



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ODLITKY Z HOŘČÍKOVÝCH SLITIN A JEJICH POUŽITÍ

MAGNESIUM CASTINGS AND THEIR APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Natália Škriečková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vítězslav Pernica, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Studentka: **Natália Škriečková**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Vítězslav Pernica, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

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

Odlitky z hořčíkových slitin a jejich použití

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Slitiny hořčíku mají pro své vlastnosti stále potenciál v technických aplikacích. V posledních dvaceti letech zaznamenaly hořčíkové slitiny ve světě značný rozmach a využití těchto slitin nabývá stále na významu. Nejvíce se jich využívá v automobilovém průmyslu, kde napomáhají snižovat hmotnost vozidla a nepřímou se tak snižuje vyprodukovaná emise CO₂. Vedle toho se využívá také v oblasti elektrotechniky a dalších odvětví průmyslu.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je vyhotovit literární rešerši na zadané téma. Autorka by měla čtenáře seznámit s problematikou výroby odlitků z hořčíkových slitin, vlastnostmi a příklady jejich obecného použití.

Seznam doporučené literatury:

KAINER, K.U. Magnesium - Alloys and Technologies. 1st ed. Weinheim: Wiley - VCH, 2003. 290 p. ISBN 3-527-30570-X.

PTÁČEK, L. Slévárenské slitiny hořčíku. Slévárenství. 2-3/2004, roč. 52, s. 61 - 66. ISSN 0037-6825.

DORSAN, H.W. Tavení, odlévání a druhotné tavení slitin hořčíku ve slévárnách. Slévárenství. 2-3/2001, roč. 49, s. 127 - 132. ISSN 0037-6825.

USTOHAL, U., L. PTÁČEK. Slitiny hořčíku na odlitky. Slévárenství. 2-3/2001, roč. 49, s. 103 - 112. ISSN 0037-6825.

AVEDESIAN, M. M., H. BAKER. Magnesium and magnesium alloys. Materials Park, OH: ASM International, 1999. ISBN 978-0-87170-657-7.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Táto bakalárska práca je zameraná na zhrnutie poznatkov o horčíku a horčíkových zliatinách a ich použití v rôznych odvetviach. V úvodnej časti sú vyzdvihnuté prospešné vlastnosti tohto kovu, jeho zliatin a spôsoby výroby. Druhá časť je zameraná na odliatky týchto zliatin, kde popisujeme ich prípravu a samotný proces odlievania rôznymi spôsobmi. Na základe doterajších výskumov hodnotíme rozvoj používania týchto zliatin v rôznych priemysloch ako je automobilový, letecký a elektrotechnický, ale aj moderné využitie v medicíne. V neposlednom rade kritizujeme pozitíva aj negatíva celého procesu výroby konečných dielov z hľadiska dopadu na životné prostredie.

Kľúčové slová: Horčík, horčíkové zliatiny, odlievanie, spracovanie, použitie zliatin horčíku.

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on summarizing the knowledge about magnesium and magnesium alloys and their use in various industries. In the introductory part, the beneficial properties of this metal, its alloys and methods of production are highlighted. The second part is focused on castings of these alloys, where we describe their preparation and the actual casting process in various ways. Based on previous research, we evaluate the development of the use of these alloys in various industries such as automotive, aerospace and electrical engineering, as well as modern use in medicine. Last but not least, we criticize the positives and negatives of the entire process of production of final parts in terms of environmental impact.

Keywords: Magnesium, magnesium alloy, casting, processing, applications magnesium alloys

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

ŠKRIEČKOVÁ, Natália. *Odlitky z hořčíkových slitin a jejich použití* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-26], 39 s. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125119>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Odbor slévarenství. Vedoucí práce Ing. Vítězslav Pernica, Ph.D.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že bakalársku prácu som vypracovala samostatne, pod vedením Ing. Vítězslava Pernici, Ph.D. Súčasne prehlasujem, že všetky zdroje textových aj obrázkových informácií, z ktorých som čerpala, sú riadne citované v zozname použitých zdrojov.

POĎAKOVANIE

Týmto ďakujem pánovi Ing. Vítězslavovi Pernicovi, Ph.D. za cenné pripomienky a rady týkajúce sa spracovania bakalárskej práce.

