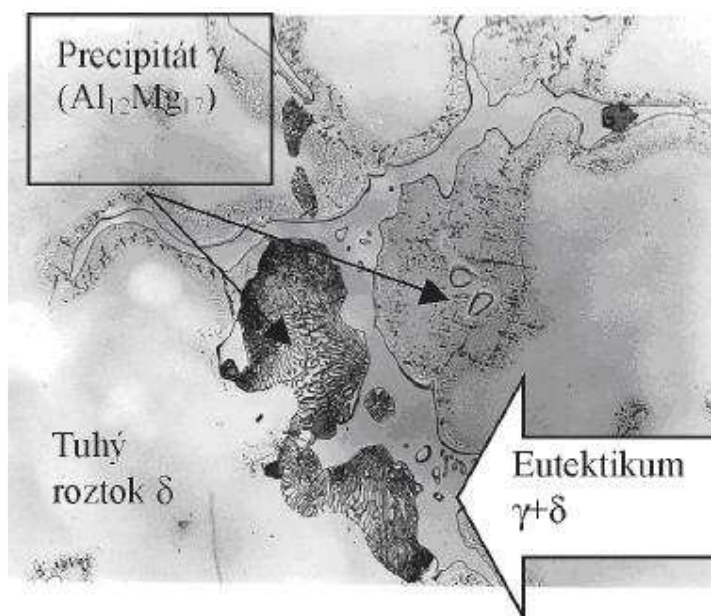
Nejrozšířenější z těchto slitin (s komerčním názvem elektron) jsou slitiny s obsahem 7 až 10 % Al. Slitiny s vyšším obsahem hliníku než 7 % jsou vytvrditelné. Při vytvrzování dochází k tvorbě diskontinuálního precipitátu fáze $Mg_{17}Al_{12}$ a slitiny bývají doplněny malým množstvím zinku a manganu.

Na rozpustnost hliníku v tuhém roztoku δ a na polohu eutektického bodu má vliv modifikace, rychlost ochlazování a tlak při lití [6]. Tyto parametry lze v širokých mezích ovlivňovat použitou slévárenskou technologií a je jich možno využít pro výrobu odlitků různých vlastností, např. slitina MgAl6Mn vykazuje velmi dobré mechanické vlastnosti ($R_m = 190$ až 230 MPa, $A_5 = 5$ až 8 %) a odlévají se z ní, gravitačním litím do pískových forem i tlakovým litím do kokil, disky kol pro automobily.

S rostoucím obsahem hliníku se výrazně zvětšuje interval tuhnutí a s tím šířka dvoufázového pásma. Takové slitiny mají při gravitačním lití velký sklon ke tvorbě mikrostaženin a ředin. Proto obsah Al ve slitinách pro gravitační lití nepřesahuje 5%. Obsah hliníku také zlepšuje zabíravost.

Slitiny Mg-Al-Zn

Do této skupiny patří slitiny hořčíku, které jsou známé pod pojmem „elektrony“. U těchto slitin hraje významnou roli hliník, který výrazně zvyšuje pevnost. Ale na druhou stranu, čím vyšší obsah hliníku, tím horší odolnost proti korozi pod napětím. Tuto negativní vlastnost hliníku můžeme částečně kompenzovat malým množstvím manganu. Zinek nemá takový vliv na pevnost, ani na odolnost proti korozi pod napětím jako hliník. Ve srovnání s hliníkovými slitinami mají hořčíkové slitiny široký interval tuhnutí (70 až 120°C), proto je jejich zabíhavost nižší a objemové smrštění (1,1 až 1,9%) se projevuje jako pórovitost. Široký interval tuhnutí je také příčinou vzniku trhlin. Tyto vlastnosti se dají potlačit přísadou prvků kovů vzácných zemin a zirkonu [4].



Obr. 1-8: Struktura slitiny AZ91

Slitiny Mg-Al-RE

Tyto slitiny byly vyvinuty hlavně za účelem zvýšení creepové odolnosti. Je to způsobeno hlavně tím, že je fáze δ -Mg₁₇Al₁₂ nahrazena intermetalikem Al-RE. Slitiny Al-RE jsou vhodné pouze pro tlakové lití, protože při nízkých rychlostech tuhnutí se tvoří hrubé částice Al₂RE.

Slitiny Mg-Al-Si

Tato slitina se využívá hlavně při tlakovém lití, protože je vytvrzující fáze Mg₂Si jemně rozdělena po celé struktuře. Spolu s dobrou tepelnou odolností má i uspokojivou hodnotu lomové houževnatosti. Standardní slitiny AS21 a AS41 jsou použitelné do teplot 130 -150 °C. Slévateľnost AS41 je poměrně dobrá, zatímco slévateľnost AS21 je problémem.

Slitiny hořčíku s manganem

Obsah manganu ve slitinách Mg-Mn bývá obvykle 1 až 2 %. Slitiny hořčíku s manganem mají horší slévateľské vlastnosti (nižší zabíhavost a vyšší

smrštivost). Relativně nízké mechanické vlastnosti jsou způsobeny tendencí těchto slitin tvořit hrubé zrna v průběhu krystalizace. Zjemnění lze dosáhnout malým přidavkem křemíku [6]. Slitiny hořčíku s manganem se používají u aplikací, kde se požaduje větší tažnost a houževnatost.

Slitiny hořčíku se zinkem

Hořčíkové slitiny se zinkem se podobají slitinám s hliníkem. Obsah zinku ve slévárenských slitinách bývá v rozsahu 0,3 až 5 %. Do slitin tohoto typu se přidává mangan, díky němuž se zvyšuje odolnost proti korozi. Slitiny se zinkem, zirkonem a kovy vzácných zemin mají např. creepové vlastnosti lepší než žárovevné slitiny hliníku, a to při nižší měrné hmotnosti.

Slitiny Mg-Zn-Zr

Tyto slitiny mají vyšší hodnoty meze kluzu a meze pevnosti, které jsou způsobeny účinkem zinku a zirkonu. Dalšími kladnými vlastnostmi jsou nižší náchylnost mechanických vlastností na tloušťku stěny a menší sklon k mikropórovitosti. Zirkon zlepšuje odolnost proti korozi. Legování zirkonem způsobuje potíže, vzhledem k nízké rozpustnosti zirkonu v roztaveném hořčíku. Případná přísada kadmia zvyšuje pevnost a tvárnost. Tento typ slitin je možno dlouhodobě konstrukčně používat při teplotách do 200°C [4].

Slitiny Mg-Zn-Zr-Nd

Neodym v těchto slitinách zabezpečuje vysokou žárovevnost, která je podmíněna stabilitou tuhého roztoku a malou rychlostí koagulace (srážení) vytvrzující fáze Mg_9Nd za vyšších teplot. Tyto slitiny jsou konstrukčně použitelné do 250°C [4].

Slitiny Mg-Zn-Zr-RE

Tyto slitiny mají obdobné vlastnosti jako slitiny Mg-Zn-Zr-Nd. Jejich mechanické vlastnosti jsou srovnatelné za normálních teplot s ostatními hořčíkovými slitinami. Za vysokých teplot (asi do 250°C) jsou použitelné jako konstrukční materiály [4].

Slitiny Mg-Zn-Zr-Th

Slitiny s thoriem patří ke slitinám hořčíku s nejvyšší žárovevností. Jsou použitelné jako konstrukční materiály do 350°C [4].

Slitiny hořčíku s lithiem

Slitiny hořčíku s lithiem patří mezi nejlehčí a perspektivní konstrukční materiály. Slitiny hořčíku a lithia dosahují velmi nízkých hustot $1\,300\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ až $1\,500\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. S růstem obsahu lithia se pevnost slitin Mg-Li snižuje, avšak modul pružnosti a mez kluzu v tlaku je vyšší, než u většiny hořčíkových slitin. Nedostatkem hořčíkových slitin s lithiem je velká reaktivita komponent v roztaveném stavu, malá odolnost proti tečení a nestabilita mechanických vlastností za pokojových teplot.

Některé legující prvky

Kovy vzácných zemin – Všechny kovy vzácných zemin (kromě Ytria) mají omezenou rozpustnost v hořčíku, proto se u těchto slitin hojně využívá precipitační vytvrzování. Precipitáty jsou velmi stabilní a zvyšují odolnost proti tečení materiálu za zvýšených teplot, odolnost proti korozi a pevnost za vysokých teplot. Jako legující prvky se využívají Ytrium, neodým a cer. Kvůli vysoké ceně se používají jen zřídka.

Be – Je dávkován do taveniny jen ve velmi malém množství (do 30 ppm). I v tomto malém množství dramaticky snižuje sklon taveniny k oxidaci.

Ca – Má pozitivní vliv na zjemňování zrna a odolnost proti tečení materiálu za zvýšených teplot. Na druhé straně může vápník vést k lepení taveniny na nástroje při lití a porušování materiálu za tepla.

Li – Lithium vede k zpevnění tuhého roztoku za normálních teplotách. Dále snižuje hustotu a zvyšuje tažnost. Nicméně lithium zvyšuje tendenci taveniny k hoření. Dále snižuje odolnost oproti korozi.

Ag – Stříbro spolu s kovy vzácných zemin silně zvyšuje pevnost slitiny za zvýšených teplot a odolnost proti creepu. Má negativní vliv zejména na odolnost proti korozi.

Th – Thorium je prvek, který nejvíce zlepšuje vlastnosti hořčíkových slitin za vysokých teplot a odolnost proti tečení materiálu za zvýšených teplot. Ale je to radioaktivní prvek, který bývá nahrazován jinými prvky.

Zr – Přidáním zirkonu se zvyšuje pevnost v tahu bez ztráty tažnosti.

Zn – Zinek má stejný vliv jako hliník, ať už na slévárenské vlastnosti nebo na pevnost. Při obsahu zinku nad 3 % se snižuje množství staženin a je mírně zvýšená pevnost v tahu. Při obsahu zinku nad 2 % je výrazný sklon ke vzniku mikroporesity a velká náchylnost ke vzniku trhlin.

Mn – Nad 1,5 hm. % manganu se zvyšuje pevnost v tahu, odolnost proti korozi, zjemnění struktury a svařitelnost.

1.2.4. Systém značení slévárenských slitin**Značení dle ASTM**

Všeobecně vzato se skládá značení hořčíkových slitin ze čtyř částí:

- Signalizuje dva hlavní legující prvky a sestává se ze dvou smluvených písmen, které představují tyto dva hlavní prvky uspořádané podle klesajícího obsahu (jestli se obsahy rovnají, pak jsou prvky seřazeny abecedně). Tyto písmena jsou seřazeny v **tab. 1-4**.
- Signalizuje množství dvou hlavních elementů a skládá se ze dvou celých čísel v odpovídajícím pořadí.

- Rozlišuje slitiny se stejným procentuálním složením hlavních legujících prvků. Skládá se z jednoho z následujících písmen: A – první složení, B – druhé složení, C – třetí složení registrované v ASTM, D – vysoká čistota a E – vysoká odolnost proti korozi.
- Poslední část označení udává stav slitiny (tepelné zpracování)

Značení tepelného zpracování slitin hořčíku

F - v litém stavu

O – žíhaný stav

T1 – po umělém stárnutí bez předchozího rozpouštěcího ohřevu

T2 – po žíhání na odstranění vnitřních pnutí, nebo žíhání po tváření za studena

T4 – po rozpouštěcím ohřevu (rozpouštěcí žíhání)

T6 – po rozpouštěcím ohřevu s ochlazením na vzduchu a následujícím umělém stárnutí

T61 – po rozpouštěcím ohřevu s ochlazením ve vřelé vodě a následujícím umělém stárnutí.

T7 – po rozpouštěcím žíhání a stabilizačním žíhání

T8 – rozpouštěcí žíhání, deformace za studena a umělé stárnutí

H10 a H11 – slabě deformačně zpevněný

H23, H24 a H26 – deformačně zpevněný a částečně žíhaný

H3 – deformačně zpevněný a stabilizačně žíhaný

K označení slitin s nízkým obsahem nečistot, jako jsou železo, nikl a měď, byl počátkem 80. let zaveden pojem „high purity“ (vysoká čistota). Díky své odolnosti proti korozi se slitiny s vysokou čistotou používají nejčastěji při tlakovém lití. Dnes existuje u každé hořčíkové slitiny verze „high purity“. Takovou verzi slitiny označují písmena HP na konci značky slitiny.

Označení	Značka prvku	Označení	Značka prvku
A	Al	M	Mn
B	Bi	N	Ni
C	Cu	P	Pb
D	Cd	Q	Ag
E	RE	R	Cr
F	Fe	S	Si
G	Mg	T	Sn
H	Th	W	Y
K	Zr	Y	Sn
L	Li	Z	Zn

Tab. 1-4: Značení prvků podle ASTM

Jako příklad uvedu tyto tři slitiny AZ91A, AZ91B, AZ91C. V těchto značeních:

- A reprezentuje hliník, legující prvek specifikovaný v největším množství
- Z reprezentuje zinek, legující prvek specifikovaný druhým největším množstvím
- 9 signalizuje, že obsah hliníku leží mezi 8,6 a 9,4
- A jako poslední písmeno v prvním příkladu signalizuje, že toto je první slitina způsobilá k přidělení označení AZ91
- Poslední písmena ve zbylých dvou příkladech (B, C) znamenají, že slitiny byly následně vyvinuty a jejich specifické složení se mírně liší od první slitiny (AZ91A). Ve složení se liší i samy mezi sebou, ale ne natolik, aby se muselo změnit základní označení.

Prvek		AZ91A	AZ91B	AZ91C	AZ91D	AZ91E
Al	[%]	8.3-9.7	8.3-9.7	8.1-9.3	8.3-9.7	8.1-9.3
Mn	[%]	0.13 min.	0.13 min.	0.13 min.	0.15 min.	0.17-0.35
Zn	[%]	0.35-1.0	0.35-1.0	0.40-1.0	0.35-1.0	0.4-1.0
Si	[%]	0.50 max.	0.50 max.	0.30 max.	0.10 max.	0.20 max.
Cu	[%]	0.10 max.	0.35% max.	0.10 max.	0.030 max.	0.015 max.
Ni	[%]	0.03 max.	0.03 max.	0.01 max.	0.002 max.	0.0010 max.
Fe	[%]	--	--	--	0.005 max.	0.005 max.
Každý další	[%]	0.30 max.	0.30 max.	0.3 max.	0.02 max.	0.01 max.
Další celkem	[%]	--	--	--	--	0.30 max.

Tab. 1-5: Složení slitin AZ91, typu A, B, C, D, E [9]

Značení dle ČSN EN 1754

Označení číslem představuje desetimístný znak:

- První 4 místa jsou označena písmeny EN-M
- 5. místo písmenem: A – hořčíkové anody, B – ingoty z hořčíku a slitin hořčíku určené k přetavení, C – odlitky ze slitin hořčíku
- 6. místo číslicí označující hlavní prvek nebo hlavní slitinový prvek: 1 – Mg, 2 – Al, 3 – Zn, 4 – Mn, 5 – Si, 6 – RE (kovy vzácných zemin), 7 – Zr, 8 – Ag, 9 – Y.
- 7. a 8. místo číslicemi určujícími skupinu slitin: 00 – Mg, 11 – MgAlZn, 12 – MgAlMn, 13 – MgAlSi, 21 – MgZnCu, 51 – MgZnREZr, 52 – MgREAgZr, 53 – MgREYzr
- 9. místo číslicí (počínaje 1) označující podskupinu slitin
- 10. místo číslicemi 0 až 9 rozlišujícími slitiny v podskupinách

Označení značkou

První 4 místa jsou stejná jako v označení číslem. Poté následuje chemická značka hořčíku Mg a po ní chemické značky prvků, přičemž se uvádějí nejvíce 4 prvky. Za chemickou značkou daného prvku následuje bez mezery číslice označující jeho hmotnostní procento v označované slitině.

Příklad označení slitiny hořčíku:

- číslem EN-MC21120
- značkou EN-MCMgAl9Zn1

Za tímto označením definujícím pouze materiál může následovat pomlčkou oddělené označení stavu (podmínek) tepelného zpracování.

Příklad:

- číslem: EN-MC21120-F-D
- značkou: EN-MCMgAl9Zn1-F-D

Význam těchto doplňkových značek je uveden v EN 1753. Je třeba též poznamenat, že i ČSN 42 1480 z roku 1990 byla v roce 1998 nahrazena normami:

ČSN-EN 1559-1 Slévárnictví – Technické dodací podmínky – Část 1: Všeobecně.

ČSN-EN 1559-5 Slévárnictví – Technické dodací podmínky – Část 5: Doplňkové požadavky na odlitky ze slitin hořčíku.

Charakteristika některých slitin hořčíku

Slitiny pro lití do písku

AM100A...Slitina s dobrou těsností za zvýšeného tlaku, dobrá kombinace pevnosti a tažnosti

AZ 63A...Slitina s dobrou pevností za pokojových teplot, tažností a tuhostí. Pro odlévání do kokil pro tzv. obětované anody (protikorozní ochrana bojlerů, nádrží a potrubí)

AZ81A-T4...Slitina s dobrými slévárenskými vlastnostmi, dobrá tuhost a tlakotěsnost

AZ 91 C...Univerzální slitina, mírná mez pevnosti. Slitina pro výrobu součástí letadel, strojírenských součástek, skříní převodovek

AZ92A-T6...Dobrá pevnost a tlakotěsnost

EQ21A-T6...Tlakotěsná, výborné vlastnosti při krátkodobém zvýšení teploty

EZ33A-T5...Dobré slévárenské vlastnosti, tlumicí schopnost, tlakotěsnost a odolná proti tečení materiálu do 245°C

HK31A-T6...Dobré slévárenské vlastnosti, tlakotěsnost a odolná proti tečení materiálu do 350°C

HZ32A-T5...Dobré slévárenské vlastnosti, tlakotěsná, lépe odolná proti tečení materiálu při 260°C než slitina HK31A-T6

K1A-F... Dobrá tlumicí schopnost

QE22A-T6...Dobré slévárenské vlastnosti, tlakotěsnost, vysoká mez kluzu až do 200°C

QH21A-T6... Dobré slévárenské vlastnosti, tlakotěsnost, dobrá odolnost proti tečení materiálu a vysoká mez kluzu do 250°C

WE43A-T6: Vysoká pevnost za normálních i zvýšených teplot (do 290 °C), dobrá korozní odolnost

WE54A-T6: Podobné jako WE43A-T6, ale pomalu ztrácí tažnost při teplotách nad 150 °C

ZC63A-T6: Tlakotěsná, lepší slévárenské vlastnosti a pevnější než AZ91C

ZE41A-T5: Tlakotěsná, střední mez pevnosti při zvýšených teplotách, zlepšená slévateľnost oproti ZK51A

ZE63A-T6: Používá se pro pevné, tenkostěnné odlitky, bez porezity

ZH62A-T5: Vysoká mez kluzu při normální teplotě
 ZK51A-T5: Dobrá pevnost a tažnost při normální teplotě
 ZK61A-T5: Podobné jako ZK51A-T5, ale s vyšší mezí kluzu
 ZK61A-T6: Podobné jako ZK61A-T5, ale s vyšší mezí kluzu

Slitiny pro lití do kovových forem

AE42-F: Dobrá pevnost, Dobrá odolnost proti tečení za tepla do 150 °C
 AM20-F: Vysoká tažnost a rázová pevnost
 AM50A-F: Vynikající tažnost
 AM60A a B-F: Podobné jako AM50A-F, ale mírně vyšší mez pevnosti. Slitina i pro lití pod vysokým tlakem s vynikající plasticitou, používaná pro vrtule a automobilová kola
 AS21-F: Podobné jako AE42-F
 AS41A-F: Podobné jako AS21-F, ale snížená tažnost a odolnost proti tečení, zvýšená pevnost a slévárenské vlastnosti
 AZ91A, B a D-F: Výborné slévárenské vlastnosti, dobrá pevnost v tahu. Slitina pro lití pod tlakem pro všeobecné použití pro součástky automobilů a počítačů, řetězových pil, sportovních náčiní, kamer, promítacích přístrojů a příslušenství pro domácnost

Hořčíkové slitiny pro kování

AZ31B-F: Dobrá kujnost, střední pevnost
 AZ61A-F: Silnější než AZ31B-F
 AZ80A-T5: Silnější než AZ61A-F
 AZ80A-T6: Lepší odolnost proti tečení než AZ80A-T5
 M1A-F: Dobrá odolnost proti korozi, nízká až střední pevnost
 ZK31-T5: Vysoká pevnost, střední svařitelnost
 ZK60A-T5: Pevnost podobná jako AZ80A-T5, ale při vyšší tažnosti
 ZK61-T5: Podobné jako AZ60A-T5
 ZM21-F: Dobrá kujnost, střední pevnost, dobrá tlumivost

1.2.5. Slitiny hořčíku pro tlakové lití

Slitina	Al	Mn	Zn _{max}	Si _{max}	Cu _{max}	Ni _{max}	Fe _{max}	Ostatní max. každý
AZ91	8,3-9,7	0,15-0,50	0,35-1,0	0,10	0,03	0,002	0,005	0,02
AM60	5,5-6,5	0,24-0,60	0,22	0,10	0,01	0,002	0,005	0,02
AM50	4,4-5,4	0,26-0,60	0,22	0,10	0,01	0,002	0,004	0,02
AM20	1,6-2,6	min.0,1	0,2	0,10	0,01	0,002	0,005	0,02
AS41	3,5-5,0	0,35-0,70	0,12	0,50-1,5	0,02	0,002	0,0035	0,02
AS21	1,8-2,6	min.0,1	0,2	0,70-1,2	0,01	0,002	0,005	0,02
AE42	3,5-4,5	min.0,1	0,2	0,10	0,02	0,002	0,005	0,02

Tab. 1-6: Chemické složení slitin hořčíku pro tlakové lití [10]

vlastnost	AZ91	AM60	AM50	AM20	AS41	AS21	AE42
R_m (MPa)	200-260	190-250	180-230	150-210	240	220	230
$R_{p0,2}$ (MPa)	140-170	120-150	110-130	80-100	140	120	145
A (%)	1-6	4-14	5-15	8-18	15	13	11
nárazová práce (J)	6	17	18	19	16	12	12
tvrdost	65-85	55-70	50-65	40-55			

Tab. 1-7: Mechanické vlastnosti slitin hořčíku pro tlakové lití [9]

1.2.6. Mechanické a fyzikální vlastnosti slitiny AZ91

Slitina AZ91 je nejpoužívanější slitinou pro tlakové lití, která obsahuje 9% Al a 1% Zn. Má výbornou zabíhavost a umožňuje odlévat tenkostěnné, tvarově velmi složité odlitky. Slitina má vysokou pevnost, ale pouze střední tažnost a rázovou houževnatost. Mechanické vlastnosti se nad teplotou přibližně 120°C velmi rychle snižují. Pro aplikace, u nichž se vyžaduje vyšší tažnost a houževnatost se snižuje obsah Al a Zn, který je nahrazen Mn. Pro teploty vyšší než 200°C se používají slitiny legované kovy vzácných zemin.