OBSAH

Abstrakt

Bibliografická citácia

Čestné prehlásenie

PodĎakovanie

ÚVOD	9
1 HORČÍK	10
1.1 História	10
1.2 Vlastnosti horčíku	11
1.3 Výskyt	12
1.4 Výroba	12
1.5 Využitie čistého Mg	14
2 HORČÍKOVÉ ZLIATINY	14
2.1 Vplyv prísadových prvkov v horčíkových zliatinách	15
2.2 Tvárne zliatiny	17
2.3 Zlievarenské zliatiny	17
3 SPRACOVANIE ZLIATIN NA ODLIEVANIE	18
3.1 Tavenie	18
3.2 Technológie odlievania	19
3.2.1 Tlakové liatie	19
3.2.2 Liatie do pieskových foriem	20
3.2.3 Squeeze casting	21
3.2.4 Rheocasting	22
3.2.5 Thixocasting	23
3.3 Obrábanie a povrchové úpravy	24
4 POUŽITIE HORČÍKOVÝCH ODLIATKOV	25
4.1 Automobilový priemysel	26
4.2 Letecký a kozmický priemysel	27
4.3 Elektrotechnický priemysel	28
4.4 Medicína	29
4.5 Športové vybavenie	30
5 RECYKLÁCIA A DOPAD NA ŽIVOTNÉ PROSTREDIE	32
6 SÚČASNOSŤ A PERSPEKTÍVA HORČÍKOVÝCH ZLIATIN	33
ZÁVER	34

Zoznam použitých zdrojov

Zoznam obrázkov

Zoznam tabuliek

ÚVOD

Horčík je ôsmy najhojnejší prvok v zemskej kôre. Aj keď sa nenachádza v kovovej forme, je všeobecne dostupný vo forme minerálov, ako je magnetit a dolomit. Má strieborno-bielu farbu a na vzduchu sa mierne zakalí.

Kovový horčík má jedinečné vlastnosti. Má najnižšiu hustotu zo všetkých kovových prvkov, vďaka čomu je najľahší. Je však tiež veľmi pevný a ľahko sa obrába. Horčík má podobné vlastnosti ako jeho sesterský kov, hliník, ale je o 34% ľahší ako hliník a 70% ľahší ako oceľ, vďaka čomu dokonale spĺňa požiadavky pre dopravný priemysel.

V dnešnom strojárskom svete si ľahké materiály získali veľkú pozornosť kvôli dopytu po lacnej výrobe a zvyšujúcej sa účinnosti prostredníctvom znižovania hmotnosti. Zodpovedajúcim spôsobom je horčík jedným z materiálov, ktoré sa pripisujú do kategórie ľahkých materiálov po hliníku a jeho zliatinách. Horčík a jeho zliatiny majú niektoré jedinečné uplatnenie v letectve a iných strojárskych odvetviach. Majú veľký potenciál pre dopravný priemysel, kde znížením hmotnosti docielime zníženie zotrvačných síl, a tým aj úsporu pohonných látok. Využívajú sa aj v ďalších odvetviach priemyslu, kde je dôležité znížiť hmotnosť strojov, prípadne ich súčastí.

Okrem nízkej mernej hmotnosti majú horčíkové zliatiny ďalšie prednosti, a to napríklad dobré mechanické vlastnosti zrovnateľné s charakteristikami zliatin hliníku, ďalej dobré tlmiace vlastnosti, spracovateľnosť, zvariteľnosť a obrobiteľnosť vysokými rýchlosťami pri veľkej hĺbke záberu.

Nevýhodou u týchto zliatin je obťažnejšia a teda aj nákladnejšia výroba, zlá tvárnosť za studena, nízka odolnosť proti creepu pri vyšších teplotách.