Mechanické vlastnosti hořčkových slitin

Slitiny hořčíku jsou dostupné v širokém okruhu mechanických vlastností. Mechanické vlastnosti velmi významně závisí na složení slitiny, na stavu (kov tvářený nebo sléváný), detaily ze zhotovení, tepelné zpracování a další faktory.

Slitina		AZ91D	AM50A	AM60B
Chem. Složení				
Hliník	[%]	8,5-9,5	4,5-5,3	5,6-6,4
Mangan	[%]	0,17-0,3	0,28-0,50	0,26-0,50
Zinek	[%]	0,45-0,9	0,20 max	0,20 max
Křemík	[%]	0,05 max	0,05 max	0,05 max
Měď	[%]	0,025 max	0,008 max	0,008 max
Nikl	[%]	0,001 max	0,001 max	0,001 max
Železo	[%]	0,004 max	0,004 max	0,004 max
Berilium	[%]	0,0005- 0,0015	0,0005- 0,0015	0,0005- 0,0015
Ostatní	[%]	0,01 max	0,01 max	0,01 max
Fyzikální vlastnosti				
Hustota	[Kg/m ³]	1810	1790	1780
Rozsah tavení	[°C]	470-595	543-620	540-615
Tvrdost *		75	57	62
(*) Tvrdost dle Brinella (500 kg zátěž a 10 mm kulička)				
Mechanické vl.				
$R_{p0,2}$	[MPa]	150	120	130
R_m	[MPa]	230	220	220
A	[MPa]	3	6 až 10	6 až 8

Tab. 1-8: Chemické složení a vlastnosti slitin typu AM a AZ

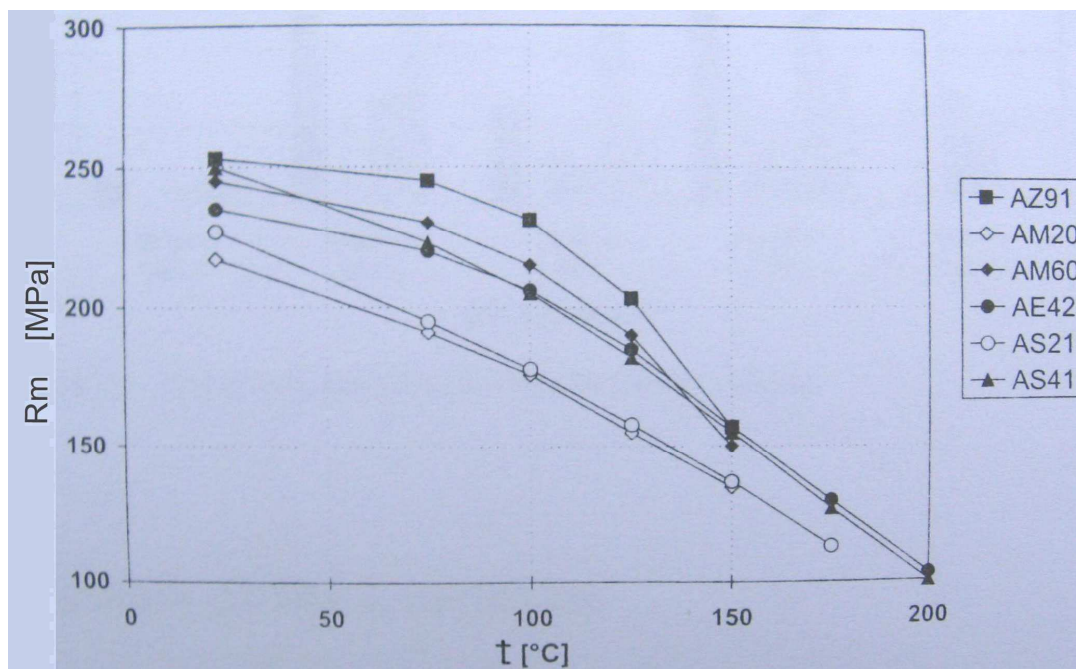
1.2.7. Vlastnosti slitin hořčíku za vysokých teplot

Zesilující účinek hliníku, který se přidává v množství 4 až 9 hm. % do roztaveného kovu, je znám již od roku 1920. Ale na druhé straně vysoký obsah hliníku způsobí, že se mezi dendrity začne na okrajích zrn tvořit fáze $Mg_{17}Al_{12}$, která snižuje mez pevnosti při teplotách nad 120 °C [1].

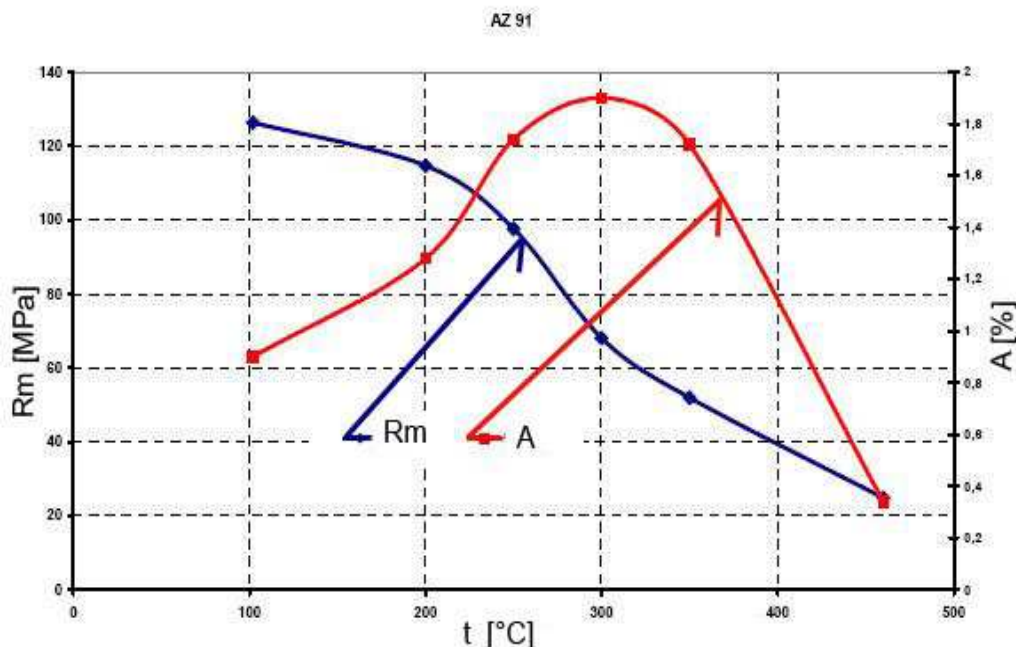
Z tohoto důvodu byl později hliník nahrazován jinými prvky, které nemají tak nepříznivé vlastnosti při vyšších teplotách. Např. při produkci VW- Beetle byly použity hořčíkové slitiny s křemíkem. Slitiny byly označeny jako AS21 a AS41. Prokázaly mnohem lepší vlastnosti za zvýšených teplot a odolnost proti tečení než slitina AZ91. Mechanismus je založený na tvorbě intermetalické fáze Mg_2Si ($t_f = 1085$ °C), která má dobrou stabilitu za vyšších teplot. Toto platí jen pro napětí, která neporušují precipitáty. Nad 120 °C se slitina AZ91 stává více odolnou proti tečení, hlavně díky možnosti zpevnění tuhého roztoku hliníkem. Experimenty s přidáním vápníku byly ukončeny vzhledem k problémům při lití, kdy vápník způsoboval, že se slitina lepila na formu [1].

V této souvislosti se musí vzít v potaz slitiny typu AE, i když jejich velmi stabilní precipitáty mohou být vytvořeny jen v odlitcích litých pod tlakem, díky vysoké rychlosti ochlazování. Slitiny typu AE, hlavně AE42, jsou nejlepší variantou pro aplikace, ve kterých se klade velký důraz na odolnost proti tečení materiálu za vysokých teplot.

Podle odolnosti proti tečení za vysokých teplot můžeme slitiny seřadit následovně: AZ91 a AM60 do 110°C, AS41 do 150 °C, AS21 do 175 °C. Slitina AE42 nebývá často používána, protože její maximální teplota použití je srovnatelná se slitinami typu AS. Tzn. že pro reálné aplikace může být slitina AZ91 více odolná proti tečení než slitina AE42.



Obr. 1-9: Závislost pevnosti v tahu na teplotě [1]

Obr. 1-10: Závislost R_m a A na teplotě u AZ91

1.2.8. Tepelné zpracování hořčíkových slitin

Tepelné zpracování hořčíkových slitin se používá hlavně za účelem značného zlepšení mechanických vlastností a odstranění vnitřních pnutí. Tepelné zpracování se dělí na tři fáze:

- Ohřívací fáze
- Výdrž na teplotě
- Ochlazovací fáze

Teplota v peci se musí během první fáze zvedat velmi pomalu, z důvodu vyhnutí se rozdílu teplot mezi vnější a vnitřní částí odlitku. Rychlé ohřátí odlitku by mělo za následek vznik napětí a následně i vznik trhlin, které by byly způsobeny tepelnou rozpínavostí odlitku.

V průběhu druhé fáze, je teplota i délka výdrže velmi důležitá pro konečný výsledek tepelného zpracování. Tyto dvě hodnoty závisí na rozměrech odlitku a na požadovaných mechanických vlastnostech. Oproti slitinám hliníku je délka této fáze podstatně delší (až 16 hodin). To je způsobeno difúzními pochody, které jsou u slitin hořčíku mnohem pomalejší [3].

Chlazení hořčíkových odlitků má být způsobeno proudícím vzduchem pro urychlení této fáze.

Tepelné zpracování odlitků ze slitin hořčíku se provádí většinou v elektrických komorových pecích, někdy v pecích vakuových. Jsou to pece s automatickou regulací teploty s tolerancí 5°C. Dalším důležitým požadavkem na kvalitu tepelného zpracování je vysoká homogenita rozložení teploty v objemu pece a stav atmosféry v peci.

Pro zamezení oxidace se doporučuje vzdušná atmosféra s 0,7% až 1% oxidu siřičitého. Další možností jak zamezit oxidaci povrchu odlitků při tepelném zpracování je ohřev odlitků v taveninách solí, směsi dvojchromanu sodného a draselného. Dusičnany nebo kyanidy jsou zakázány z důvodu nebezpečí exploze nebo nebezpečí otravy [3].

U hořčikových slitin se využívají hlavně tyto způsoby tepelného zpracování:

Homogenizační žíhání slouží k odstranění nerovnovážného rozdělení přísadových prvků v objemu slitiny po krystalizaci a tím ke zlepšení pevnostních charakteristik odlitků. Tato operace probíhá při 400 – 420 °C po dobu 15 – 30 hodin [18]. Hořčiková slitina AZ91 je v litém stavu křehká, v důsledku značného množství eutektických částic sloučeniny Mg_4Al_3 vyloučených po hranicích zrn tuhého roztoku α . Po ochlazení odlitku z teploty homogenizačního žíhání je struktura tvořena homogenním tuhým roztokem α a menším množstvím nerozpuštěných minoritních fází, zejména částic manganu, který bývá přítomen jako příměs.

Žíhání na snížení vnitřního pnutí se provádí po operaci, která vznik těchto pnutí vyvolává. Vnitřní pnutí u odlitků bývá způsobeno nestejně rychlým ochlazením různých průřezů, vlivem bržděného smršťování v nepoddajné formě nebo tuhou konstrukcí odlitku. Obvyklé teploty pro tuto operaci jsou 235 až 290°C. Při tomto tepelném zpracování může dojít ke snížení mechanických vlastností slitiny.

Rekrystalizační žíhání má menší význam, protože většinu slitin hořčíku lze tvářet pouze za tepla. Provádí se jako mezioperace při tváření slitin hořčíku za studena. Obvykle se používá rozmezí teplot 250 až 350°C. Za vyšších teplot dochází k hrubnutí zrna a zhoršují se mechanické vlastnosti.

Vytvrzování je použitelné jen u soustav slitin, kde je nárůst pevnosti dostatečně velký. Vytvrzování se sestává z rozpouštěcího ohřevu (390°C až 420°C po dobu 10 až 18 hod [11]) a následujícího umělého stárnutí. Výše teploty a délka prodlevy záleží na typu slitiny a na tloušťce stěn odlitku. Zvláštností je možnost ochlazení slitin hořčíku z teploty rozpouštěcího ohřevu volně na vzduchu nebo v horké vodě. U některých slitin se doporučuje provádět umělé stárnutí bez předchozího rozpouštěcího ohřevu [3].

Stárnutí se aplikuje jenom kvůli snížení napětí v odlitku a stabilizování slitiny za účelem rozměrové stálosti, zvláště během nebo po obrábění. Stárnutím je zvýšena mez kluzu a pevnost na úkor tažnosti, a je zlepšena odolnost proti korozi.

Teploty precipitačního vytvrzování (stárnutí) jsou v rozsahu 160 až 260 °C a délka výdrže na teplotě je 4 až 18 hodin [11].

Stav	A	Rp _{0,2}	Rm	
	[%]	[MPa]	[MPa]	
F	2	95	165	Normální
	--	75	160	Minimální
T4	14	85	275	Normální
	7	75	235	Minimální
T6	5	130	275	Normální
	3	110	235	Minimální

Tab. 1-9: Mechanické vlastnosti slitiny AZ91 po tepelném zpracování [11]

Poznámky k **tab. 1-9**:

F.....V litém stavu

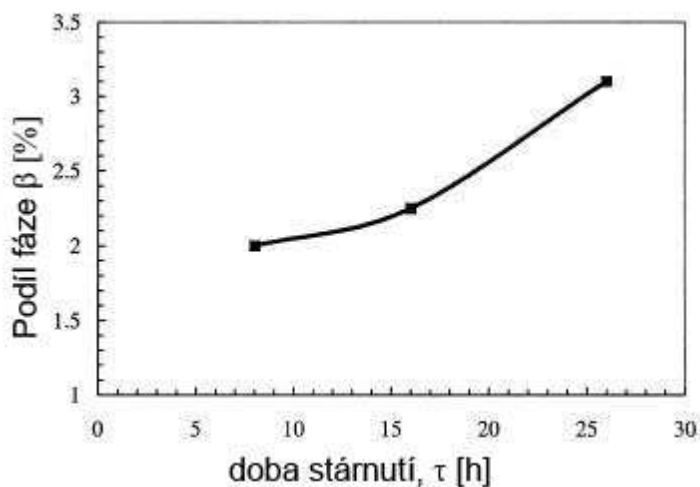
T4...Rozpouštěcí ohřev a následné vytvrzení za studena

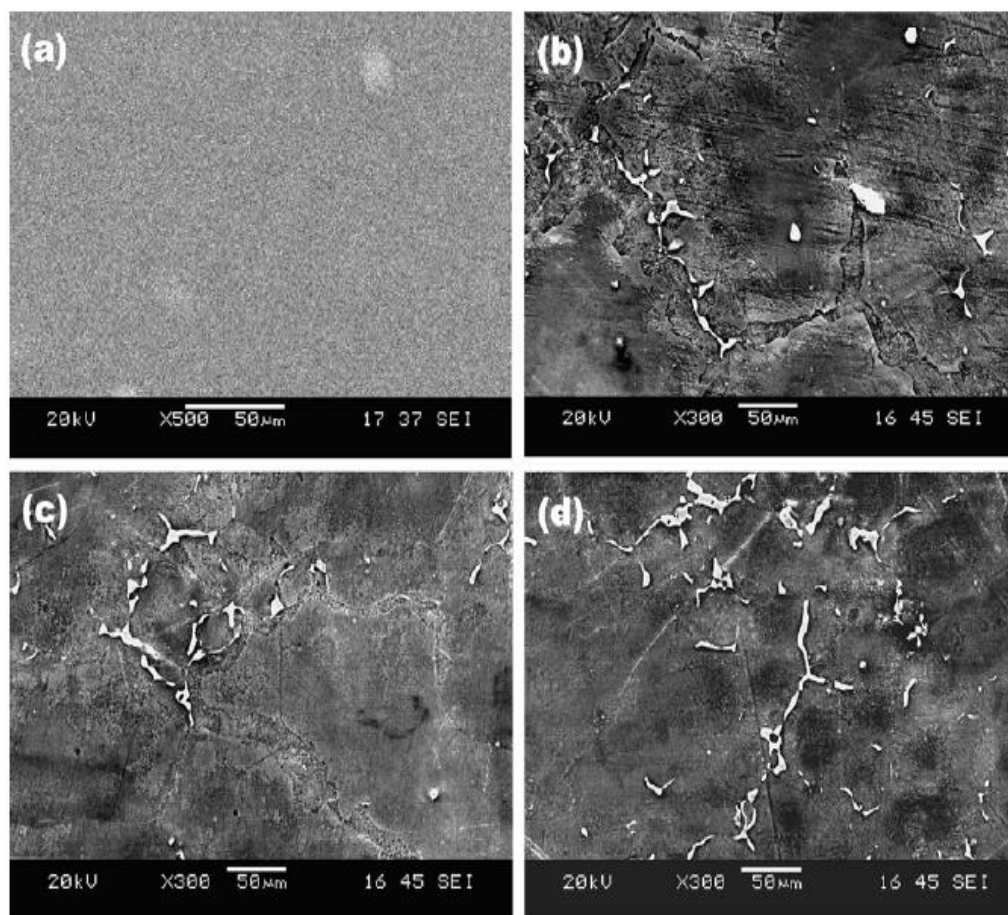
T6... po rozpouštěcím ohřevu s ochlazováním na vzduchu a následujícím umělém stárnutí

Stav	Teplota	Doba	Rp _{0,2}	Rm	A ₁₀	Z
	[°C]	[h]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
Litý stav			95	170	3	4
Homogenizační žíhání	410 až 420	8 až 16	85	260	8	10
Homogenizační žíhání + stárnutí	410 až 420	8 až 16				
	170 až 205	16	120	260	3	8

Tab. 1-10: Tepelné zpracování AZ91 s ochlazováním na vzduchu [3]

Na **obr. 1-12** jsou znázorněny vlivy tepelného zpracování na mikrostrukturu. Je zde vidět primární fáze α , eutektická fáze α a β precipitáty. Homogenizace při teplotě 420°C po dobu 24 hod je známá jako dobrý způsob jak rozpustit β precipitáty (**obr. 1-12 a**). Umělé stárnutí způsobuje srážení fáze β , jak je ukázáno na **obr. 1-12(b)-(d)**. Při stárnutí po dobu 8 hodin se vysrážely částice β hlavně podél hranic zrn (**obr. 1-12 b**). Když bylo stárnutí prodlouženo na 16 až 26 hodin je viditelné, jak fáze β rostla skrz zrna nespojitě (**obr. 1-12 c** a **d**). Při delším stárnutí je vidět, že se mírně zvětšuje objem frakce β (**obr. 1-11**).

Obr. 1-11: Vliv doby stárnutí na precipitaci fáze β



Obr. 1-12: Struktura slitiny AZ91D po tepelném zpracování a stárnutí [12]

1.2.9. Koroze slitin hořčíku

Hořčíkové slitiny typu AZ91 (MgAl9Zn1) s dobrou obrobiteľnosťou a slévateľnosťou dosahujú pomerně vysokých hodnot pevnostních vlastností. Vykazují však nízkou korozní odolnost ve vodních prostředích obsahujících chloridy, sírany apod. ve srovnání s ostatními technicky významnými materiály. Zvýšením obsahu Al (2 až 8%) v odlitcích se zlepšuje odolnost proti rovnoměrné korozi, přitom však klesá odolnost proti koroznímu praskání. Korozní praskání vzniká společným působením vnějších a zejména vnitřních tahových pnutí a agresivního prostředí. Tlaková pnutí mají účinek inhibiční. Praskání se projevuje vznikem transkrystalových i mezikrystalových trhlinek. Praskání se v podstatě neprojevuje u čistých kovů, velmi často však u slitin.

Hliník zvýrazňuje také škodlivý účinek železa, opačně působí mangan a zinek. Alkalické prostředí podporuje růst filmu a omezuje korozi. Při nadměrných tloušťkách vznikají na rozhraní $\text{Mg(OH)}_2/\text{Mg}$ defekty anebo trhliny, které mohou působit jako místa iniciace koroze. Při korozi hořčíku se projevují specifické procesy, jako negativní diferenční jev, korozní tečení. Rychlost tečení v korozním prostředí se zvyšuje s obsahem hliníku, přitom creepová životnost klesá [1].

Charakteristika koroze hořčíku

Hořčík se vyznačuje negativním elektrodoým potenciálem (standardní potenciál $Mg = -1,55 \text{ V}$). Při korozi v elektrolytech je proto reaktivní a výrazně převládá vodíková depolarizace. Z těchto důvodů je z korozního hlediska vhodnost použití závislá na stálosti vrstvy, která se na aktivním povrchu kovu vytváří při interakci s okolním prostředím.

V alkalickém prostředí je na rozdíl od hliníku při vytváření oxidové vrstvy oxid hořčíku nestabilní a přechází na oxohydroxidy a hydroxidy. Vzhledem k nízké rozpustnosti hydroxidu hořečnatého je kov v tomto prostředí stabilní.

V kyselém prostředí je naopak hořčík nestabilní a rychle koroduje. Výjimku tvoří prostředí, ve kterých se vytváří pasivační oxidová vrstva, např. v roztocích kyselin chromové.

Pro korozní odolnost je velmi důležitý také obsah nečistot. Škodlivá je přítomnost železa, niklu a mědi. Limitující je také obsah korozních stimulátorů v korozním prostředí.

Charakteristika koroze slitin hořčíku

Koroze hořčíkových slitin v elektrolytech je obvykle rovnoměrná a korozí dochází ke zdrsňení povrchu. Porušení ochranné vrstvy vede k nebezpečnému bodovému napadení nebo praskání, především v přítomnosti chloridů. Bodové napadení (pitting) vzniká i vlivem mikroskopických nečistot katodického charakteru. Tvorba nerovnoměrné koroze je významně ovlivněna i přítomností stimulujících a naopak inhibujících iontů. Velký význam pro mechanismus, kinetiku a formy koroze hořčíkových slitin má kontakt s jinými kovy nebo slitinami.

Možnosti zvýšení odolnosti proti korozi [1]

- Větší čistota slitiny
- Přidání legujícího prvku – největšího zlepšení odolnosti proti korozi se dosáhne legováním kovy vzácných zemin (Nd, La, Ce).
- Ošetření povrchu

Ošetření povrchu má některé zásady:

- I nejlepší ochrana proti korozi je zbytečná pro slitiny, které nejsou vysoce čisté (tj. slitiny bez označení HP).
- Licí kůra odlitku litého pod tlakem je nejtěsněji zhuštěná oblast. Odstraněním licí kůry čištěním v kyselinách nebo strojním opracováním a následném použití odlitku má za následek mnohem horších korozních rychlostí než při zachování licí kůry.
- Povrchová ochrana je méně efektivní na pórovitém odlitku než na „zdravém“.
- Povrch odlitku nesmí být upravován tryskáním (skleněnými perlami, částčkami korundu) jako je tomu u hliníku.

Metody pro předběžnou povrchovou úpravu	mechanické: broušení, leštění, otírání, tryskání čištění: použití anorganických rozpouštědel a alkalických čistidel		
Metody pro anorganické povrchové nátěry	chemické ošetření	elektrochemické ošetření	fyzikální metody
	Bondering	eloxování (HAE, DOW, UBE, TAGNITE, MAGOXID)	PVD
	chromátování	galvanizování (Zn, Cu, Ni, Cr, atd.)	plasmové nástřiky plamenné nástřiky
Metody pro organické povrchové nátěry (na anorganický nátěr)		nástřik mokřý lak práškový lak dekorativní nátěr ponorný lak	

Tab. 1-11: Typy ošetření povrchu hořčíkových materiálů [1]

Problémy:

- 1) Pozornost je věnována podstatně více hliníku a hliníkovým slitinám než problematice ochrany hořčíku a hořčíkových slitin.
- 2) Nové typy chemických předúprav kovů (kombinované oxidové povlaky, komplexotvorné povlaky) nejsou dosud pro aplikace u hořčíku a slitin hořčíku dostatečně ověřeny, není dostatečně propracován mechanismus ochranné funkce a optimalizace podmínek zhotovování.
- 3) Nové typy slitinových povlaků, kompozitních povlaků, polymerních povlaků, polymerních inhibitorů nejsou dosud pro aplikace u hořčíku a slitin hořčíku dostatečně ověřeny, není dostatečně propracován mechanismus ochranné funkce a optimalizace podmínek zhotovování.
- 4) Nedostatečně propracovaná je problematika laboratorního modelování korozní odolnosti hořčíku a slitin hořčíku a interpretace dosažených výsledků pro reálné podmínky korozního systému Mg (Mg slitina) – korozní prostředí.

Podmínky pro řešení problémů

- 1) Zařízení pro zhotovování laboratorních modelů povrchových úprav a hodnocení znaků jakosti (tloušťka, přilnavost, klimatická a korozní odolnost).
- 2) Elektrochemická polarizační technika pro stanovení korozních diagramů studovaného systému Mg slitina – korozní prostředí (např. fy Solea Tacussel, Francie).
- 3) Využití stávající metalografické a mikroskopické techniky.

1.3. Gravitační lití

1.3.1. Lití do pískových forem

Slitiny hořčíku lité do pískových forem nacházejí uplatnění v leteckém průmyslu, protože nabízejí jasnou váhovou výhodu oproti slitinám hliníku. Velké množství různých výzkumů a projektů mělo za následek výrazná zlepšení v základních vlastnostech, které bývají srovnávány se slitinami typu AZ.

V leteckém průmyslu je ještě hodně slitin typu AZ, trend vývoje směřuje k větší produkci a využití slitin na bázi Mg–Zr.

Ačkoliv slitiny typu Mg–Al a Mg–Al–Zr se dají celkem snadno odlévat, jsou omezeny v jistých ohledech. Když se tyto slitiny lijí do písku, často se v nich tvoří mikrostaženiny. Dále bylo vyzkoušeno, že nejsou vhodné pro použití v teplotách vyšších než 95 °C. Slitiny hořčíku s kovy vzácných zemin a zirkonem byly vyvinuty, aby překonaly tyto omezení.

Tyto slitiny byly nahrazeny slitinami s thorem. Slitiny ZH62A a HZ32 vykazují větší pevnosti za tepla (až do 205 °C). Ale mají větší sklon k oxidaci, proto potřebují lepší péči při tavení a lití [13].

Dalším vývojem směřovaným k vyšší pevnosti za zvýšených teplot se objevila slitina QE22A. V této slitině nahradilo stříbro část obsahu zinku a mechanické vlastnosti byly zlepšeny zjemněním zrna zirkonu tepelným opracováním T6 (tj. homogenizační žíhání, následné rychlé ochlazení ve vodě a precipitačního vytvrzení za tepla). Avšak i tato slitina nedospěla k využití ve slévárenství, díky velmi nestabilní ceně stříbra.

Jako slitina, která nahradila slitiny se stříbrem i thorem se ukázala slitina WE54A. Obsahuje asi 5 % Y a další kovy vzácných zemin. Tato slitina má vyšší mechanické vlastnosti za zvýšených teplot a dobrou odolnost proti korozi, než slitiny typu AZ91C.

Například slitina EZ33A litá do pískové formy prokázala výbornou tlakovou těsnost odlitku. Větší tendencí zirkonu k oxidaci se předchází speciálně vyvinutými procesy tavení.

Další dvě vyvíjené slitiny na bázi Mg–Zn–Zr, jsou velmi náchylné k praskání za tepla a navíc jsou nesvařitelné [13].

Pro použití za normálních teplot (až 160 °C) se používají slitiny ZE41A a EZ33A. Slitiny mají dobré slévárenské vlastnosti a jdou z nich odlévat i tvarově složité odlitky. Navíc mají výhodu v tom, že vyžadují tepelné opracování T5 (tj. umělé stárnutí při relativně nízkých teplotách bez předchozího homogenizačního žíhání. 205-260 °C / 7-10 hodin) [2].

1.3.2. Gravitační lití do kovových forem

Pro tento typ lití se používají hlavně slitiny typu AZ. Vůbec nepoužívanější jsou slitiny AZ91A a AZ91B. Jediný rozdíl mezi těmito slitinami je vyšší povolený obsah mědi u AZ91B.

Výhody hořčíku před některými kovy:

- Je to hojně dostupný kov
- Je šetrnější ke stroji než hliník
- Lépe se obrábí než hliník

Slitiny hořčíku se mohou lít asi čtyřikrát rychleji než slitiny hliníku. Moderní metody lití a použití ochranných nátěrů zabezpečí dlouhou životnost formy. Dnešní nejmodernější technologie umožňují produkovat odlitky s tenkými stěnami a o velké tvarové složitosti.

Pece pro tavení a udržování roztavených hořčíkových slitin jsou s nepřímo zahříváním tavícím kelímkem. Jsou podobné pecím na slitiny hliníku. Jakmile se hořčík nataví je nutno jej chránit před oxidací. Roztavené slitiny hořčíku se chovají jinak než slitiny hliníku. Slitiny hliníku vytvoří na povrchu vrstvu oxidů, která je pro další oxidaci téměř neprostupná. Naopak slitiny hořčíku mají na povrchu vrstvu oxidů, ale tato vrstva dále propouští kyslík k oxidaci, tím pádem dochází pod vrstvou oxidů k hoření. Proto se tyto slitiny taví pod struskou nebo v ochranné atmosféře plynu.

Další výhoda hořčíku je, že může být uchováván v ocelových kelímcích.

1.4. Tlakové lití

Tlakové lití je technologie, kdy je tlak metalostatický nahrazen tlakem lisovacího pístu. Roztavený kov je dávkován do komory tlakového licího stroje a působením tlaku pístu, o velikosti 2 až 500 MPa, hnán přes vtokovou soustavu do dutiny formy.

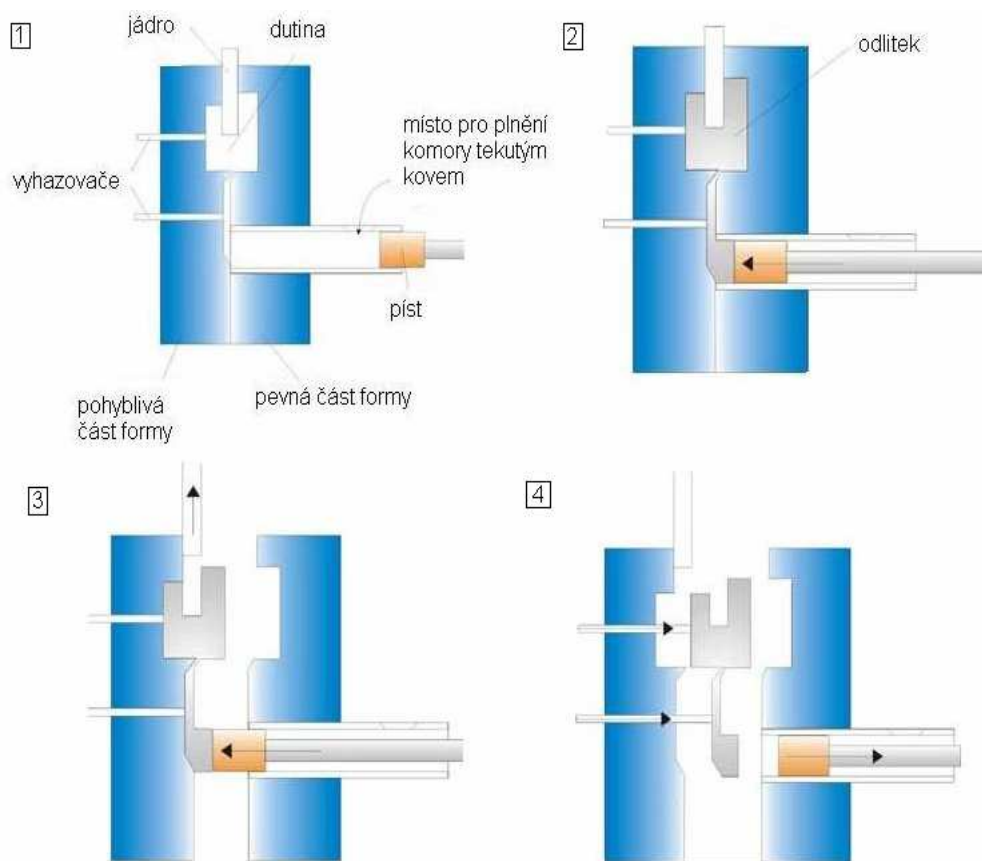
Metoda tlakového lití se dnes hojně využívá pro řadu technických výhod. Mezi nejdůležitější z nich patří, možnost výroby tvarově složitých odlitků s předlitými otvory, s vysokou rozměrovou přesností a hladkostí povrchu s minimálními přídávky na obrábění, jemnozrnnou strukturou a tím i vyššími mechanickými vlastnostmi. Je to nejrychlejší technologie výroby přesných odlitků z neželezných kovů. Skutečnost, že hořčík nereaguje s ocelovými formami, tak intenzivně jako hliník, zajišťuje vyšší životnost forem a umožňuje vyrábět formy s menšími úkosal [10].

Slévárenské vlastnosti hořčíku při tlakovém lití jsou výborné. Jeho vlastnosti při tečení jsou mnohem lepší než u neželezných kovů jako je hliník a zinek. Tyto vlastnosti nám dovolují odlévání tenkostěnných odlitků a tím se i snižují náklady na materiál [1].

Zda pro výrobu použít stroj se studenou licí komorou nebo stroj s teplou licí komorou, rozhoduje hmotnost odlitku. Pro odlitky do 1 kg se používají stroje s teplou licí komorou a pro odlitky s vyšší hmotností se používají stroje se studenou komorou [1].

1.4.1. Stroje se studenou licí komorou

Tlakové licí stroje se studenou komorou se liší od strojů s teplou komorou jen v jedné věci: komora není ponořena do roztaveného kovu. Roztavený kov je dávkován do komory licího stroje ručně, pomocí naběračky nebo tavící a zároveň dávkovací pece, která je jeho součástí. Hydraulicky ovládaný píst tlačí roztavený kov do dutiny formy. Vstřikovací tlaky jsou v rozsahu 20 MPa až 70 MPa u hliníkových a hořčíkových slitin. Díky krátké době tuhnutí a zabíravosti hořčíkových slitin je doba plnění formy a rychlost licího pístu větší, než u slitin hliníku.

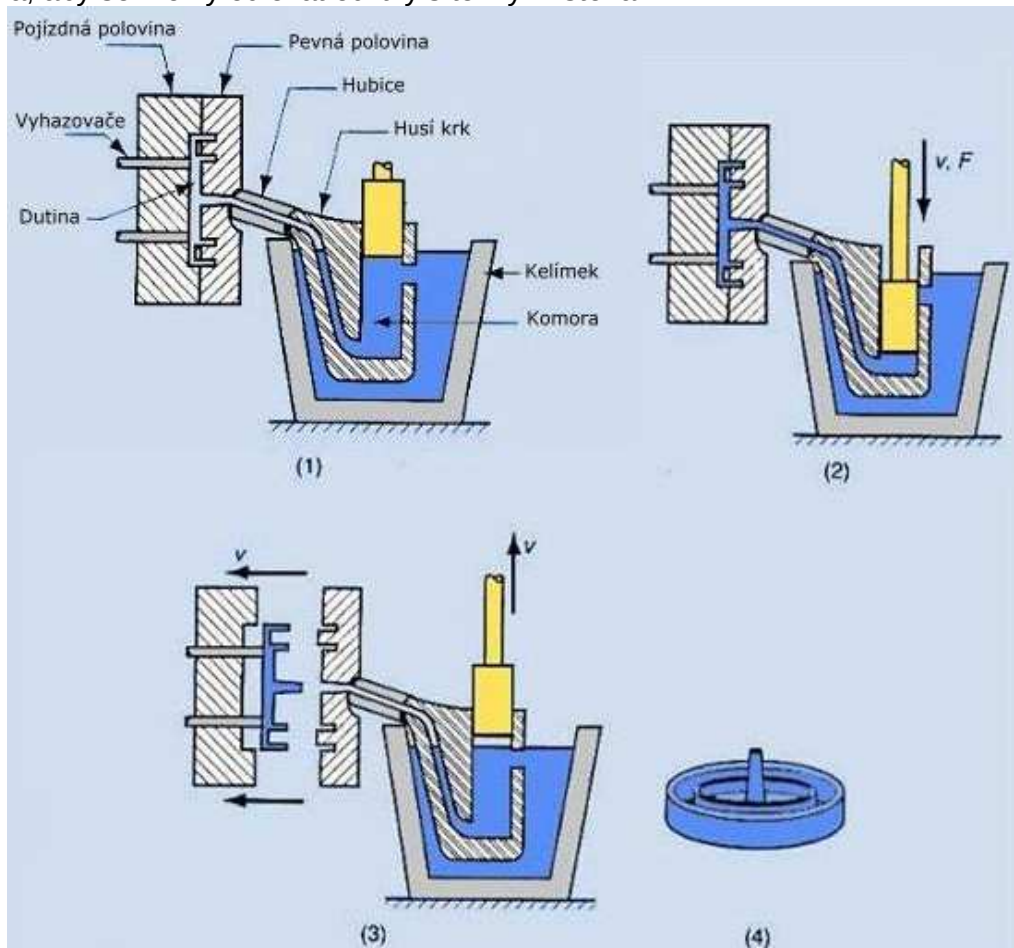


Obr. 1-13: Schéma práce tlakového stroje se studenou komorou [14]

- 1) Kov je nalit do komory.
- 2) Kov je vtlačěn pístem do dutiny formy a je držen při určitém tlaku až do ztuhnutí.
- 3) Forma se otevře a píst zajistí, že se již natuhlý kov ve tvaru odlitku udrží na vyhazovačích formy. Jádra vyjedou z formy.
- 4) Vyhazovače vytlačí odlitek z pohyblivé části formy a píst se vrátí do počáteční polohy.

1.4.2. Stroje s teplou licí komorou

Při správné konstrukci je specifický tlak 160 až 250 barů (asi 16 až 25 MPa). Také pro tuto technologii platí, že rychlost lisovacího pístu musí být dostatečně velká, aby se mohly odlévat odlitky s tenkými stěnami.



Obr. 1-14: Schéma práce stroje se s teplou licí komorou [15]

Popis taktu stroje z **obr. 1-14**:

- 1) Forma je zavřená a zabezpečená. Píst je v horní poloze.
- 2) Píst vstříkne kov skrz husí krk do formy. Píst dodržuje tlak dokud kov nenatuhne.
- 3) Poté se píst vrátí do výchozí polohy, zatím co odlitek zůstává ve formě.
- 4) Odlitek je uvolněn z formy vyhazovači.

1.4.3. Porovnání tlakových licích strojů

Výhody stroje se studenou licí komorou:

- Jdou odlévat slitiny hliníku, zinku i hořčíku.

- Vyššími vstřikovacími tlaky a vyšší rychlostí pístu může být dosaženo lepší vnitřní struktury odlitku.
- Nižší udržovací náklady.

Nevýhody stroje se studenou licí komorou:

- Pomalejší cyklus.
- Horší kontrola nad teplotou kovu.
- Kov se ochladí v komoře před vstřelením.
- Roztavený kov oxiduje a může být znečištěn atmosférou v licí komoře nebo při nalévání do komory.

Výhody stroje s teplou licí komorou:

- Vstřelovací píst ponořený do roztaveného kovu snižuje čas cyklu. To je způsobeno hlavně automatickým plněním komory.
- Výborná kontrola nad teplotou roztaveného kovu, která dovoluje nižší lisovací tlaky. Lepší tekutost zklidňuje plnění dutiny formy, „zdravější“ odlitky a mohou se odlévat odlitky s tenčími stěnami.
- Nedochozí k ochlazování kovu, které je způsobeno plněním komory u strojů se studenou licí komorou.
- Téměř odpadá možnost znečištění taveniny oxidací nebo atmosférou v komoře pístu.

Nevýhody strojů s teplou licí komorou:

- Touto technologií nemohou být zpracovány všechny slitiny hliníku, zinku a hořčíku.
- U nižších vstřelovacích tlaků bude struktura méně zhutněná.
- Vyšší provozní náklady.

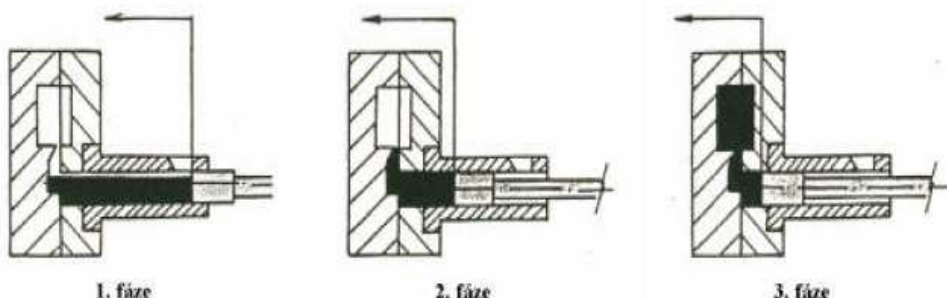
1.4.4. Vstřikovací mechanismus tlakového licího stroje

Úkolem tohoto mechanismu je dopravit kov z komory stroje do formy za působení lisovacího tlaku. Vstřikovací mechanismus pracuje ve třech fázích:

1) První fáze (předplňovací) – začíná v klidové poloze pístu a končí v okamžiku, kdy se kov dostane k naříznutí. Pohyb pístu bývá omezen během přejetí nalévacího otvoru, aby nedošlo k vystříknutí kovu. Pohyb pístu bývá regulován tak, aby nedošlo k vytvoření vlny a turbulentnímu proudění. Rychlost v této fázi se nazývá přepřňovací rychlost.

2) Druhá fáze (plnění) – začíná v okamžiku, kdy kov opustí naříznutí a končí, když se zaplní forma kovem a zastavením pístu. Plnění probíhá zvýšenou rychlostí, která se nazývá plnění rychlost a je to jeden z nejdůležitějších technologických parametrů. Plnění rychlost může být u materiálů na bázi hořčíku vyšší než u hliníku.

3) Třetí fáze (dotlak) – začíná po ukončení pohybu pístu. V této fázi dochází ke zvýšení tlaku pístu na kov a udržení této hodnoty do ztuhnutí kovu.



Obr. 1-15: Jednotlivé fáze činnosti vstřikovacího mechanismu

1.4.5. Periferie pracoviště tlakového liti

Tlakové lící centrum je komplexní pracoviště, které se skládá z komponentů, které svou činností ovlivňují stupeň automatizace celého pracoviště. Nejvyšší stupeň automatizace umožňuje bezobslužný chod celého centra.

Základní části tlakového lícího centra:

- tlakový lící stroj s udržovací pecí
- dávkovací zařízení tekutého kovu
- zařízení pro ošetřování formy
- manipulační zařízení pro vyjímání odlitku, případně pro vkládání zalitých částí
- zařízení pro rozměrovou kontrolu a kontrolu celistvosti odlitku
- zařízení pro zchlazení odlitku
- ostřihovací lis

Tlakový lící stroj

Pec by měla být umístěna co nejbližší vstřikovacímu mechanismu. Velikost pece závisí na spotřebě roztaveného kovu a na počtu cyklů za minutu. Obsah pece by měl stačit minimálně na dvě hodiny provozu.

Dávkovací zařízení

Dávkovací zařízení musí zajišťovat plynulou regulaci dávky kovu a dávkování v toleranci 3%. Dávkovacím zařízením byla dříve pneumatická nebo mechanická lžíce, která nalévala kov do dutiny lící komory. Dnes se používají dávkovací pece, např. od firmy Striko westofen.

Zařízení pro ošetřování formy

V dnešní době to bývá nejčastěji robot, který pomocí integrované hlavy ostříkuje formu.

Manipulační zařízení pro vyjímání odlitku, případně pro vkládání zalitých částí

Pro manipulaci s odlitkem se používají manipulátory a nebo roboty. Manipulátor je v porovnání s univerzálními průmyslovými roboty jednodušší a hlavně finančně méně nákladný.

Robot je vhodné použít v případě, že nevykonává pouze vyjmutí odlitku z formy, ale i další operace:

- kontrola odlitku
- ochlazení odlitku
- založení do ustříhovacího lisu
- vyjmutí z ustříhovacího lisu
- uložení do palety
- ošetřování formy

Robot bývá opatřen různými technologickými hlavicemi, které vykonávají různé operace a slouží jako polohovací systém.

Zařízení pro rozměrovou kontrolu a kontrolu celistvosti odlitku

Toto zařízení zabráňuje výrobě neshodných výrobků a poškození formy v případě, že by zůstala ve formě část odlitku nebo vtokové soustavy. Pracuje na principu optickém nebo na principu infračervených čidel (častější).

Zařízení pro ochlazení odlitku

Před vložením odlitku do ostříhovacího lisu je třeba odlitek zchladit, vodou (vodní lázní, sprchou) nebo vzduchem.

Ostříhovací lis

Ostříhovací lis od odlitku odděluje vtokovou soustavu a přetoky. Většinou jsou to vertikální ostříhovací lisy. Z lisu je odlitek vyjímán nebo se pomocí skluzů dopravuje do palet.