1 HORČÍK

1.1 História

V roku 1618 sa Henry Wicker, farmár z Epsomu v Anglicku, pokúsil dať svojim kravam vodu zo studne. Odmietli ju piť kvôli horkej chuti. Farmár si však všimol, že voda lieči škrabance a vyrážky. Sláva soli Epsom sa rozšírila. Nakoniec sa zistilo, že ide o síran horečnatý, MgSO_4 . [2]

Všetko to však začalo objavom, ktorý možno pripísať trom jednotlivcom, keďže každý chemik je spojený s veľkým prielomom. Prvou osobou, ktorá uznala, že horčík je prvkom, bol Joseph Black v Edinburghu v roku 1755. Odlišil magnézium (oxid horečnatý, MgO) od vápna (oxid vápenatý, CaO), hoci sa obidve vyrábali zahrievaním podobných druhov uhličitanových hornín magnezitu a vápenca. [2]

Druhým významným menom spojeným s horčíkom je Joseph Black, ktorý rozpoznal horčík ako prvok v roku 1755. Bol izolovaný sirom Humphrym Davym (1778 - 1829) v roku 1808 takmer 200 rokov po jeho objavení. Elektrolyzoval zmes magnézia (oxid horečnatý, MgO) a oxid ortuťnatý (HgO). Davyho prvý návrh na meno bolo magnium, ale teraz sa používa magnézium. [2]

Ďalšie významné meno spojené s históriou horčíka je Bussy. V roku 1830 bol vďaka nemu horčík pripravený chemickou cestou – pôsobením pár kovového draslíku na bezvodný chlorid horečnatý. [1,2]

Michael Faraday vyrábala kovový horčík elektrolýzou kondenzovaného bezvodného chloridu horečnatého v roku 1833. Komerčná výroba horčíka elektrolýzou sa pripisuje Robertovi Bunsenovi, ktorý v roku 1852 vyrobil malú laboratórnu bunku pre elektrolýzu kondenzovaného chloridu horečnatého, Bunsenova modifikovaná bunka sa použila v „Hliník a horčík Fabrik“ v Hemelinge v Nemecku pre prvú komerčnú výrobu horčíka. Navrhli a postavili nový závod na dehydratáciu a elektrolýzu roztaveného karnalitu. [2]

V roku 1896 sa tento proces ďalej rozvíjal 'Griesheim-Elektron Chemische Fabrik', ktorý tento proces previedol do svojich závodov Bitterfield Works a do roku 1916 sa stal jediným závodom na výrobu horčíka na svete a potom sa stal súčasťou IG Farbenindustrie. [2]

Lloyd Montgomery Pidgeon bol kanadský vedec, ktorý bol vedúcim katedry metalurgie na univerzite v Toronte. Vyvinul horčík, ktorý nesie jeho meno, a tiež nové elektrolytické procesy. [2,3]

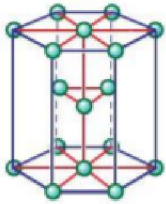
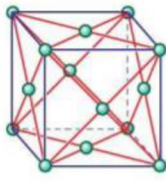
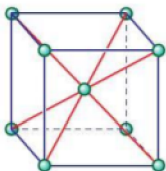
Názov horčík pochádza z Magnesie, okresu Thesálie / Grécko, v ktorom sa prvýkrát našlo, a dodnes sa v oblasti nachádza veľa horčíkovej rudy. Je to prvok, ktorý v periodickej tabuľke nájdeme pod chemickou značkou Mg (z latinského názvu Magnesium) a nesie protónové číslo 12. [2,3]

1.2 Vlastnosti horčíku

Horčík je striebrolesklý kov, preto je svojou farbou takmer identický s hliníkom. Najväčšou výhodou horčíku je, že veľmi dobre tlmí vibrácie. Vďaka výskytu v prírode je v podstate nevyčerpatelný. Okrem predností ma však aj nevýhody a to je malá pevnosť, nízka tvárnosť pri nižších teplotách a ľahko koroduje – už pri izbovej teplote pomaly reaguje s vodou a kyslíkom. Tieto nedostatky odstraňujeme zliatinami s inými kovmi alebo zmenšovaním zrna.[2,6]

V tabuľke číslo 1 sú znázornené fyzikálne vlastnosti horčíka v porovnaní s hliníkom a železom.