Výrobci strojů pro tlakové lití:

Bühler (Švýcarsko), www.buhlergroup.com

Colosio (Itálie), www.colosiopresse.it

Dynacast (USA), www.dynacast.com

Frech (Německo), www.frech.com

Italpresse (Itálie), www.italpresse.it

Muller-Weingarten (Německo), www.muller-weingarten.com

Techmire (Kanada), www.techmire.com

Toshiba (Japonsko), www.toshiba-machine.co.jp/english/product/diecast/index.html

Ube (Japonsko), www.ubemachinery.com/index.asp

1.5. Tavení hořčkových slitin

Vsázka je do sléváren dodávána v požadovaném složení v podobě housek. Chemické složení tavby se už ve slévárně dále neupravuje. Hlavním problémem u tavení hořčkových slitin je velká afinita hořčíku ke kyslíku. Oxidace probíhá

jako komplexní chemická reakce závislá na teplotě a ovlivňovaná určitými legujícími prvky.

Zjednodušeně lze tuto reakci popsat následovně:

- Na povrchu odlitku se při lití vytváří silná vrstva oxidů, která vzniká reakcí se vzduchem a nebo s plyny, které se vypařují z formovacích materiálů. Při teplotách do 450°C se vytváří velmi tenká vrstva MgO, kterou najdeme jen na obrobených plochách odlitku, protože na ostatním povrchu je již zmiňovaná silnější vrstva oxidů hořčíku.
- Budeme-li zvyšovat teplotu odlitku z hořčkové slitiny nad 450°C, začne se vrstva MgO porušovat a ztratí svůj ochranný účinek. Důsledkem toho je Pillingovo – Bedworthovo pravidlo. Poměr mezi měrným objemem vznikajícího oxidu a měrným objemem kovové fáze je nižší než 1, tzn. na povrchu kovu vzniká nesouvislá vrstva oxidů. Pro hořčík je tento poměr 0,79. Tato reakce může probíhat i v kombinaci s reakcí s dusíkem, za vzniku malého množství Mg_3N_2 .
- Při dalším zvyšování teploty dochází k tavení, které začíná při různých teplotách závislých na složení slitiny a končí na teplotě 650°C. Rychlost oxidace se zvyšuje s rostoucí teplotou kovu a při teplotě 850°C dochází k okamžitému vznícení par hořčíku. Oxidická vrstva na povrchu kovu další oxidaci nebrání, nýbrž ji urychluje, proto se využívá při tavení hořčíkových slitin inertní atmosféry.

Průběh oxidace je závislý na složení atmosféry. Např. ve vlhkém vzduchu je oxidace dvakrát pomalejší, protože na povrchu kovu vzniká vrstva hydroxidu ($Mg(OH)_2$) s poměrem měrného objemu vrstvy k měrnému objemu kovu 1,74. Při teplotách nad 440°C se vrstva $Mg(OH)_2$ mění na MgO, čímž přijde opět na porušení vrstvy a další oxidaci povrchu kovu. Pro zabránění oxidace a nebezpečí vznícení taveniny se používají tavící soli nebo ochranná atmosféra.

Tavicí soli se používají již dlouhou dobu k ochránění kovu před oxidací. Jejich složení se neustále upravuje. Jejich složení bývá stanoveno podle afinity k hořčíku. Nejčastěji to bývají chloridy a fluoridy alkalických kovů nebo kovů alkalických zemin. Prvními tavicími přísadami tak byly $MgCl_2$, NaCl a CaF_2 . $MgCl_2$ účinně absorbuje MgO a vytváří hustou kaši, která klesá ke dnu kelímku. Použijeli se na pokrytí hladiny, vytváří viskózní ochrannou vrstvu, kterou lze snadno odstranit bezprostředně před litím. Nevýhodou je, není-li tavenina dokonale zbavena zbytků chloridu, zvyšuje se náchylnost výsledného odlitku ke korozi. Proto musí následovat rafinace taveniny, tzn. odstranění nežádoucích nečistot. Rafinační soli obsahují MgF_2 , doplněný např. NH_4Cl , NH_4HF_2 a B_2O_3 . Další možností jsou speciální krycí soli, které neobsahují chloridy a fluoridy (směsi $B_2O_3 - Na_2B_4O_7$). Tyto soli se s malými úpravami využívají ještě dnes [16].

Ochrana hladiny taveniny atmosférou

Hladina taveniny se chrání pomocí rafinačních solí, síry, berylia (5-15 ppm), nebo inertních plynů SO_2 , SF_6 , CO_2 , N_2 a Ar.

Prvním krokem bylo využití SO_2 pro ochranu hladiny taveniny při lití nebo kovu ve vtokové soustavě. Ochrannou vrstvu tvoří kromě oxidu i síran hořečnatý,

přičemž je zřejmé, že k jeho vzniku je vždy zapotřebí určitého množství kyslíku. Ten se při teplotách nad 700 °C může obnovovat i v důsledku reakce:



což přináší možnost dlouhodobého ochranného účinku. Nevýhody tohoto postupu jsou především ekologického rázu. Kromě silného zápachu a nepříznivého vlivu na zdravotní bezpečnost pracovního prostředí je to uvolňování kyselinotvorných oxidů síry, které má za následek rychlejší opotřebávání výrobního zařízení.

V 70. a 80. letech se začal používat hexafluorid sírový (SF_6) místo SO_2 . Je to těžký plyn s hustotou 6,5 kg/m³. Udrží se nad taveninou kovu a nemá tendenci unikat. Tento plyn byl pro provoz v tavárně mnohem výhodnější, protože je bez zápachu. Postupem času se zjistilo, že SF_6 přispívá ke globálnímu oteplování asi 2400 krát více než SO_2 a jeho životnost v atmosféře je 3200 let.

Výzkum vedl k zavedení látek ze skupin hydrofluoruhlíků (HFC) a hydrofluoresterů (HFE) a jím podobných fluorovaných ketonů (FK).

Zkoušky prokázaly, že HFC dokáže dostatečně chránit povrch taveniny čistého hořčíku a řadu jeho slitin. Jeho cena je přitom třetinová než cena SO_2 . Je bezpečný a při pokojové teplotě netoxický a nezápalný, globální potenciál oproti SO_2 je také nižší (asi 1300).

HFE a FK se ukazují být z ekologického hlediska ještě výhodnější, neboť jejich globální potenciál oteplení je výrazně nižší a doba jejich setrvání v atmosféře kratší [16].

U moderních tavících zařízení se k ochraně taveniny používá výhradně plynné atmosféry. Zejména to bývá směs ochranných plynů se vzduchem. Tato směs obsahuje kolem 0,2 – 0,3% SF_6 s přídavkem CO_2 nebo i bez něj.

1.5.1. Předehřívací a tavící zařízení pro hořčíkové slitiny

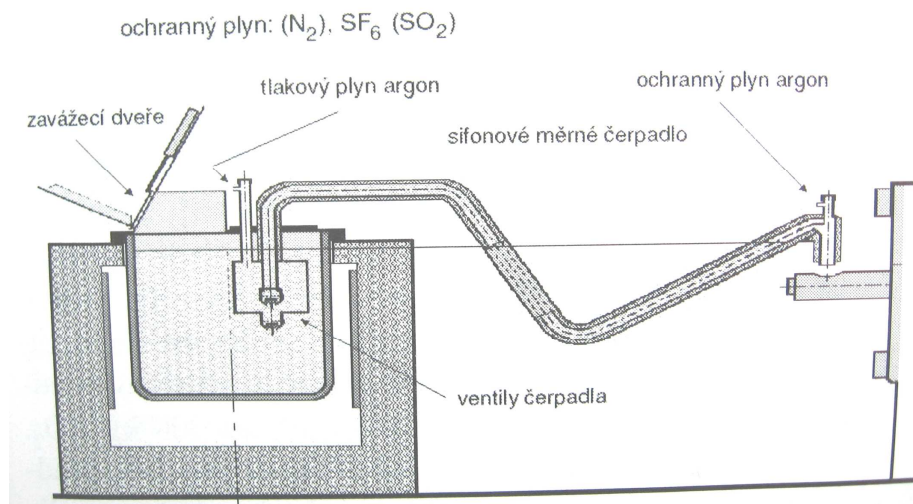
Pro tavení slitin hořčíku se používají nejčastěji pece odporové, méně již pece vyhřívané plynem. I když je tavení v plynových pecích méně nákladné, používají se pece odporové, protože je jejich stavba jednodušší, jsou bezpečnější pro obsluhu a dochází v nich k minimálnímu pohybu taveniny. Bezpečné jsou z důvodu vyloučení kontaktu zkondenzované vodní páry ze spalín s taveninou.

Konstrukce pecí je jiná než u všech ostatních neželezných slitin. Izolační materiál pro žárovzdornou vystýlku se musí zvolit, tak aby v případě porušení kelímku tavenina nereagovala s SiO_2 z vystýlky pece. Izolačním materiálem je nejčastěji mletý magnezit. Pece se konstruuje s nouzovým otvorem nebo bez něj. V případě použití nouzového otvoru musí být nachystaná dobře vysušená pec s ochrannou atmosférou. Proto se zejména v menších slévárnách používají pece bez nouzového otvoru. Při prosakování taveniny skrz kelímek slouží pec i jako zachycovací nádoba na roztavený kov.

Kelímky bývají zhotoveny dvojím způsobem: silný ocelový plech, na kterém je z vnější strany naválcovaný plášť a nebo kelímek z feritické nerezavějící oceli. Kelímek z nerezavějící oceli má delší životnost, ale náklady na jeho pořízení jsou o hodně vyšší. Při pravidelné údržbě je životnost těchto kelímků velmi dlouhá. Údržbou je myšleno zavařování vnitřní strany kelímku hlavně v oblasti dna, kde se neprovádí čištění. K čištění kelímku se používá až 5% HCl. Po očištění a

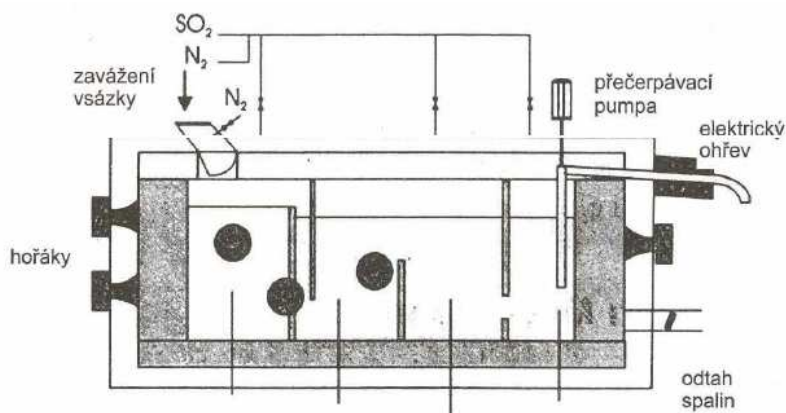
zavaření trhlin, které mohou vznikat v oblasti dna, se musí kelímek zahřát na provozní teplotu.

Jedna pec může být tavící i udržovací. V tomto případě musí být bezchybně spočítáno jaký objem kovu natavit v peci, podle hodinové spotřeby tekutého kovu. Jestliže by se odebralo větší množství kovu, než pro které je spočítaná teplota taveniny v peci, kolísala by při dalším zavažení teplota taveniny.



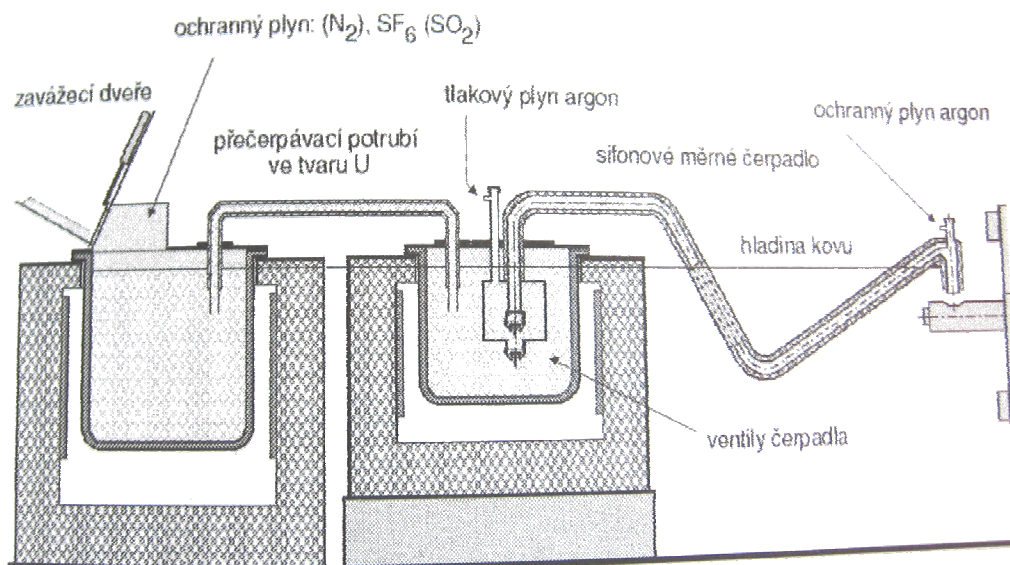
Obr. 1-16: Tavící a udržovací kelímková pec [17]

Tyto pece bývají často konstruovány i jako vícekomorové.



Obr. 1-17: Tavící pec vícekomorová [10]

Další možností je propojení dvou pecí. Jedna pec tavící a druhá udržovací a licí. Pece jsou propojeny vyhřívanou trubicí ve tvaru U, proto nedochází ke kolísání teploty v udržovací peci. Výhodou je i menší znečištění taveniny v udržovací peci. Veškeré nečistoty zůstávají v peci tavící, protože se tavenina odebírá ve střední výšce kelímku.



Obr. 1-18: Kelímková tavící a kelímková udržovací pec [17]

Součástí moderních pecí je předehřívací jednotka, která předehřívá vsázku na teplotu asi 150 °C. Předehřev je důležitý vzhledem k vysoké výbušnosti hořčíku při styku s vlhkostí. Zařízení mohou být vybavena cirkulací vzduchu. Nemá-li pracoviště vybaveno předehřívací jednotkou, bloky materiálu se ohřívají na víku tavící pece. Toto řešení je poněkud riskantní, protože vše záleží na spolehlivosti obsluhy. Lepší je použít stroj na dávkování a předehřev materiálu. Jednou z možností je jednotka Strikowestofen LPC 24. Do tohoto zařízení se nejprve ingoty umístí ručně, poté prochází na děleném kole horní částí stroje, kde jsou předehřívány. Stroj si pomocí čidla na výšku hladiny v tavící peci určuje, kdy bude ingot vložen do pece. Stroj kontroluje teplotu ingotu těsně před zavezením do pece.

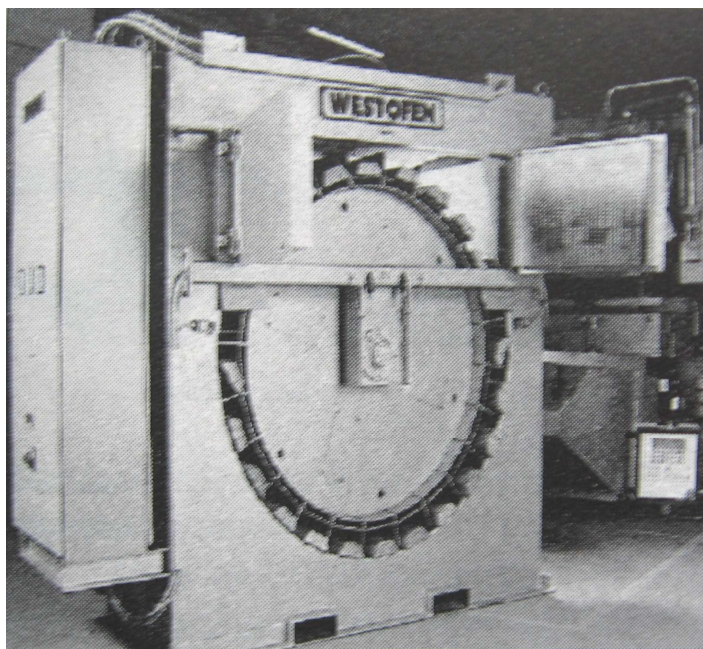
Důležitou součástí „tavírny“ ve slévárně slitin hořčíku je jednotka, která mísí a dávkuje ochranný plyn do tavících a předehřívacích pecí. V dřívějších dobách se používali místo ochranné atmosféry tavící soli, dnes se využívá spíše účinků ochranných plynů. Tavící soli zanechávaly v roztaveném kovu nečistoty při jejichž používání vzniká struska, která se musí z hladiny odstranit a složitě a nákladně recyklovat, protože patří mezi nebezpečný odpad.

Zařízení na mísení ochranné atmosféry je konstruováno tak, aby nemohla obsluha zasahovat do složení plynu. Plyn se musí do pecní atmosféry postupně přidávat, protože uniká při zavážení pece.



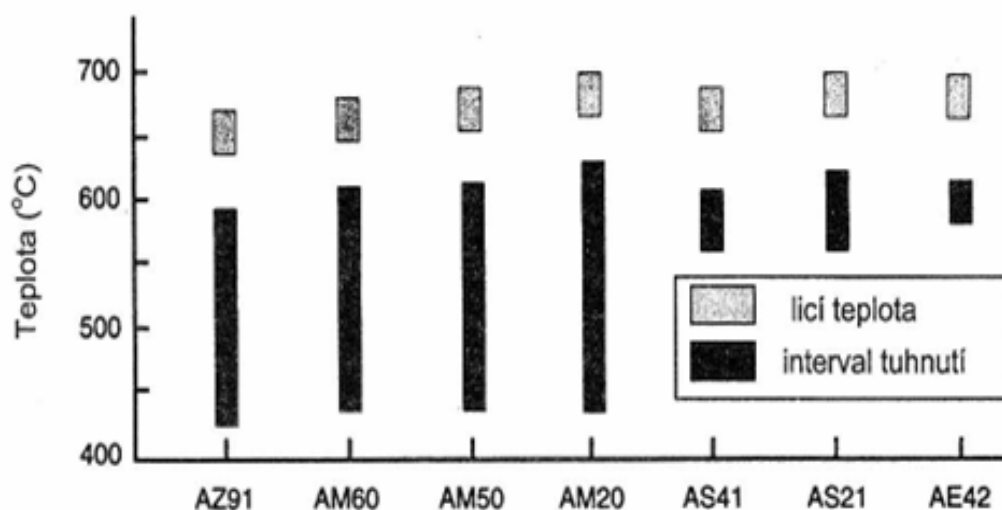
Obr. 1-19: Systém pro mísení ochranného plynu [17]

V dnešní době se nejvíce používá směs vzduchu, SF₆, CO₂. Stlačený vzduch se mísí s SF₆, aby vznikl účinný ochranný plyn. Přidává se CO₂, který nahrazuje část vzduchu. Je požadavek, aby v atmosféře bylo asi 0,3% SF₆. Někdy bývá ve směsi plynů SF₆ nahrazován SO₂. Je to z důvodu, že SF₆ je jeden z plynů, které vystupují do vyšší atmosféry, tzn. že způsobuje globální oteplování atmosféry. Oproti tomu je SO₂ plyn toxický a tím pádem zdraví škodlivý. Při používání tohoto plynu jsou stanovené přísné předpisy, které určují maximální koncentraci tohoto plynu na pracovišti.



Obr. 1-20: Předehřívací a zavážecí stroj [17]

Tavící teploty se volí podle typu slitiny a podle velikosti odlitku a tloušťky stěn [10].



Obr. 1-21: Intervaly tavících a licích teplot Mg slitin [10]

1.5.2. Zařízení pro sekundární tavení slitin hořčíku

Nutnost vybavení slévárny tímto zařízením je vysoká vzhledem k tomu, že dodavatelé primárních hořčíkových slitin prodávají za stejnou cenu i recyklovaný vratný odpad. Sekundární tavení probíhá ve speciálních zařízeních. Vrat se v tomto systému přetaví, upraví se jeho složení a poté se vrátí do oběhu slévárny.

Pro sekundární tavení lze použít následující uspořádání:

- Systém dvou pecí
- Sklopná kelímková pec s pásem pro odlévání ingotů
- Sklopná natavovací a udržovací a licí pec s pásem pro odlévání ingotů
- Systém tří pecí s pásem pro odlévání ingotů

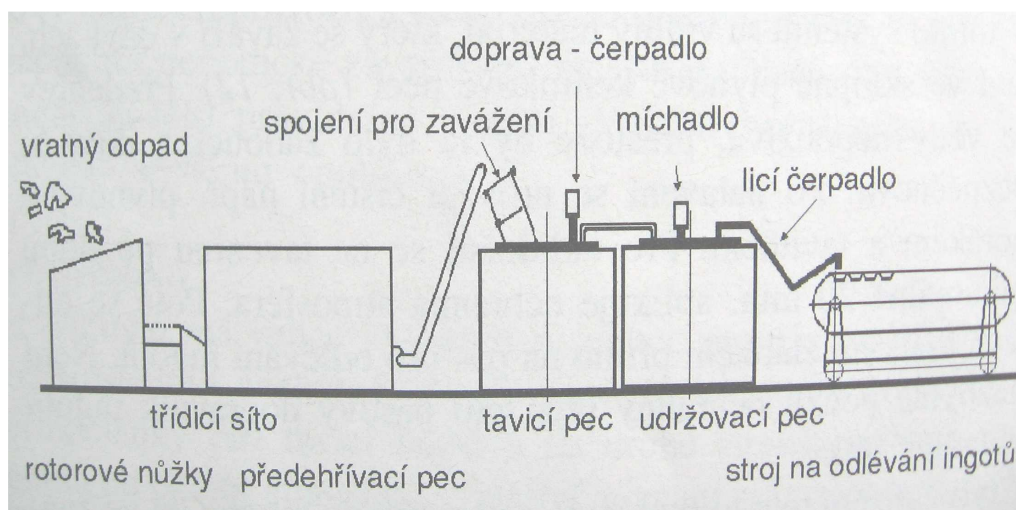
Systém dvou pecí je stejný jako na **obr. 1-18**. Vrat byl dávkován do pece dokud byl horký, tzn. ihned při oddělení od odlitku. Toto bylo testováno v Norsku hydro a zjistilo se, že i při 100% recyklaci bylo možné vyrobit odlitky z vysokou jakostí.

Systém sklopné pece s pásem pro dolévání ingotů se zavází po dávkách. Sklopná kelímková pec se vytápí plynem. Materiál, který je po dávkách zavážen do pece se většinou nepředehřívá, ačkoliv by to bylo lepší vzhledem k bezpečnosti. Po natavení v peci se provádí čištění hořákem a tavidlem. Poté je po dobu minimálně 20 minut nad taveninu puštěna ochranná atmosféra a následně se tavenina odlévá do forem na ingoty, které jsou umístěny na pásu.

Systém sklopné natavovací, udržovací a licí pece s pásem pro odlévání ingotů je stejný jako předchozí případ. Vrat se nataví v indukční kelímkové peci a poté

se licím žlábkem přepraví do udržovací pece, kde se upraví složení. Z licí pece se odlévají ingoty na pásu.

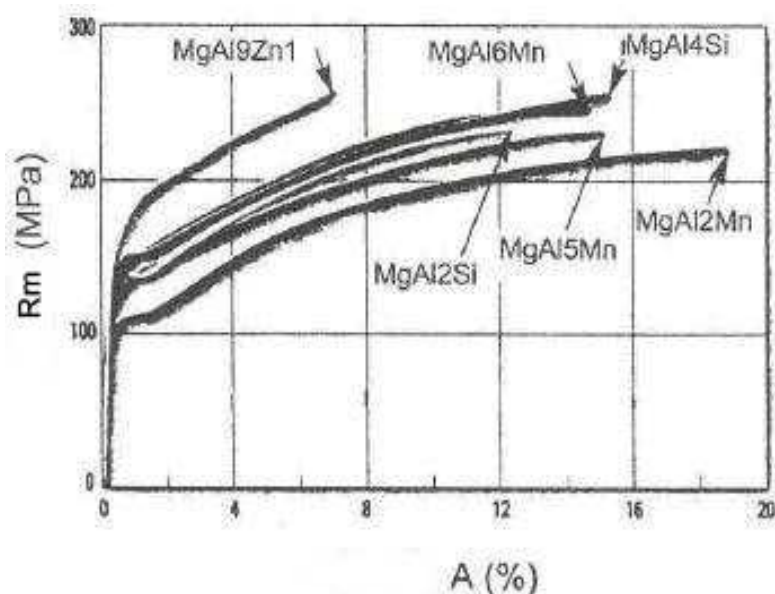
Systém tří pecí je nejspolehlivější, protože umožňuje přesně řídit jakost slitiny na výstupu. Postup je následovný: vrat se drtí v pomalém otočném drtiči, poté se na sítu oddělují drobné částice, ohřívá se v kontinuální peci a zavazuje se do tavící pece. V případě výroby menších odlitků odpadá použití drtiče, tím se ušetří vysoké investiční náklady. Z kontinuální pece se kov přečerpá do jedné ze dvou udržovacích a licích pecí, kde probíhá dolegování a úprava kovu. Systém opět končí pásovým strojem na odlévání ingotů.



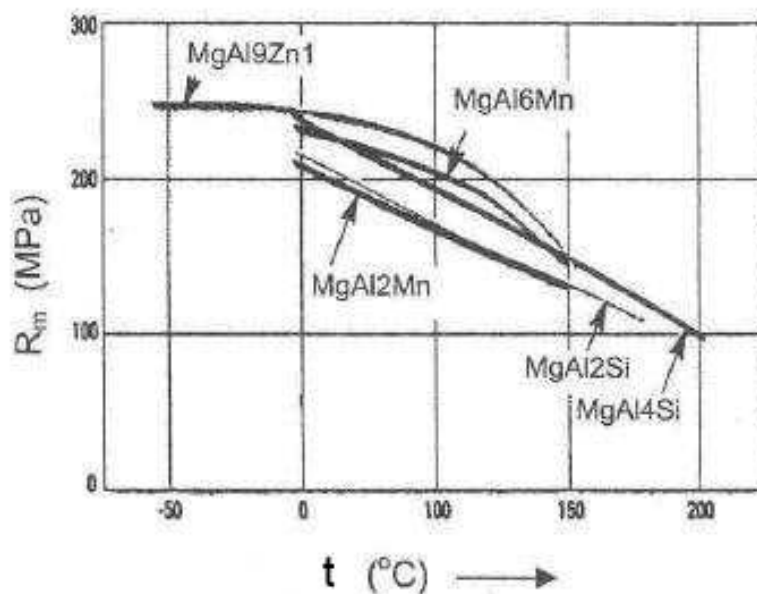
Obr. 1-22: Systém tří pecí pro sekundární tavení slitin hořčíku [17]

1.6. Mechanické zkoušky

Podle normy ČSN 424996 Slitiny hořčíku na odlitky se mechanické vlastnosti slitin hořčíku odlévaných do pískových forem a kovových forem stanovují na odděleně litých zkušebních tyčích podle ČSN 420310, které jsou určeny pro zkoušky tahem. Tyče odděleně lité pod tlakem pro zkoušky tahem upřesňuje dodatek normy ČSN 420332.



Obr. 1-23: Tahový diagram některých slitin hořčíku [10]



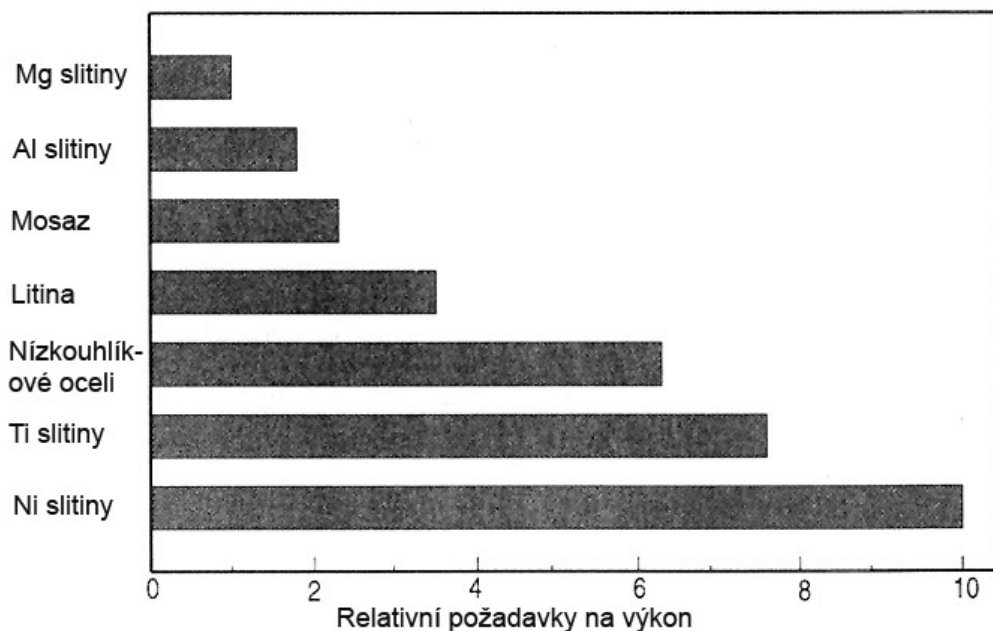
Obr. 1-24: Pevnost za vyšších teplot [10]

1.7. Obrábění materiálů z hořčíkových slitin

Obrábění hořčíku je omezeno spíše výkonem obráběcího stroje (rychlostí apod.) nežli nástrojem. Obrábění může být provedeno 10x větší rychlostí než ocel a 2x větší rychlostí než hliník. Často se používají karbidové nástroje, obzvláště jsou upřednostňovány při velkých sériích. Hořčík má výbornou vlastnost: rychle odvádí teplo z břitové destičky, proto zůstává nástroj déle ostrý a může se obrábět i vyšší rychlostí. Hořčík musí být obráběn suchý, pokud se

musí používat chladicí médium, tak spíše minerální olej, než chladicí kapaliny na bázi vody. Při chlazení médiem založeným na vodní bázi může nastat nebezpečí reakce mezi třískami a vodou.

Hořčík je při obrábění téměř nemožné zapálit, aby k tomuto došlo, musel by se zahřát skoro až k teplotě likvidu. Proto se často při rychlém obrábění volí spíše odlamování větších třísek, které redukuje nebezpečí vznícení.



Obr. 1-25: Obrobitelnost slitin hořčíku [1]

1.8. Recyklace slitin hořčíku

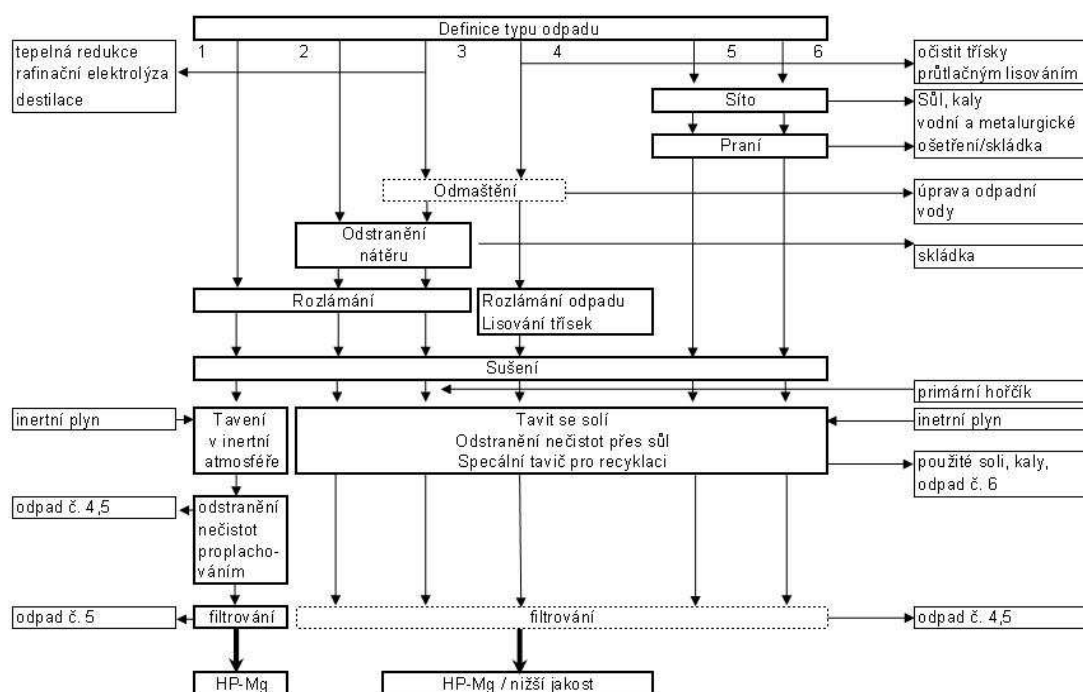
Hořčík se čím dál více používá jako konstrukční materiál ve všech odvětvích průmyslu. Z toho důvodu roste spotřeba hořčíkových slitin, na kterou má největší vliv automobilový průmysl. Ve srovnání s ostatními kovy není recyklace hořčíku tak rozšířena. Jedna z hlavních podmínek, proč hořčík recyklovat, je ušetření množství energie, která musí být použita k jeho výrobě. V [1] autor poukazuje, že při výrobě primárního hořčíku se spotřebuje 35 kWh/Kg a při přetavení jen 3 kWh/Kg. Z toho plyne, že recyklace znamená v tomto případě přetavení materiálu a dodání k výrobcům ocelí, litin, hliníku a hořčíku. Zatím nezodpovězeným problémem je starý šrot.

Druhotné suroviny hořčíku můžeme rozdělit následovně [1]:

- 1) Odpad
 - Č.1: vysoká kvalita, čistý odpad
 - Č.2: rozdělené části, základní nátěr s přilnavostí (ocel, hliníkové vměstky, bez mědi nebo mosazných nečistot)
 - Č.3: špinavý, mastný, vlhký odpad obsahující písek, meď, nikl

2) Odpad s velkým povrchem

- Č.4: třísky, odpad bohatý na kovy (často rozdělovaný na vlhký/mastný a čistý/špinavý)
- Č.5: odpad ve kterém je nízké procento kovu, kaly z tavicího kelímku a ze součástí stroje
- Č.6: odpad obsahující přísady (použitá rafinační sůl)



Obr. 1-26: Schéma recyklace hořčíku [1]

1.9. Využití odlitků ze slitin hořčíku

Hořčík a jeho slitiny nabízí jako konstrukční materiál řadu výhod a charakteristických znaků. Automobilový průmysl začal hořčík (Mg) a jeho slitiny intenzivně používat, zpočátku zejména pro interiérové prvky, jako je např. středový panel, přístrojová deska, rámy sedaček, volant, konstrukce střešních oken atd. Novým trendem v oblasti používání Mg slitin v automobilovém průmyslu je snaha o zmenšení hmotnosti i ostatních částí - začaly se používat na střešní panely, sklápěcí střechy, litá či tvářená kola, sestavy pro vnitřní potrubí, víka hlav válců, olejové vany, startéry, alternátory, a dokonce bloky motorů.

Vzhledem k hlavní charakteristice Mg slitin, kterou je nízká hustota, se Mg nabízí k rozsáhlému používání při snížené hmotnosti a tomu odpovídajících úsporách paliva. Experimentálně získaná data ukazují možnost celkové úspory hmotnosti přibližně 10 %, což vede k úsporám paliva o řádově 20 - 30 % bez „drastických“ změn v konstrukci automobilu. Nové osobní automobily produkují průměrně 150 g/km výfukových plynů. V případě použití Mg slitin může být množství výfukových plynů redukováno na 100 - 120 g/km.

Výhody hořčíkových slitin:

1. Většina Mg slitin má výbornou tekutost a zabíhavost, což je výhodné u tvarově složitých a tenkostěnných odlitků.
2. Mg slitiny mají nižší hodnoty specifického objemového tepla než slitiny Al a Zn, tzn. že odlitky z Mg slitin chladnou rychleji, což umožní zrychlení lícího cyklu a tím pádem i snížení opotřebení nástroje.
3. Mg a jeho slitiny se vyznačují velmi nízkou hustotou, tzn. že stejných vtokových podmínek může být dosaženo nižšími tlaky.
4. Fe z nástroje má velmi nízkou rozpustnost v tekutých Mg slitinách, je tedy sníženo nebezpečí tzv. lepení na nástroj (nejčastěji se s tímto jevem setkáváme u Al slitin).
5. Ze všech výše uvedených výhod vyplývá hlavní výhoda - prodloužení životnosti nástroje na dvoj- až trojnásobek v porovnání se slitinami Al.



Obr. 1-27: Příklad odlitků ze slitin hořčíku

2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1. Popis odlitku

Jedná se o silnostěnný odlitek o charakteristické tloušťce 3,6 mm. Pro zaformování tohoto odlitku bude zapotřebí nepravidelná dělicí rovina.



Obr. 2-1: Odlitek víka převodovky



Obr. 2-2: Odlitek víka převodovky

Odlitek je odlit ze slitiny AZ91 D. Chemické složení slitiny bylo určeno opticko emisním spektrometrem s doutnavým výbojem SPECTRUMAT GDS750. Výsledek je průměrný ze tří měření.

Al [%]	Zn [%]	Cu [%]	Mn [%]	Si [%]	Fe [%]
9,1	0,73	0,00	0,18	0,03	0,004
Ni [%]	Ca [%]	Sn [%]	Pb [%]	Zr [%]	Be [%]
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

2.2. Odlévání zkušební série

2.2.1. Vybavení pracoviště

Tavení probíhalo ve standardní, středofrekvenční, kelímkové peci. Maximální kapacita této pece byla 250 kg taveniny. Pro ochranu taveniny se používala směs hexafluoru (SF_6) a dusíku (N_2). Tavilo se zásadně z bloků. Dávkování těchto bloků bylo ruční, pracoviště nebylo automatizováno. Předehřev bloků probíhal na okraji víka pece, kde se bloky osušily. Stejným způsobem se předehřívaly i nástroje, které přišly do styku s kovem.



Obr. 2-3: Předehřev bloků materiálu a nářadí

Tavenina se ohřívala na teplotu 680 °C a poté se na této teplotě udržovala. Pro rafinaci taveniny byla použita sůl EMGESAL FLUX 200. Dávkování kovu z pece bylo prováděno ručně naběračkou, která byla jako všechno nářadí, které přišlo do styku s kovem, chráněna nátěrem RAL 700B od firmy Klüber.



Obr. 2-4: Rafinace taveniny



Obr. 2-5: Natavený kov v peci

Byl použit tlakový licí stroj GDK 750 od firmy Müller Weingarten. Je to stroj se studenou vertikální komorou. Tento stroj podporuje i systém VACURAL, který nebyl pro naše účely použit. Řídící systém stroje zaznamenával graf lisování každého cyklu.

Uzavírací síla	850 tun
Vstřikovací síla	72 tun
Vyhazovací síla	36 tun
Rozměry upínací desky pro formu	1280 x 1280 mm
Max. a min. výška formy	400 - 900 mm
Rozměry stroje	8,3x2x3,4 m
Váha stroje	36 tun
Zdvih vyhazovačů	185 mm
Zdvih horní poloviny formy	850 mm
Max. váha odlitku z Al	13 kg

Tab. 2-1: Parametry stroje MW GDK 750

Temperance komory pístu licího stroje, byla zajištěna jednoduchým snímáním skutečné teploty a následným porovnáním s teplotou nastavenou. Nevýhodou je odvod tepla do pevných částí stroje a následným ztrátám tepla. Teoretická teplota maximálního přehřevu byla 700°C, ale díky již zmiňovaným ztrátám byla nedosažitelná. Proto se teplota komory ve skutečnosti pohybovala okolo 250°C.



Obr. 2-6: Přehřev komory licího stroje



Obr. 2-7: Teplota předehřevu komory licího stroje

Pístní systém složený z pístu z materiálu Cu-Be a tvrdého ocelového kroužku, byl použit od švýcarské firmy ALLPER. Výhodou je těsnost zajištěná přestřiženým ocelovým kroužkem, který se za určitých pracovních teplot může roztáhnout na průměr komory. Za těchto podmínek nemůže materiál prostříkávat kolem pístu [18].



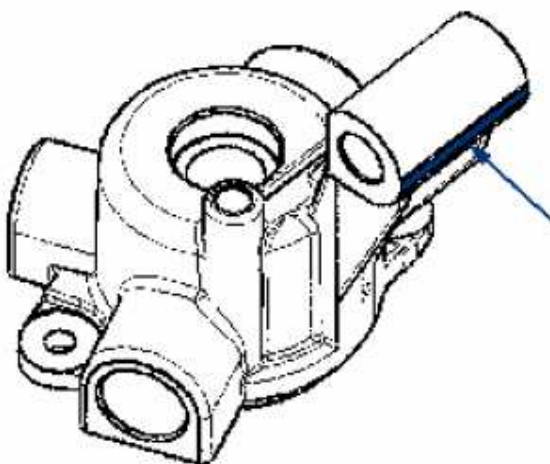
Obr. 2-8: Pístní systém ALLPER [18]

Pro temperaci formy bylo použito dvouokruhové temperační zařízení od firmy SINGLE. Forma byla ručně postříkována vodou ředitelným prostředkem od firmy Klüber. Vyjímání odlitků z formy bylo prováděno ručně.

Díky nízkému stupni automatizace bylo k plynulé výrobě odlitků zapotřebí tří operátorů. První se staral o natavený kov, rafinaci materiálu a nalití kovu do komory tlakového stroje. Druhý ošetřoval formu, mazal píst a vyjímal odlitky z formy. Třetí nastavoval parametry licího stroje.

2.2.2. Návrh formy

Návrh koncepce formy začíná volbou vhodné vtokové soustavy. Po zkušenostech získaných při odlévání tohoto odlitku z hliníkové slitiny, bylo zjištěno, že kritickou částí odlitku je oblast páky. Proto se tekutý kov přivedl na toto místo (viz. **obr. 2-9**).



Obr. 2-9: Volba místa nařiznutí



Obr. 2-10: Kritické místo odlitku

- zadávané hodnoty

- výsledky

Plocha odlitku:

67

cm²

Hmotnost odlitku:

195

g

Násobnost:

2

ks

Hmotnost přetoku:

4,3

g

Hmotnost vtoku:

249

g

Plocha přetoku:

5

cm²

Počet přetoků:

6

ks na jeden díl

Plocha vtok + kom.:

90,7

cm²

Hustota slitiny:

1,75

kg/dm³

Plocha komory:

19,95

cm²

Určit stroj

plocha odlitku

284,7

cm²

tlak Pz

900

BAR

konstanta

100

bezpečnost (konstanta)

1,25

stroj

3302,4

kn

u vícenásobné: součet ploch všech odlitků, vtoků a přetoků

:10>

330

tun

Plocha nařeznutí SA

hmotnost odlitku

220,6

g

hustota

1,75

kg/cm³

čas plnění

0,017

s

rychlost plnění Vm

65

m/s

Plocha nařeznutí

114,2

mm²

Tloušťka nařeznutí

3,2

mm

vždy jen jednoho odl.+přetoky

delka nařeznutí

35,7

mm

Průřez vtokového kanálu

285,5

mm

do jednoho odlitku

Určit objem kovu přes nařeznutí Qm

hmotnost odlitků

441,6

g

hustota

1,75

kg/cm³

čas plnění

0,017

s

14841,7

u vícenásobné součet hmotnosti všech odlitků + přetoky

Rychlost pistu Vc

průměr pistu

75

mm

konstanta

0,785

3,36

(má vyjít 2m/s a více)

Využití komory

hm.kovu ve formě

0,69

kg

hustota

1,75

kg/cm³

poloměr pistu

0,375

dm

delka komory

4

dm

objem taveniny v komoře

1,76525

dm³

hmotnost kovu v komoře

3,090938

kg

Zaplnění komory

22,34

% (ideální je 40-60%)

Všechny tvary, přetoky a vtoky

Při 100% zaplnění

Při 100% zaplnění

Tab. 2-2: Výpočet výstupních hodnot pro návrh formy

Výstupní hodnoty v **tab. 2-3** byly spočítány v programu Microsoft excel. Tento početní algoritmus byl vytvořen v Kovolitu Modřice a.s.