Tab. 1 – Fyzikálne vlastnosti [5,7,8]

FYZIKÁLNE VLASTNOSTI	HORČÍK (Mg)	HLINÍK (Al)	ŽELEZO (Fe)
Hustota	1,74 – 1,95 g/cm ³	2,50-2,90 g/cm ³	7,86 g/cm ³
Teplota tavenia	447 - 650 °C	475 - 677 °C	1539 °C
Bod varu	1110 °C	2470 °C	2861°C
Merné teplo	955 – 1060 J/kg.K	900 – 995 J/kg.K	450 J/kg.K
Skupenské teplo tavenia	8,48 kJ/mol	10,7 kJ/mol	13,8 kJ/mol
Výparné teplo	128 kJ/mol	284 kJ/mol	354 kJ/mol
Tepelná vodivosť	50 – 156 W/m.K	80 – 160 W/m.K	75 W/m.K
Krystalová štruktúra	HCP Hexagonálna 	FCC kubická plošne stredená 	BCC kubická priestorovo stredená 
Elektrický odpor	4,15 – 15 μΩ.cm	2,5 – 8 μΩ.cm	13 μΩ.cm

V tabuľke číslo 2 sú porovnané mechanické vlastnosti horčíka v porovnaní s hliníkom a železom.

Tab. 2 – Mechanické vlastnosti [4,7,8]

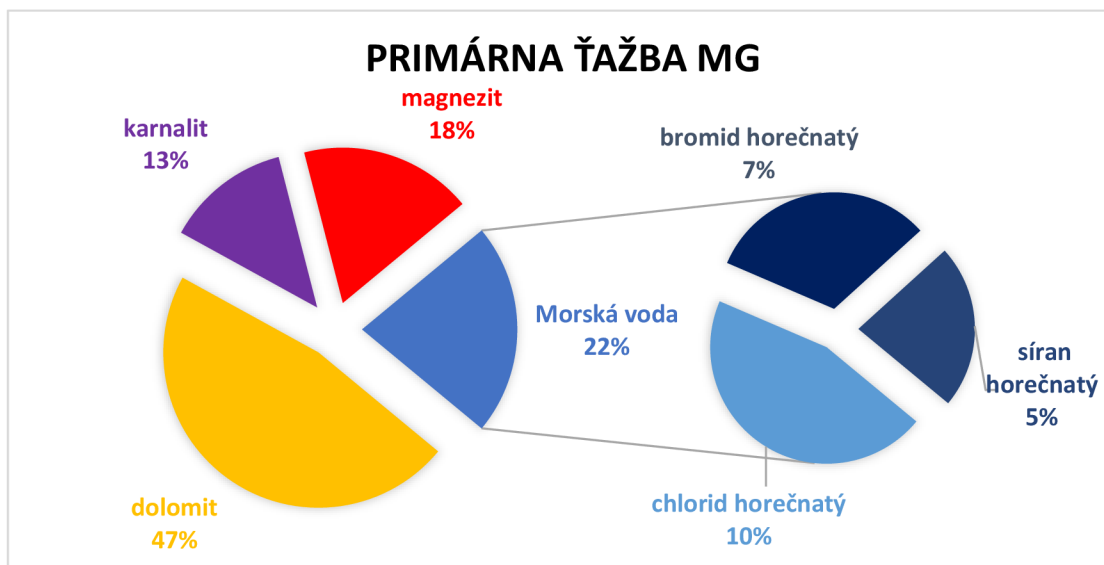
MECHANICKÉ VLASTNOSTI	HORČÍK (Mg)	HLINÍK (Al)	ŽELEZO (Fe)
Pevnosť v ťahu	185 – 475 MPa	65 – 386 MPa	330 - 400 MPa
Medza sklzu	21 MPa	100 MPa	200 MPa
Ťažnosť	3,5 – 18 %	0,4 – 10 %	12 – 25 %
Tvrdosť Vickers	35 – 135 HV	60 – 150 HV	380 HV
Lomová húževnatosť	12 – 18 MPa.m ^{1/2}	18 – 35 MPa.m ^{1/2}	50 – 60 MPa.m ^{1/2}
Youngov modul pružnosti	42 – 47 GPa	72 – 89 GPa	211 GPa
Poissonovo číslo	0,35	0,34	0,28
Modul pružnosti v šmyku	17 GPa	26 GPa	81 GPa