Výstupní vypočtený parametr	Hodnota
Rychlost pístu V_2	3,4 [m/s]
Plocha naříznutí	114 [mm ²]
Stupeň zaplnění komory	23 [%]

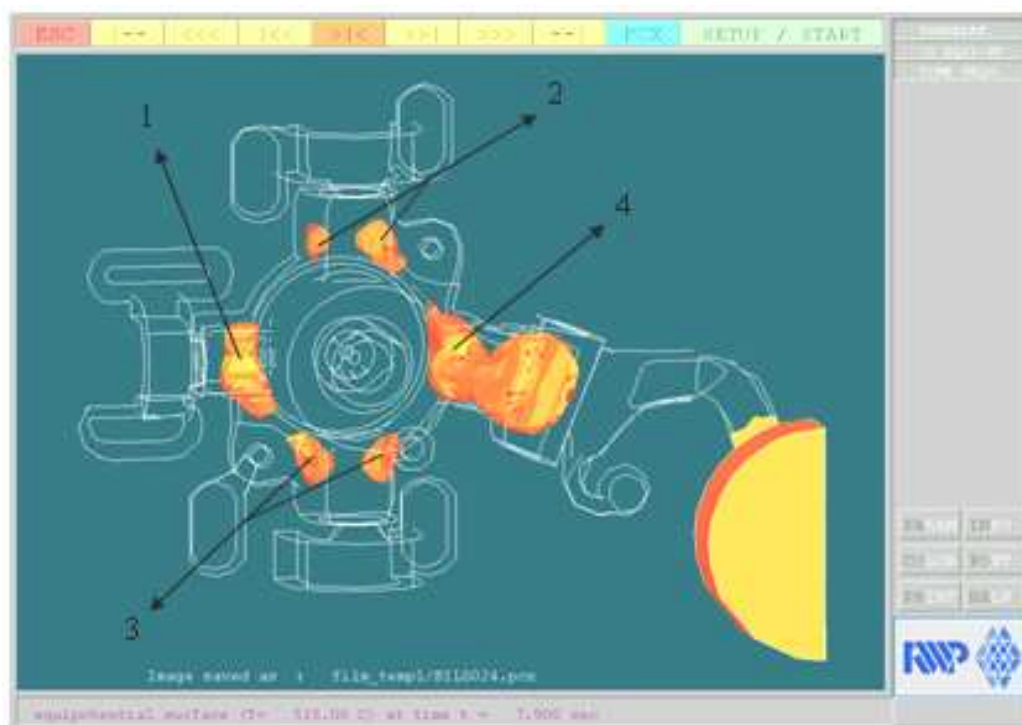
Tab. 2-3: Výstupní hodnoty použité při návrhu formy

2.2.3. Simulace v programech Magma a Simtec

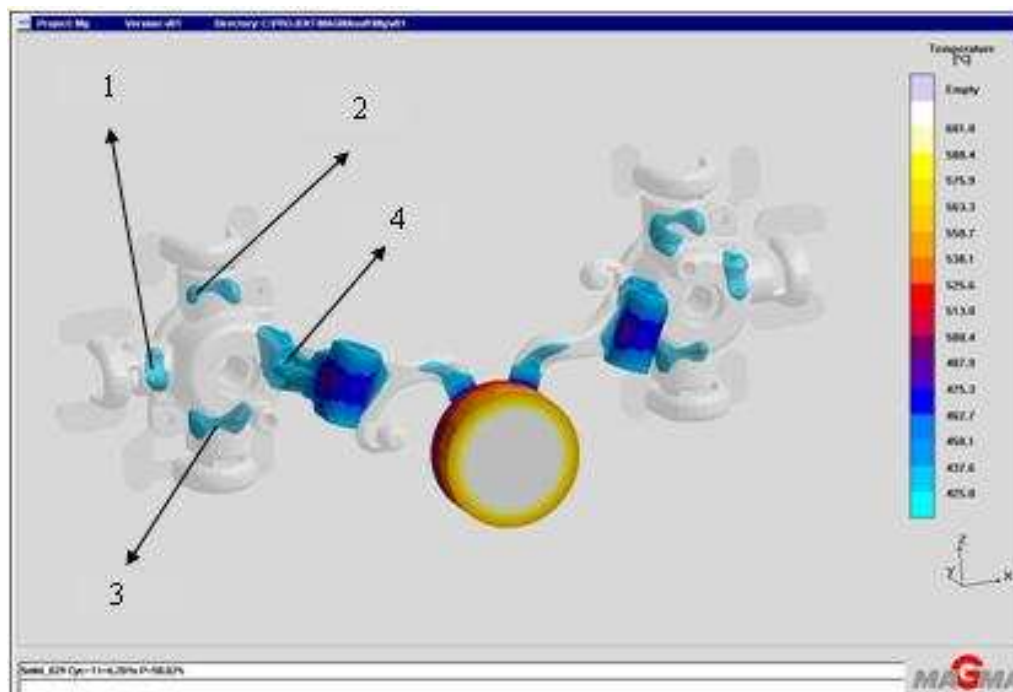
Důležitou součástí výroby formy je použití simulačních programů. Proto byla využita spolupráce s firmou MECAS MSI, která provedla analýzu plnění formy tekutým kovem.

Vstupní parametry pro simulaci:

- | | | | |
|--------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|
| - čas plnění | 0,017 s | - rychlost plnění | 65 m/s |
| - plocha naříznutí | 114,182 mm ² | - tloušťka naříznutí | 3,2 mm |
| - délka naříznutí | 35,682 mm | - hustota | 1,75 kg/dm ³ |
| - průměr pístu | 75 mm | - rychlost pístu | 3,362 m/s |
| - teplota taveniny | 680 °C | - teplota formy | 250 °C |



Obr. 2-11: Kritická místa podle programu Wincast (Simtec)



Obr. 2-12: Kritická místa podle programu Magma

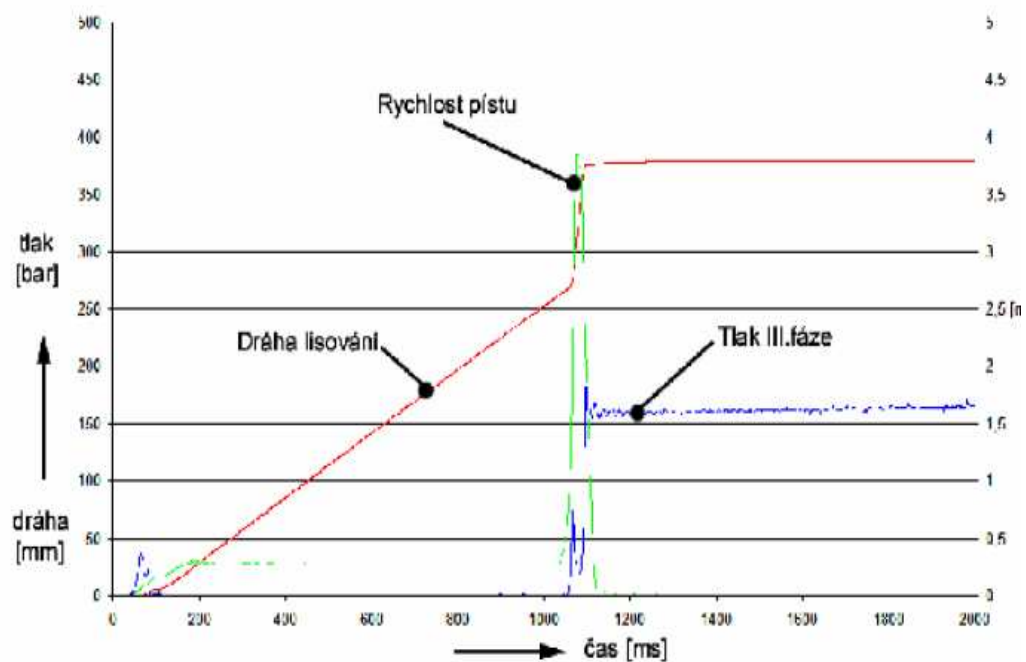
Z **obr. 2-11** a **2-12** je zřejmé, že výsledky získané při simulaci jsou téměř shodné z obou použitých programů.

2.2.4. Nastavení parametrů tlakového stoje

Parametr:	Výrobní série 1	Výrobní série 2	Výrobní série 3	Výrobní série 4	Výrobní série 5
Teplota formy	240 °C	240 °C	250 °C	250 °C	250 °C
Teplota kovu	680 °C	680 °C	680 °C	705 °C	705 °C
Čas tuhnutí	6 s	6 s	6 s	6 s	6 s
Čas otevření formy	20 s	20 s	20 s	20 s	20 s
Čas vyjetí vyhazovačů	4 s	4 s	4 s	4 s	4 s
Čas zajetí vyhazovačů	8 s	8 s	8 s	8 s	8 s
Start rychlosti II.Fáze	250 mm	250 mm	250 mm	250 mm	250 mm
Záznam lisování číslo	7 až 30	41 až 70	72 až 101	102 až 131	133 až 164

Tab. 2-4: Tabulka parametrů odlitých sérií

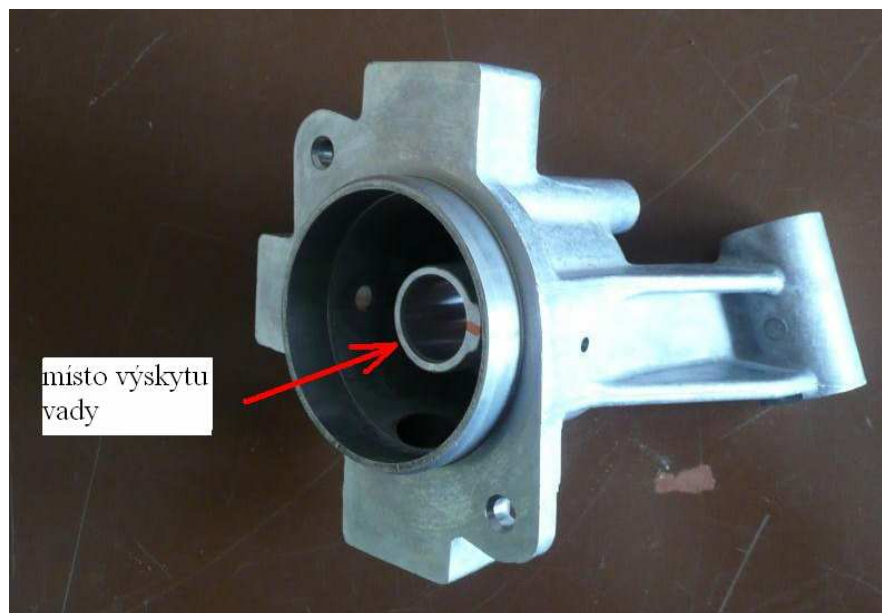
Na **obr. 2-13** vidíme graf lisování, který byl pořízen při výrobě odlitků v třetí sérii. Na obrázku jsou znázorněny průběhy dráhy lisování, rychlosti pístu a tlaku 3. fáze.



Obr. 2-13: Graf lisování

2.2.5. Kontrola vnitřní kvality odlitku

Vnitřní kvalita odlitků byla nejprve kontrolována ve slévárně TU Aalen na rentgenovém přístroji od firmy PHILIPS. Z rentgenových snímků byla patrná porozita ve střední trubce o průměru 17 mm.



Obr. 2-14: Místo výskytu vady zjištěné RTG přístrojem

Dalším krokem byla tomografická kontrola vnitřní kvality odlitku, byla provedena přístrojem od firmy HWM Rayscan 200 (v TU Aalen).

Zdroj záření	Microfocus 10 - 250 kV
Ohnisko	3mikro m - 250 mikro m
Vel. objektů (průměr/výška)	1-600 mm / 1-1500 mm
Váha objektů	80 kg
Detekovaná plocha	410 x 410 mm ctverečních
Počet pixelů (optimální)	1024 x 1024 (2048 x 2048)
Barevná hloubka	16 bit
Rozlišení detailů	1 mikro m
Kontrast	<1%

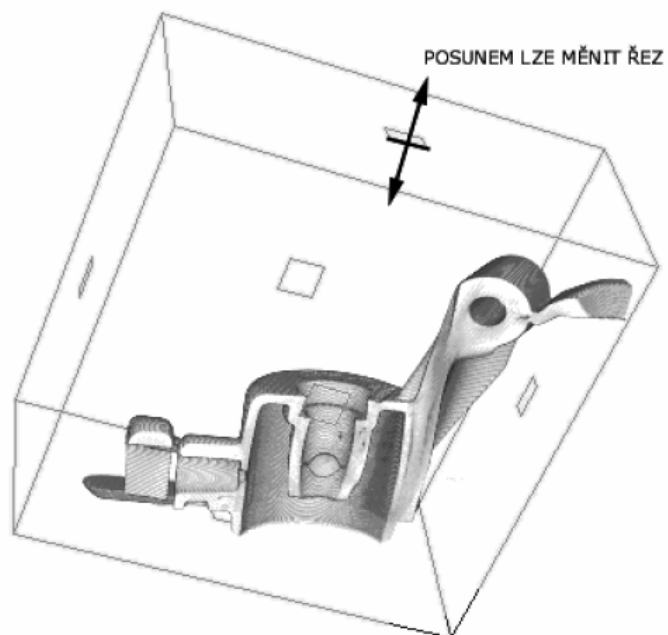
Tab. 2-5: Parametry tomografu HWM Rayscan 200

Probíhá tak, že se odlitek upne do svěráku, ve kterém rotuje a během rotace je skenován do paměti přístroje. Naskenovaná data se převedou na 3D geometrii, která se dá následně prohlížet. V námi zvolených místech lze provádět řezy, ve kterých můžeme zjistit, zda jsou v odlitku vady. Vady můžeme podle jejich typu a množství celkem dobře rozlišovat.



Obr. 2-15: Stroj pro tomografickou kontrolu

Pro prohlížení 3D modelu z naskenovaného odlitku, není nutné mít tomografický přístroj. Data jdou uložit do formátu *.vgi, to znamená, že je lze prohlížet i v jiných programech. V našem případě byl použit program Myvgi.



Obr. 2-16: Ovládání programu Myvgi

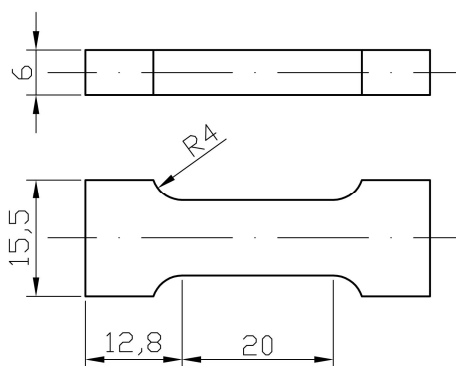
2.3. Měření mechanických vlastností

Mechanické vlastnosti byly získány ze vzorků odebraných z námi určeného místa odlitku (viz **obr. 2-17**).



Obr. 2-17: Místo odběru vzorků

Tyčinky pro tahovou zkoušku byly obrobeny ve VUT FSI a přetrženy na stroji Zwick Z020. Vzhledem k tomu, že vzorky nemohly být vyrobeny podle normy, z důvodu nedostatku materiálu v místě, kde bylo možné vzorky odebrat. V **tab. 2-6 a 2-7** jsou proto uvedeny rozměry vzorků a mechanické vlastnosti získané při tahové zkoušce. U čísla vzorku je uvedeno písmeno A nebo B, protože forma byla dvoudílná, tzn. při jednom zaplnění formy vznikly dva odlitky.



Obr. 2-18: Vzorek pro tahovou zkoušku

Číslo vz.	v	Šířka b0	Tloušťka a0	L0	Rp _{0,2}	Rm	A
	[mm/min]	[mm]	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[%]
1B	1	9,18	6,28	20	13	119	1,4
2B	1	9,86	6,1	20	12	137	1,4
3B	1	9,91	6,26	20	12	97	1,1
11A	1	7,93	6,04	20	14	116	1,1
73B	1	9,92	6,15	20	16	138	0,5
111A	1	9,92	5,94	20	12	71	0,6
111B	1	9,94	6,01	20	12	90	1,0
135A	1	9,95	6,1	20	15	141	1,7
135B	1	9,95	6,26	20	14	75	1,9

Tab. 2-6: Mechanické vlastnosti získané při tahové zkoušce

Vzhledem k tomu, že hodnoty Rm v **tab. 2-6** jsou ve velmi širokém intervalu, byla provedena další tahová zkouška.

Číslo vzorku	v	Šířka a0	L0	Rp _{0,2}	Rm	A
	[mm/min]	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[%]
87B	4	6,65	20,2	124	136	1
117A	4	6,95	20,15	124	127	0,8
117B	4	7,03	20,3	110	150	1,5
140A	4	6,9	20,1	104	118	0,5
140B	4	6,86	20,2	116	140	1

Tab. 2-7: Mechanické vlastnosti získané při tahové zkoušce 2

2.4. Obrazová analýza a popis operací před jejím vyhodnocením

Obrazová analýza pomáhá kvantitativně popsat a specifikovat obrazové informace, které byly získány makroskopickým či mikroskopickým snímáním. Umožňuje detailní srovnávání různých vzorků, přesné zpracování informací a různé způsoby vyjádření získaných výsledků. Nespornou výhodou analyzátoru je automatické měření a počítání všech objektů, které jsme předem vybrali např. na základě parametrů pro barvu a jas. V technické praxi se používá také v lékařství, vojenském průmyslu, potravinářství a pro bezpečnostní systémy.

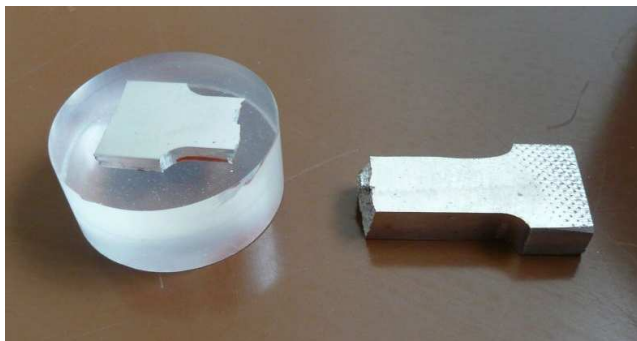
V našem případě bude obrazová analýza využita ke stanovení tvarových faktorů pórů a procentuální pórovitosti vzorku.

2.4.1. Příprava vzorků a popis operací

Po přetržení byla jedna polovina vzorku tahové tyčinky zalita do plastu za horka, to bylo uskutečněno na stroji firmy STRUERS Labopress-3 (viz **obr. 2-19**).



Obr. 2-19: Struers labopress-3



Obr. 2-20: Vzorek zalisovaný do pryskyřice

Zalisování jednoho vzorku trvalo zhruba 8 minut při teplotě 180°C. Po zalisování se vzorek nejprve brousil na zařízení firmy STRUERS Pedemin 2 (obr. 2-21).



Obr. 2-21: Bruska Pedemin 2

Brousilo se pod vodou na papírech o zrnitosti 280, 600, 1200, 4000 [zrn/cm²]. Broušení na každém z typu papírů trvalo 3 minuty a poté byl vzorek opláchnut vodou. Další operací bylo leštění, leštilo se na stejných strojích (obr. 2-21). Leštění lze rozdělit na dvě části podle typu leštícího kotouče:

- Kotouč DP-MOL na kterém byla nanесena diamantová brusná pasta (3 μm) se smáčel smáčedlem na olejové bázi.
- Kotouč DP-NAP s diamantovou brusnou pastou (1 μm) a smáčidlo na olejové bázi

V obou případech trvalo leštění 3 minuty. Mezi operacemi byl vždy vzorek vyjmut z leštičky, opláchnut lihem a vysušen na teplém vzduchu.

2.4.2. Vyhodnocení obrazové analýzy

Vyhodnocení obrazové analýzy spočívá:

- V pořízení fotografie nebo jakéhokoliv jiného obrazového výstupu.
- Odstranění šumu, korekce ostrosti, jasu a kontrastu.
- Analýza obrazu a výsledné zpracování.

V našem případě byl pro pořízení fotografií použit mikroskop Olympus GX 71 a software Olympus Five. Výstupem pro nás bude tabulka, ve které budou vypsány hodnoty pórovitosti vzorků a tvarové faktory pórů.

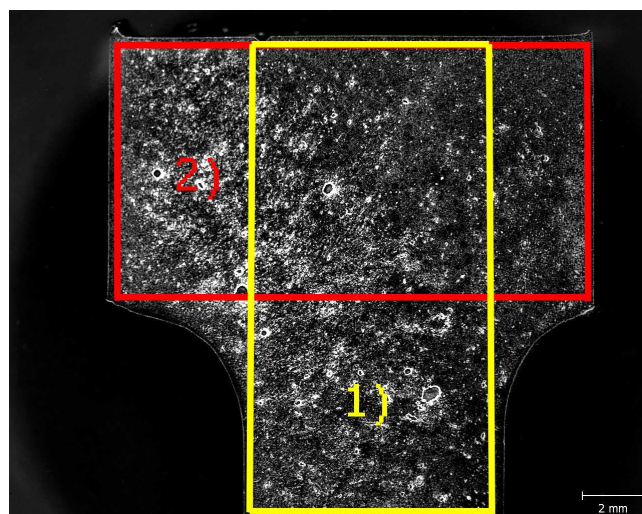


Obr. 2-22: Olympus GX 71

Výběr místa, které se mělo vyhodnotit, byl proveden obdélníkovým rámem.

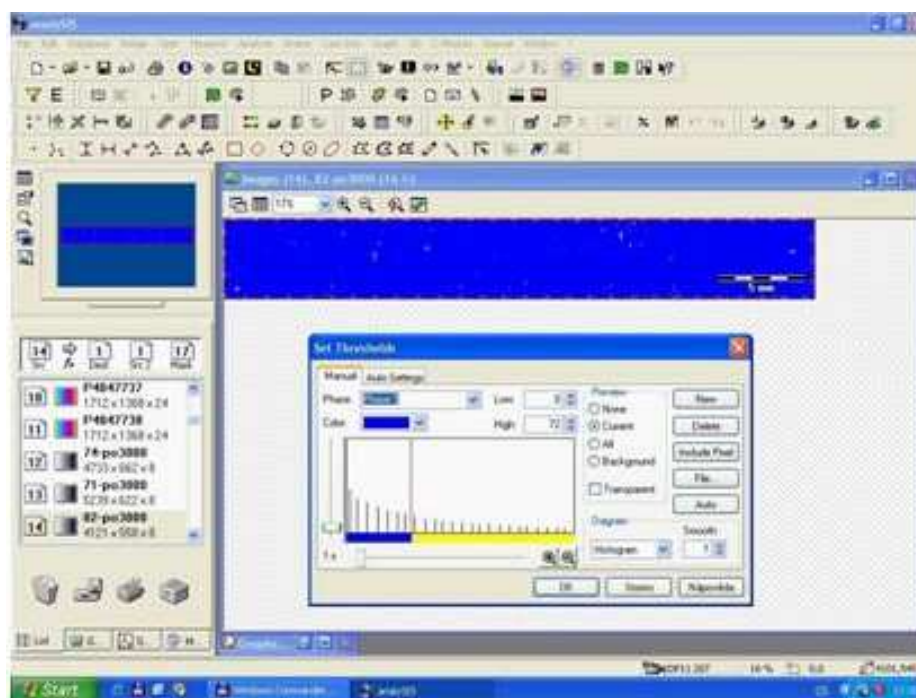
2.4.3. Vyhodnocení porezity

Vzorky, které byly broušeny a leštěny postupem sepsaným v kapitole 2.4.1 se vložily pod stereolupu, kde se nasvítily ze strany, aby se zvýraznily póry. Fotografie se pořizovaly zvětšením 0,67x, dále se v programu Adobe photoshop převedly do duplexních barev (tzn. jen černá a bílá). Na těchto snímcích jsou póry bílou barvou a okolní kov černou barvou. Následně se fotografie otevřely v programu Olympus Five, kde se upravil kontrast a světlost a mohlo přijít na řadu samotné vyhodnocení procenta pórovitosti. Vyhodnocení probíhalo v námi zvolených místech vyleštěné plochy. Vzhledem k nepravidelnosti plochy výbrusu byla pórovitost vyhodnocována ve dvou místech (**obr. 2-23**).



Obr. 2-23: Výběr míst pro vyhodnocení pórovitosti

Z těchto dvou hodnot byla stanovena průměrná hodnota, která je zveřejněna v **tab. 2-8**. Vzorek musel být dobře vyleštěn, aby nedocházelo ke zkreslení výsledků škrábanci a nebo nečistotami na vyhodnocované oblasti.

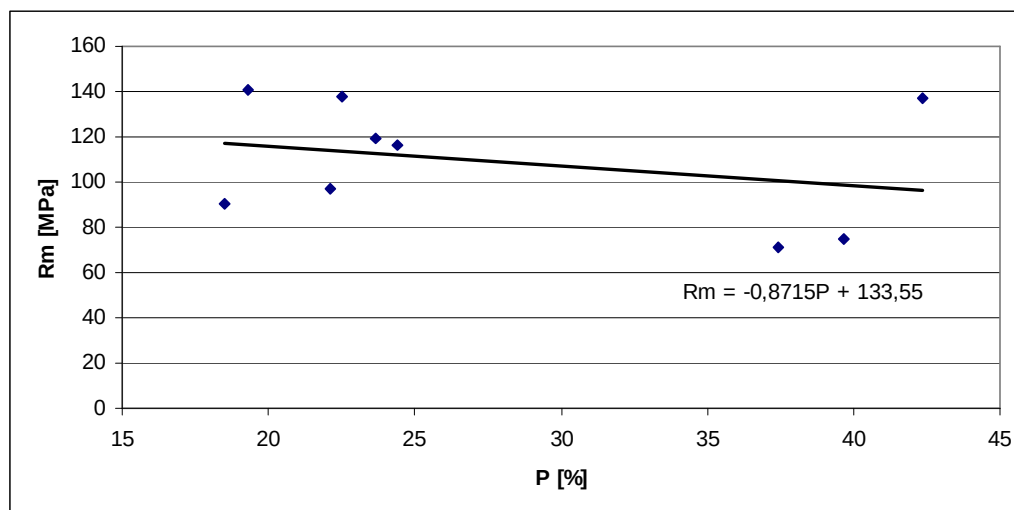


Obr. 2-24: Nastavení kontrastu a filtrů programu Olympus Five

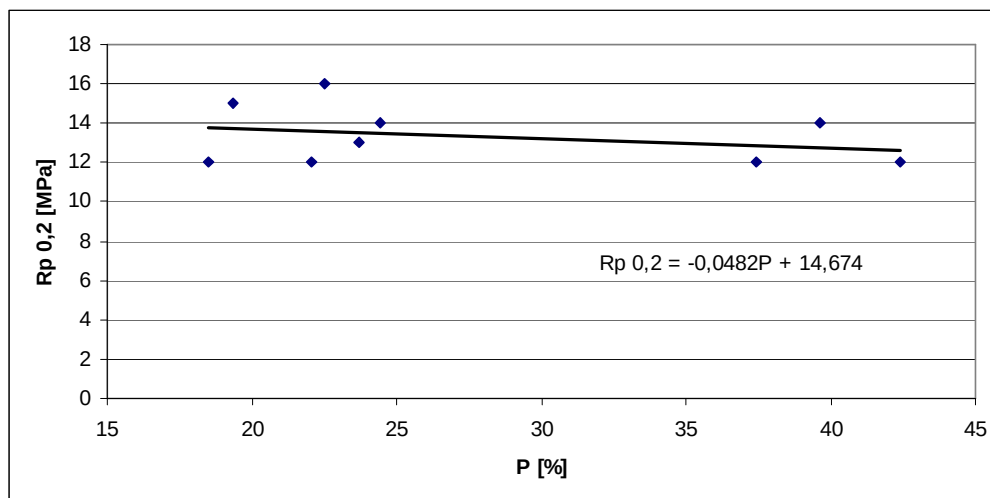
vzorek	pórů [%]		Σ	pórovitost [%]	Rm [MPa]	Rp _{0,2} [MPa]	A [%]
	1. měření	2. měření					
1B	23,69	27,6	51,29	25,65	119	13	1,4
2B	42,39	50,51	92,9	46,45	137	12	1,4
3B	22,09	21,97	44,06	22,03	97	12	1,1
11A	24,42	23,57	47,99	24,00	116	14	1,1
73B	22,54	17,67	40,21	20,11	138	16	0,5
111A	37,41	41,25	78,66	39,33	71	12	0,6
111B	18,52	31,69	50,21	25,11	90	12	1,0
135A	19,33	27,8	47,13	23,57	141	15	1,7
135B	39,66	43,67	83,33	41,67	75	14	1,9

Tab. 2-8: Výsledná naměřená pórovitost

Na **obr. 2-25** je znázorněna závislost meze pevnosti na pórovitosti. Z obrázku je zřejmé, že se mez pevnosti v tahu s narůstajícím procentem pórů, snižuje. Maximální naměřená hodnota meze pevnosti v tahu $R_m = 141$ MPa při pórovitosti $P = 23,57$ % a minimální naměřená hodnota meze pevnosti $R_m = 71$ MPa při pórovitosti $P = 39,33$ %.

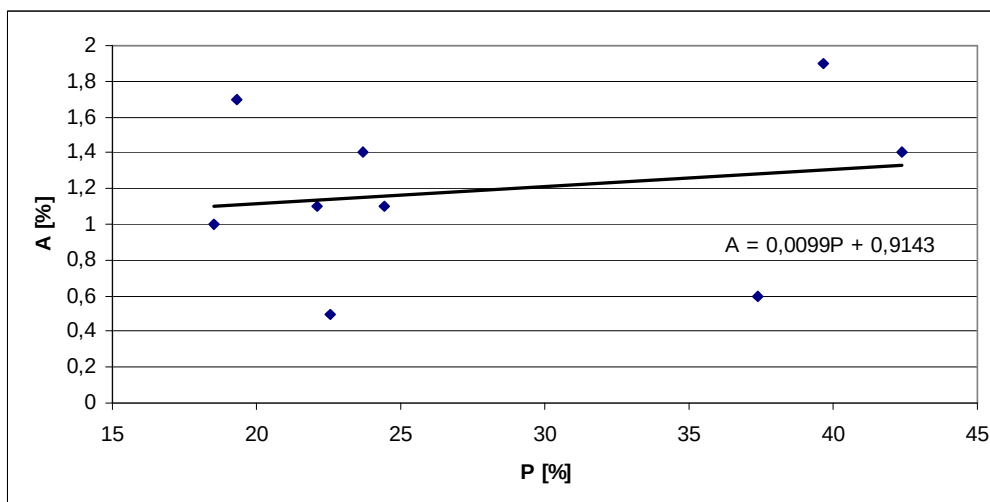


Obr. 2-25: Závislost meze pevnosti (Rm) na pórovitosti (P)

Obr. 2-26: Závislost meze kluzu ($R_{p0,2}$) na pórovitosti (P)

Na **obr. 2-26** je znázorněna závislost meze kluzu na pórovitosti. Je zřejmé, že s rostoucí hodnotou pórovitosti klesá mez kluzu. Maximální hodnota meze kluzu $R_{p0,2} = 16$ MPa při pórovitosti $P = 20,11$ % a minimální hodnota $R_{p0,2} = 12$ MPa je při $P = 46,45\%$; $22,03\%$; $39,33\%$ a $25,11\%$.

Poslední vyhodnocovaná mechanická veličina v závislosti na pórovitosti je tažnost. Na **obr. 2-27** je znázorněna závislost tažnosti na pórovitosti. Z obrázku je patrné, že tažnost roste se zvyšující se pórovitostí. Maximální naměřená hodnota tažnosti $A = 1,9\%$ při pórovitosti $P = 41,67$ % a minimální naměřená hodnota tažnosti $A = 0,5\%$ při pórovitosti $P = 20,11$ %.



Obr. 2-27: Závislost tažnosti (A) na pórovitosti (P)

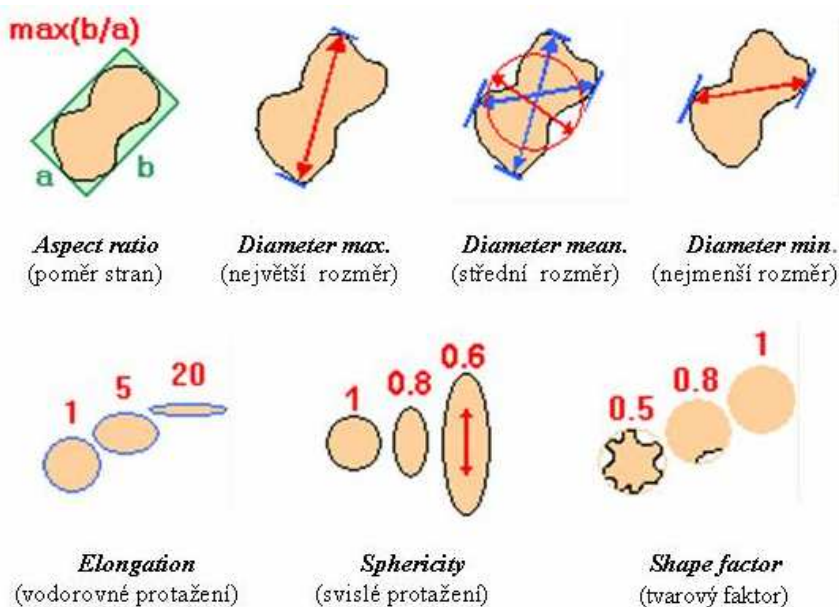
2.4.4. Určení tvarových faktorů pórů

Postup při určování tvarových faktorů pórů, byl podobný jako u určování porezity. Pro toto vyhodnocení byl také použit program Olympus Five. Vyhodnocovalo se na stejných snímcích jako porezita. Opět musela být zvolena pracovní oblast. V našem případě to bylo 5 polí při zvětšení 100x a 3 pole při zvětšení 200x. Různá zvětšení neměla na vyhodnocení vliv, protože se do programu zadává měřítko vyhodnocovaného snímku. Z naměřených hodnot se použila průměrná hodnota. V programu jsem musel nastavit určité mezní hodnoty, s kterými program počítal. Pro póry na hranici obrazu bylo stanoveno, že je to 50% celkové velikosti póru a minimální velikost póru je 5µm.

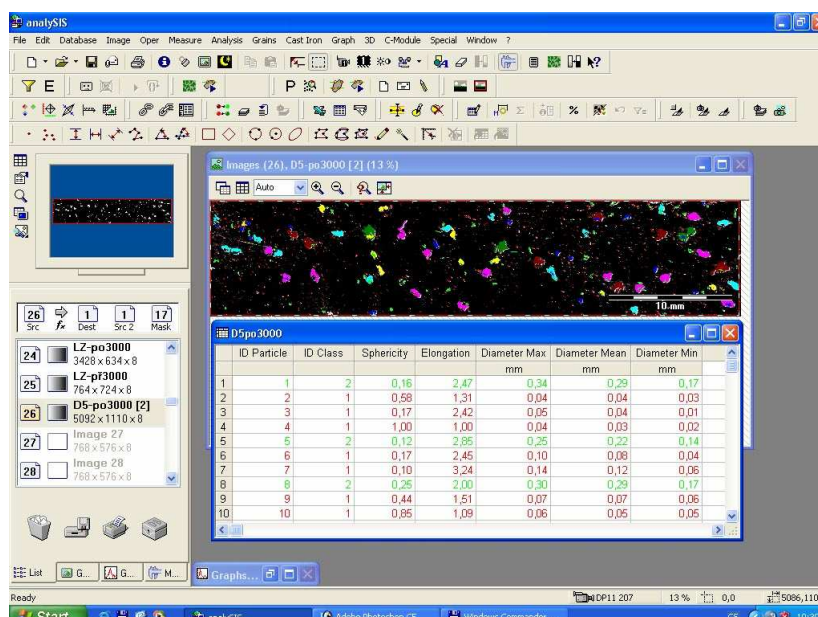
V programu se zadalo, které tvarové parametry chceme vyhodnotit (příkaz define measurement):

- Diameter max. (největší rozměr objektu)
- Diameter mean (střední rozměr objektu)
- Diameter min. (nejmenší rozměr objektu)
- Shape factor (parametr ovality)
- Aspect ratio (poměr stran objektu)
- Elongation (vodorovné protažení)
- Sphericity (svislé protažení)

Poté se opět jako u měření porezity rozlišila, příkazem „Set thresholds“, fáze obrazu od pozadí a příkazem „Set frame“ se označila plocha pro analýzu tvaru pórů. Příkazem „Devone processing – run“ se spustila analýza tvaru a program pak změřil hodnoty určených parametrů. Parametry program vypisuje rovnou do tabulek.



Obr. 2-28: Hodnocené tvarové parametry



Obr. 2-29: Vyhodnocování tvarových faktorů pomocí programu Olympus Five

Číslo vzorku	Maximální průměr [μm]	Střední průměr [μm]	Minimální průměr [μm]	Tvarový faktor [-]	Poměr stran [-]	Vodorovné prodloužení [-]	Svislé prodloužení [-]
1B	259,03	16,31	10,92	0,32	1,84	2,22	0,28
2B	575,72	21,36	14,42	0,39	1,77	2,11	0,31
3B	374,25	18,12	12,43	0,37	1,78	2,13	0,31
11A	605,87	17,15	11,62	0,4	1,82	2,19	0,3
73A	117,43	16,76	11,57	0,4	1,74	2,04	0,33
73B	224,13	16,81	11,17	0,35	1,87	2,3	0,27
111A	598,77	24,51	16,67	0,38	1,74	2,04	0,32
111B	151,2	17,71	11,86	0,31	1,83	2,24	0,28
135A	599,75	16,4	10,83	0,33	1,84	2,24	0,29
135B	708,91	18,88	12,81	0,37	1,84	2,23	0,3

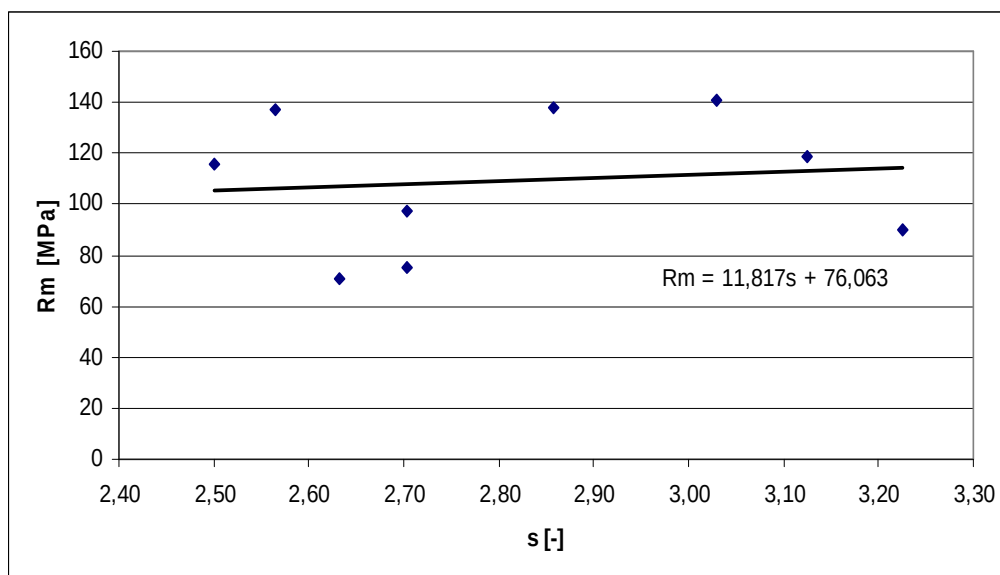
Tab. 2-9: Výsledky vyhodnocení tvarových faktorů

Tvarový faktor (f) se často přepočítává na parametr kulatosti (s), podle vzorce:

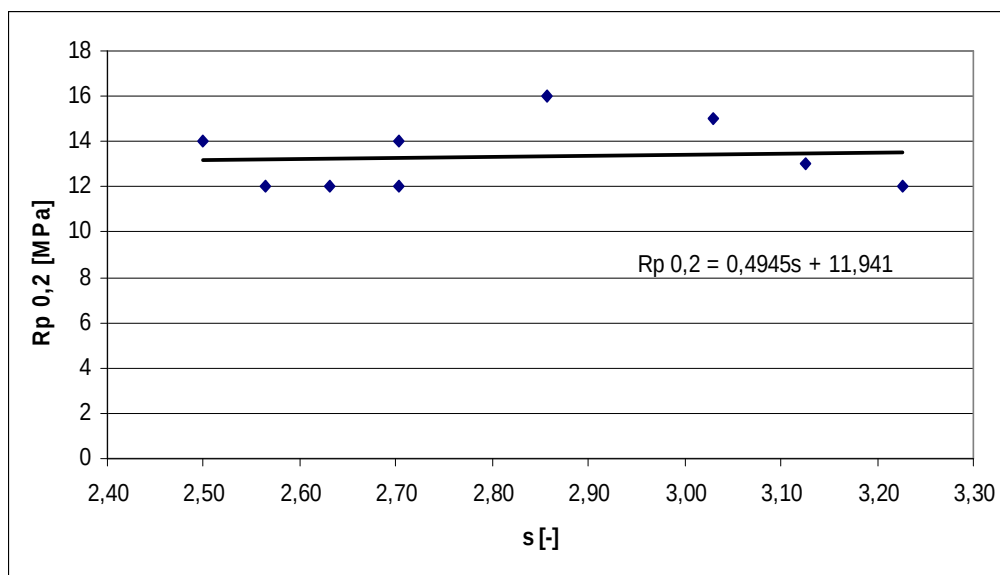
$$s = \frac{1}{f} \quad [-]$$

Č. vzorku	f	s	R _m	R _{p0,2}	A
	[-]	[-]	[MPa]	[MPa]	[%]
1B	0,32	3,13	119	13	1,4
2B	0,39	2,56	137	12	1,4
3B	0,37	2,70	97	12	1,1
11A	0,4	2,50	116	14	1,1
73B	0,35	2,86	138	16	0,5
111A	0,38	2,63	71	12	0,6
111B	0,31	3,23	90	12	1,0
135A	0,33	3,03	141	15	1,7
135B	0,37	2,70	75	14	1,9

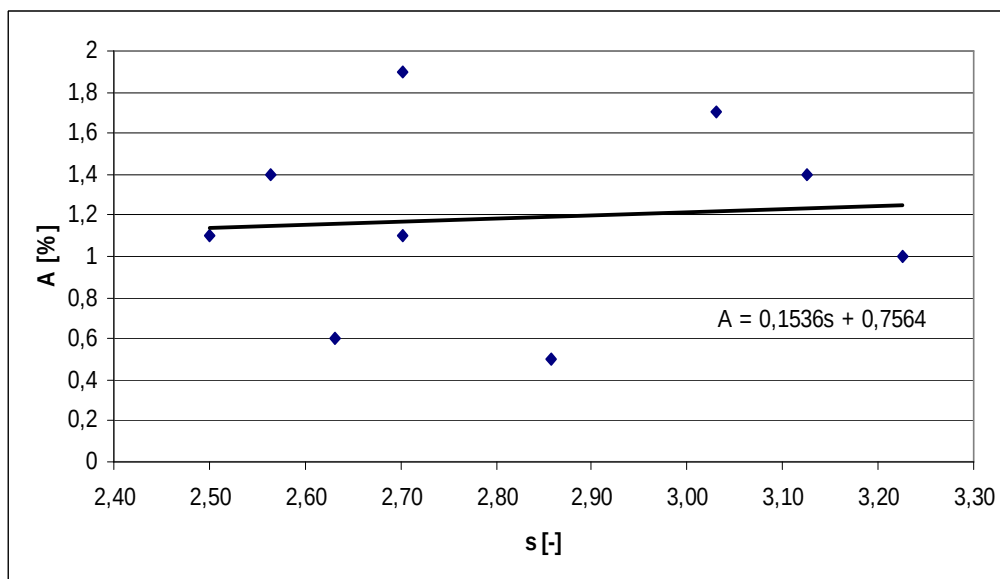
Tab. 2-10: Parametry použité pro vyhodnocení tvaru pórů

Obr. 2-30: Závislost meze pevnosti v tahu (R_m) na parametru kulatosti (s)

Na **obr. 2-30** je znázorněna závislost meze pevnosti v tahu na parametru kulatosti. Z obrázku je zřejmé, že s rostoucí hodnotou parametru kulatosti se mírně zvyšuje mez pevnosti. Maximální hodnota meze pevnosti $R_m = 141$ MPa odpovídá parametru kulatosti $s = 3,03$ a minimální hodnota $R_m = 71$ MPa při $s = 2,63$.

Obr. 2-31: Závislost meze kluzu ($R_{p0,2}$) na parametru kulatosti (s)

Na **obr. 2-31** je znázorněna závislost meze kluzu na parametru kulatosti. Z regresní přímky je zřejmé, že parametr kulatosti nemá žádný vliv na mez kluzu. Maximální hodnota meze kluzu $R_{p0,2} = 16$ MPa při parametru kulatosti $s = 2,86$ a minimální hodnota $R_{p0,2} = 12$ MPa je při $s = 2,56$; $s = 2,7$; $s = 2,63$; $s = 3,23$.

Obr. 2-32: Závislost tažnosti (A) na parametru kulatosti (s)

Na **obr. 2-32** je znázorněna závislost tažnosti na parametru kulatosti. Jako v případě meze pevnosti v tahu se při zvyšující hodnotě parametru kulatosti zvyšuje mírně tažnost. Maximální hodnota tažnosti $A = 1,7\%$ je při parametru kulatosti $s = 3,03$ a minimální hodnota $A = 0,5$ při $s = 2,86$.

2.5. Statistické vyhodnocení výsledků

U všech naměřených veličin (R_m , $R_{p0,2}$, A , P a s) bylo provedeno statistické vyhodnocení výsledků. To mělo pomoci odstranit chyby měření, určit zda se jedná o soubory s normálním rozdělením a také určit zda mají mezi sebou soubory lineární závislost. K tomuto vyhodnocení byl použit program MathCad 13.

2.5.1. Použité testy

Z každého souboru byly určeny hodnoty aritmetického průměru, směrodatné odchylky a hodnoty v každém souboru byly seřazeny podle velikosti. K vyhodnocení každého testu byly použity příslušné matematické vzorce. Celá statistika obsahově zabírá několik stran, proto je umístěna v příloze na CD.

1) Grubbsův test

Tento test zjišťuje hrubé chyby měření na námi zvolené hladině pravděpodobnosti 95%. Byl proveden na mechanických vlastnostech naměřených při tahové zkoušce (R_m , $R_{p0,2}$ a A) a na hodnotách, které byly získané obrazovou analýzou (P a s).

2) Kolmogorův test

Test zjišťoval zda-li testovaný soubor má normální rozdělení. Opět s pravděpodobností 95%.

3) Test na posouzení linearity souborů naměřených hodnot

Zda mají mezi sebou soubory lineární závislost se posuzovalo pomocí koeficientu korelace. Byly testovány kombinace souborů ($R_m - P$, $R_{p0,2} - P$, $A - P$, $R_m - s$, $R_{p0,2} - s$, $A - s$).

2.5.2. Výsledky testů

1) Grubbsův test

Pokud je kritická hodnota T_p větší než T_1 nebo T_2 , pak se vyřadí nejmenší ($T_p > T_1$) nebo největší hodnota ($T_p > T_2$). Výsledky jsou znázorněné v **tab. 2-11**. Z výsledků můžeme konstatovat, že nejvíce hrubých chyb bylo nalezeno Grubbsovým testem v souboru s hodnotami meze pevnosti v tahu (R_m). Test postupně vyřadil všechny hodnoty tohoto souboru. Podobně tomu bylo u souboru s hodnotami pórovitosti (p). Zde Grubbsův test postupně vyřadil hodnoty naměřené u vzorků 2B, 111A, 111B, 135A a 135B. Oproti tomu u souborů ve kterých byly hodnoty meze kluzu ($R_{p0,2}$), tažnosti (A) a parametru kulatosti (s) nebyly Grubbsovým testem nalezeny žádné hrubé chyby měření.

Soubor	Testovací veličina		Kritická hodnota	Číslo vzorku jehož hodnota byla vyřazena
	T_1	T_2	T_p	
Rm	14,974	12,37	2,11	111A a 135A
oprava Rm	13,783	10,826	1,938	73B a 135B
oprava Rm	8,516	9,844	1,671	2B a 111B
$R_{p0,2}$	0,507	1,014	2,11	
A	0,255	0,263	2,11	
P	3,431	5,410	2,11	2B a 111B
oprava P	2,848	4,681	1,983	135B a 135A
oprava P	1,459	4,215	1,671	111A
oprava P	0,406	0,457	1,463	
s	0,110	0,145	2,11	

Tab. 2-11: Výsledky Grubbsova testu

2) Kolmogorův test

U Kolmogorova testu se hodnotily stejné veličiny jako u Grubbsova testu. Pokud byla kritická hodnota D_p větší než testovaná veličina D , měl soubor normální rozdělení. Výsledky jsou uvedeny v **tab. 2-12**.

Soubor	Testovací veličina	Kritická hodnota	Normální rozdělení
	D	D_p	
Rm	0,375	0,785	ANO
$R_{p0,2}$	0,272	0,453	ANO
A	0,136	0,453	ANO
P	0,258	0,68	ANO
s	0,236	0,453	ANO

Tab. 2-12: Výsledky Kolmogorova testu

Z výsledků Kolmogorova testu je zřejmé, že všechny soubory naměřených hodnot mají normální rozdělení.

3) Test na posouzení linearity mezi naměřenými soubory

Tento test posuzoval, zda mají dva soubory mezi sebou lineární závislost. Linearita byla vyhodnocována pomocí koeficientu korelace (r). Test se vyhodnocoval mezi soubory hodnot Rm – P, $R_{p0,2}$ – P, A – P, Rm – s, $R_{p0,2}$ – s, A – s.

Závislost	Koeficient korelace	Kritická hodnota	Linearita
	r	r_p	ANO/NE
Rm na P	-0,298	0,602	NE
$R_{p0,2}$ na P	-0,299	0,602	NE
A na P	0,198	0,602	NE
Rm na s	0,113	0,602	NE
$R_{p0,2}$ na s	0,087	0,602	NE
A na s	0,081	0,602	NE

Tab. 2-13: Výsledky z posouzení linearity mezi naměřenými hodnotami

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo vyhodnocení porezity u tlakově litých odlitků z hořčíkové slitiny AZ91 D. Do vyhodnocení spadá srovnání mechanických vlastností (R_m , $R_{p0,2}$, A) s parametry strukturními (porezita a parametr kulatosti).

Mechanické vlastnosti byly změřeny při tahové zkoušce. Strukturní parametry byly změřeny pomocí obrazové analýzy vzorků. Získané hodnoty byly statisticky vyhodnoceny. Z naměřených a vypočtených hodnot meze pevnosti v tahu, meze kluzu, tažnosti, pórovitosti a parametru kulatosti byly vyvozeny následující závěry:

- *Mez pevnosti v tahu (R_m):* Hodnoty meze pevnosti v tahu jsou ve velmi širokém rozpětí, tj. od 71 MPa až po 141 MPa. Je to způsobeno hlavně malým počtem vyhodnocených vzorků. Tyto hodnoty odpovídají pórovitosti, která byla u vzorků vyhodnocena. Proto se nechala udělat tahová zkouška na jiných vzorcích, ta prokázala, že šlo jen o špatný výběr vzorků. Je škoda, že z důvodu nedostatku času nemohla být provedena obrazová analýza na těchto vzorcích.
- *Mez kluzu ($R_{p0,2}$):* Podíváme-li se na hodnoty meze kluzu, zjistíme, že jsou velmi nízké (12 MPa až 16 MPa). Podle mého názoru to bylo způsobeno posunem vzorku v čelistech stroje, který vykonával tahovou zkoušku. Hodnoty z druhého měření mechanických vlastností jsou již v pořádku (**tab. 2-7**) .
- *Tažnost (A):* Předpokládaná hodnota tažnosti u slitiny AZ 91D je asi 3%. Hodnoty naměřené na vzorcích jsou od 0,5% až po 1,9%. Opět je to velmi velký rozptyl hodnot, který je způsobený malým počtem měření.
- *Porezita (P):* Hodnoty porezity vzorků poukazují na určitou technologickou nepřesnost při výrobě odlitků, ze kterých byly vytvořeny vzorky. Porezita se pohybuje od 20,11% až po 46,45%. Tyto hodnoty odpovídají, jak již bylo řečeno naměřené pevnosti v tahu.
- *Parametr kulatosti (s):* Hodnoty parametru kulatosti pórů se pohybují v úzkém rozmezí (od 2,5 až 3,23). Je-li parametr kulatosti roven 1, tak je tvarem póru koule. Podle naměřených hodnot můžeme říci, že póry mají tvar spíše nepravidelný.

Na základě těchto vyhodnocovaných hodnot byly sestaveny grafy. Tyto grafy byly zkoumány, a z nich vyplynuly následující výsledky:

- *Závislost meze pevnosti v tahu (R_m) na pórovitosti (P):* Z této závislosti vyplynulo, že se zvyšujícím se procentem pórovitosti se snižuje mez pevnosti v tahu. Maximální naměřené hodnotě $R_m = 141$ MPa

odpovídá $P = 23,57\%$ a minimální hodnotě $R_m = 71$ MPa odpovídá $P = 39,33\%$.

- *Závislost meze pevnosti v tahu (R_m) na parametru kulatosti (s):* Z této závislosti bylo zřejmé, že s rostoucím parametrem kulatosti (tj. póry mají spíše nepravidelný tvar než kulatý) se mírně zvyšuje mez pevnosti v tahu. Maximální hodnotě $R_m = 141$ MPa odpovídá $s = 3,03$ a minimální hodnotě $R_m = 71$ MPa odpovídá $s = 2,63$.
- *Závislost meze kluzu ($R_{p0,2}$) na pórovitosti (P):* Tato závislost má podobný průběh jako závislost R_m na P , tj. se zvyšujícím se procentem pórovitosti se snižuje mez kluzu.
- *Závislost meze kluzu ($R_{p0,2}$) na parametru kulatosti (s):* Podle závislosti těchto hodnot lze říci, že mez pevnosti v kluzu nemá téměř vliv na hodnotu parametru kulatosti, i když má regresní přímka mírně vzestupný charakter, tj. se zvyšujícím se parametrem kulatosti se zvyšuje mez kluzu.
- *Závislost tažnosti (A) na pórovitosti (P):* Vyhodnocení této závislosti nám ukázalo, že tažnost se zvyšuje s porezitou. Maximální hodnotě tažnosti $A = 1,9\%$ odpovídá $P = 41,67\%$ a minimální hodnotě $A = 0,5\%$ odpovídá $P = 20,11\%$.
- *Závislost tažnosti (A) na parametru kulatosti (s):* Průběh je podobný jako v závislosti R_m na s . Se zvyšujícím se parametrem kulatosti se zvyšuje tažnost.

Součástí této práce je i statistické vyhodnocení výsledků. Byly použity tři testy: Grubbsův test na hrubé chyby, Kolmogorův test na normální rozdělení a test na posouzení linearity souborů naměřených hodnot.

Grubbsovým testem byly zjištěny hrubé chyby v souboru hodnot meze pevnosti v tahu. To je způsobeno tím, že byl proveden malý počet měření a hodnoty byly v širokém intervalu. Dalším souborem, ve kterém byly nalezeny hrubé chyby, byl soubor hodnot porezity. Opět to bylo způsobeno malým počtem měření a širokým rozmezím měřených hodnot. V ostatních souborech hodnot ($R_{p0,2}$, A a s) nezjistil Grubbsův test žádné hrubé chyby. Hodnoty, které byly označeny za hrubé chyby, by se měly následovně vyřadit ze souborů a dál by se s nimi nemělo počítat. V našem případě byly hodnoty v souborech ponechány z důvodu malého počtu naměřených hodnot.

Kolmogorův test normálního rozdělení zjistil, že všechny soubory naměřených hodnot (R_m , $R_{p0,2}$, A , P a s) mají normální rozdělení.

Test na posouzení linearity zjistil, že žádná z vyhodnocovaných dvojic naměřených hodnot (R_m na P , R_m na s , $R_{p0,2}$ na P , $R_{p0,2}$ na s , A na P , A na s) nemá lineární závislost.

Pro přesnější výsledky této práce by byl zapotřebí větší počet zkoumaných vzorků. Proto lze výsledky brát jen jako orientační.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Kainer, K.U. *Magnesium alloys and technologies*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KG aA, 2003, ISBN 3-527-30578.
- [2] Wikipedia encyklopedie. Hoříčík. [online]. Poslední aktualizace 2008-01-08 [cit. 2008-02-19]. Dostupné na World Wide Web: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Magnesium>>
- [3] Ptáček, L. *Nauka o materiálu 2*, CERM Brno, 1999, s. 338, ISBN 80-7204-130-4.
- [4] Ustohal, V. Ptáček, L. Slitiny hoříčíku na odlitky. *Slévárenství*, 2001, č. 2-3, s. 103 – 112.
- [5] Mezinárodní asociace pro hoříčík [online]. [cit. 2008-02-26]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.intlmag.org/index.cfm>>
- [6] Ptáček, L. Slévárenské slitiny, *Slévárenství*, 2004, č. 2-3, s. 61-66
- [7] Mazanec, K. *Fyzikální metalurgie neželezných kovů a složených materiálů*, Ostrava, 1987. 148 s. VS–TU Ostrava.
- [8] Čermák, J. Současné trendy ve zpracování hoříčíkových slitin tvářením [online]. [cit. 2008-03-12]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/soucasne-trendy-ve-zpracovani-horcikovych-slitin-tvarenim>>
- [9] Ricketts, N. Properties of cast magnesium alloys [online]. [cit. 2008-03-20]. Dostupné na World Wide Web: <http://members.tripod.com/Mg/asm_prop.htm#azchem>
- [10] Roučka, J. *Metalurgie neželezných slitin*, CERM Brno, 2004, str. 116–122. ISBN 80-214-2790-6.
- [11] Heat treatment of magnesium alloys [online]. [cit. 2008-04-08]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.2nd-hardener.com/heat-magnesium.htm>>
- [12] Mathieu, S. Rapin, C. Hazan J. a Steinmetz, P. Effect of heat treatment on corrosion and electrochemical behaviour of AZ91D magnesium alloy, *Corrosion Science*, 2002, č.44, s. 2737.
- [13] Key to metals [online]. [cit. 2008-03-20]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.key-to-nonferrous.com/Demo.aspx?id=RegSearchLMDemo&LN=EN&SessionID=1954749247520081937837D1YV64Y0KSKWSFD0FK>>

- [14] Cold chamber die casting [online]. [cit. 2008-04-10]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.dynacast.com/die-casting/cold-die-casting.html>>
- [15] High pressure die casting [online]. [cit. 2008-04-10]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.ortal.co.il/Index.asp?CategoryID=77&ArticleID=72>>
- [16] Juříčka, I. a Maisnar, J. Specifické podmínky tavení a lití hořčíkových slitin. *Slévárství*, 2004, č. 2-3, s. 66-70.
- [17] Dorsam, H. W. Tavení, odlévání a druhotné tavení slitin hořčíku ve slévárnách. *Slévárství*, 2001, č. 2-3, s.127-132.
- [18] Allper. Patented ring-plunger systém [online]. [cit. 2008-04-18]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.allper.com/english/menu/index.htm>>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	[nm]	parametr krystalické mřížky
A	[%]	tažnost
D	[-]	testovací veličina Kolmogova testu
D _p	[-]	kritická hodnota Kolmogova testu
f	[-]	tvárový faktor
p	[Pa]	tlak
P	[%]	porezita
r	[-]	koeficient korelace
r ²	[-]	čtverec korelačního koeficientu
R _m	[MPa]	mez pevnosti v tahu
R _{p0,2}	[MPa]	smluvní mez kluzu pro protažení 0,2%
s	[-]	parametr kulatosti
t	[°C]	teplota
t ₁ , t ₂ , t ₃ , t ₄	[s]	časové intervaly při tlakovém lití
T	[K]	termodynamická teplota
T ₁ , T ₂	[-]	testovací veličiny u Grubbsova testu
T _L	[°C]	teplota likvidu
T _P	[-]	kritická hodnota u Grubbsova testu
T _S	[°C]	teplota solidu
τ	[s]	čas
ρ	[kg/m ³]	hustota
v	[m/s]	rychlost vstřikování kovu při tlakovém lití
Z	[%]	prodloužení

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Vstupní úprava souborů naměřených hodnot
Příloha 2 Grubbsův test
Příloha 3 Kolmogorův test
Příloha 4 Test posouzení linearity
Příloha 5 Fotografie ploch pro určení pórovitosti – CD
Příloha 6 Výpis hodnot tvarových parametrů pórů – CD

Příloha 1**Vstupní úprava souborů naměřených hodnot**

Všechny testy se provádí s 95% spolehlivostí: $\alpha := 0.05$

$$\begin{array}{ccccc}
 \begin{pmatrix} 119 \\ 137 \\ 97 \\ 116 \\ 138 \\ 71 \\ 90 \\ 141 \\ 75 \end{pmatrix} & & \begin{pmatrix} 13 \\ 12 \\ 12 \\ 14 \\ 16 \\ 12 \\ 12 \\ 15 \\ 14 \end{pmatrix} & & \begin{pmatrix} 1.4 \\ 1.4 \\ 1.1 \\ 1.1 \\ 0.5 \\ 0.6 \\ 1.0 \\ 1.7 \\ 1.9 \end{pmatrix} & & \begin{pmatrix} 23.69 \\ 42.39 \\ 22.09 \\ 24.42 \\ 22.54 \\ 37.41 \\ 18.52 \\ 19.33 \\ 39.66 \end{pmatrix} & & \begin{pmatrix} 3.13 \\ 2.56 \\ 2.7 \\ 2.5 \\ 2.86 \\ 2.63 \\ 3.23 \\ 3.03 \\ 2.7 \end{pmatrix} \\
 R_m := & & R_{p02} := & & A := & & p := & & s :=
 \end{array}$$

Seřazení souborů

$$\begin{array}{llllll}
 R_m := \text{sort}(R_m) & R_{p02} := \text{sort}(R_{p02}) & A := \text{sort}(A) & p := \text{sort}(p) & s := \text{sort}(s) \\
 n_1 := \text{rows}(R_m) & n_2 := \text{rows}(R_{p02}) & n_3 := \text{rows}(A) & n_4 := \text{rows}(p) & n_5 := \text{rows}(s)
 \end{array}$$

Určení středních hodnot

$$x_1 := \text{mean}(R_m) \quad x_2 := \text{mean}(R_{p02}) \quad x_3 := \text{mean}(A) \quad x_4 := \text{mean}(p) \quad x_5 := \text{mean}(s)$$

Určení směrodatných odchylek

$$s_1 := \text{stdev}(R_m) \quad s_2 := \text{stdev}(R_{p02}) \quad s_3 := \text{stdev}(A) \quad s_4 := \text{stdev}(p) \quad s_5 := \text{stdev}(s)$$

$$r_1 := \max(R_m) - \min(R_m) \quad r_2 := \max(R_{p02}) - \min(R_{p02}) \quad r_3 := \max(A) - \min(A)$$

$$r_4 := \max(p) - \min(p) \quad r_5 := \max(s) - \min(s)$$

Příloha 2**Grubbsův test souborů hodnot****a) Soubor $R_{p0,2}$**

$$T_{21} := \frac{x_2 - R_{p0,2}}{s_2} \quad T_{21} = 0.507$$

$$T_{22} := \frac{R_{p0,2} - x_2}{s_2} \quad T_{22} = 1.014$$

$$T_{p2} := \frac{n_2 - 1}{\sqrt{n_2}} \cdot \frac{\sqrt{qt\left(1 - \frac{\alpha}{n_2}, n_2 - 2\right)^2}}{\sqrt{n_2 - 2 + qt\left(1 - \frac{\alpha}{n_2}, n_2 - 2\right)^2}}$$

$$T_{p2} = 2.11$$

Dle vztahu pro výpočet kritické hodnoty Grubbsova testu je T_{p2} větší než hodnoty testované veličiny T_{22} a T_{21} . Proto nemůžeme s 95% spolehlivostí zamítnout nulovou hypotézu. V tomto souboru se nevyskytují žádné hrubé chyby.

b) Soubor A

$$T_{31} := \frac{x_3 - A_0}{s_3} \quad T_{31} = 0.255$$

$$T_{32} := \frac{A_0 - x_3}{s_3} \quad T_{32} = 0.263$$

$$T_{p3} := \frac{n_3 - 1}{\sqrt{n_3}} \cdot \frac{\sqrt{qt\left(1 - \frac{\alpha}{n_3}, n_3 - 2\right)^2}}{\sqrt{n_3 - 2 + qt\left(1 - \frac{\alpha}{n_3}, n_3 - 2\right)^2}} \quad T_{p3} = 2.11$$

Dle vztahu pro výpočet kritické hodnoty Grubbsova testu je T_{p3} větší než hodnoty testované veličiny T_{32} a T_{31} . Proto nemůžeme s 95% spolehlivostí zamítnout nulovou hypotézu. V tomto souboru se nevyskytují žádné hrubé chyby.

Příloha 3

Kolmogorovův test

a) Soubor Rm

$$n_1 = 3 \quad i := 0..n_1 - 1$$

$$\text{Kolm1}_{i_1} := \left| \text{pnorm}(Rm_{i_1}, x_1, s_1) - \frac{i+1}{n_1} \right|$$

$$D_{P1} := \frac{1.36}{\sqrt{n_1}}$$

$$\text{Kolm2}_{i_1} := \left| \text{pnorm}(Rm_{i_1}, x_1, s_1) - \frac{i}{n_1} \right|$$

$$D_{P1} = 0.785$$

$$D_1 := \max(\text{stack}(\text{Kolm1}, \text{Kolm2})) \quad D_1 = 0.375$$

Dle vztahu pro výpočet kritické hodnoty pro Kolmogorovův test je testovací veličina D_1 menší než hodnota kritická D_{P1} . Proto s 95% spolehlivostí nezamítáme nulovou hypotézu, soubor veličiny Rm má normální rozdělení.

b) Soubor Rp02

$$n_2 = 9 \quad i := 0..n_2 - 1$$

$$\text{Kolm21}_{i_1} := \left| \text{pnorm}(Rp02_{i_1}, x_2, s_2) - \frac{i+1}{n_2} \right|$$

$$D_{P2} := \frac{1.36}{\sqrt{n_2}}$$

$$\text{Kolm22}_{i_1} := \left| \text{pnorm}(Rp02_{i_1}, x_2, s_2) - \frac{i}{n_2} \right|$$

$$D_{P2} = 0.453$$

$$D_2 := \max(\text{stack}(\text{Kolm21}, \text{Kolm22})) \quad D_2 = 0.272$$

Dle vztahu pro výpočet kritické hodnoty pro Kolmogorovův test je testovací veličina D_2 menší než hodnota kritická D_{P2} . Proto s 95% spolehlivostí nezamítáme nulovou hypotézu, soubor veličiny $Rp_{0,2}$ má normální rozdělení.

Příloha 4

Posouzení linearity

Test na nulovou hodnotu koeficientu korelace u veličin R_m a p

z tabulek pro $p=0,05$ a $k=9$ je:

$$\text{corr}(R_m, p) = -0.298$$

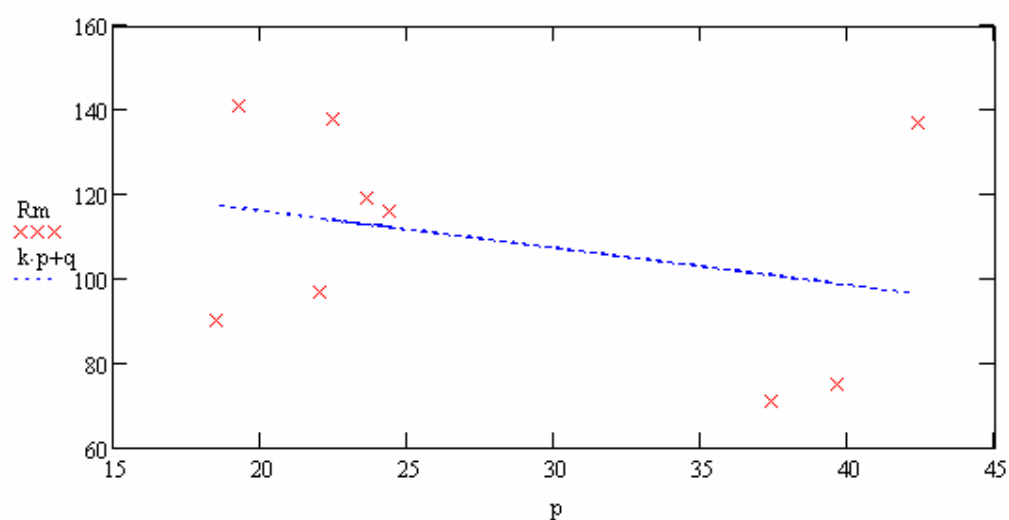
$$r_p := 0.602$$

$$k := \text{slope}(p, R_m)$$

$$k = -0.871$$

$$q := \text{intercept}(p, R_m)$$

$$q = 133.546$$



Kritická hodnota testu na nulovou hodnotu koeficientu korelace obou souborů r_p je větší než testovací veličina určená pomocí funkce `corr`. Proto s 95% spolehlivostí zamítáme nulovou hypotézu, soubory veličin R_m a p nemají lineární závislost.