1.3 Výskyt

V prírode sa horčík najčastejšie vyskytuje ako horečnatý kation Mg^{2+} , pretože má veľkú chemickú reaktivitu. V mŕtvom mori sa nachádza 3,4 hmotnostných % Mg, to znamená, že jeden m^3 vody obsahuje približne 34 kg horčíku. V morskej vode je iba 0,14 hmotnostných % Mg, takže na $1 m^3$ morskej vody pripadá 1,4 kg magnézia a v zemskej kôre (6 – 70 km pod povrchom Zeme) obsahuje 1,94 hmotnostných % Mg. Vo vesmíre sa vyskytuje 1 atóm Mg/ 30 000 atómov hélia. [1]

Hlavné zdroje pre ťažbu horčíku:

- Dolomit – $CaMg(CO_3)_2$ (90 % - 100 %) a $CaCO_3$ (len 0 - 10 %) - obsahuje 19,6 - 21,7 % Mg
- Magnezit – $MgCO_3$ (uhličitan horečnatý) - obsahuje 28,83 % Mg
- Karnalit – $KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$ (hexahydrát chloridu draselno-horečnatého) - obsahuje 8,3 % Mg
- Morská voda - Chlorid horečnatý - $MgCl_2 \cdot 2H_2O$
 - Bromid horečnatý - $MgBr_2$
 - Síran horečnatý - $MgSO_4$ [1,4]



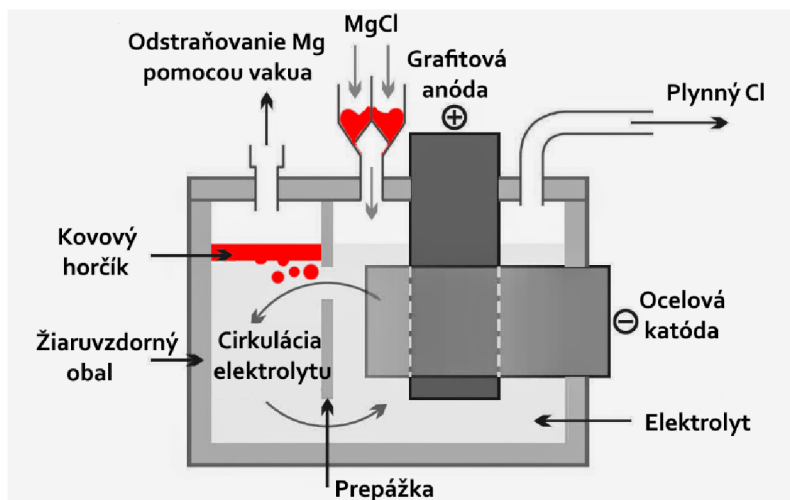
obr. 1 Koláčový graf nálezísk horčíku [3]

1.4 Výroba

Technológie prípravy horčíka sú odvodené z fyzikálno-chemických vlastností oxidu horečnatého (MgO) a chloridu horečnatého ($MgCl_2$). Tieto zlúčeniny sú najčastejšie zastúpené v horčíkových surovinách. Podľa ich vlastností a technológie sa kovový horčík vyrába tavnou elektrolýzou z tavenín $MgCl_2$ a metalo-termickou redukciou MgO vhodným redukovačom napríklad Si a/alebo Al. [11,15]

- **Tavná elektrolyza**

Proces elektrolytickej výroby zahŕňa dva kroky: prípravu $MgCl_2$ a samotnú elektrolyzu chloridovej taveniny obsahujúcej $MgCl_2$. Najčastejšou surovinou pre elektrolyzu sa používajú bezvodný $MgCl_2$, bezvodný karnalit a čiastočne dehydrovaný chlorid horečnatý. Väčšina vsádzok obsahuje nečistoty, ako sú napríklad C, SiO_2 , MgO, zlúčeniny ťažkých kovov a iné, ktoré negatívne ovplyvňujú priebeh elektrolyzy a kvalitu vyrobeného Mg. Hlavným reprezentantom elektrolytickej technológie je proces IG Farben.[9,11]

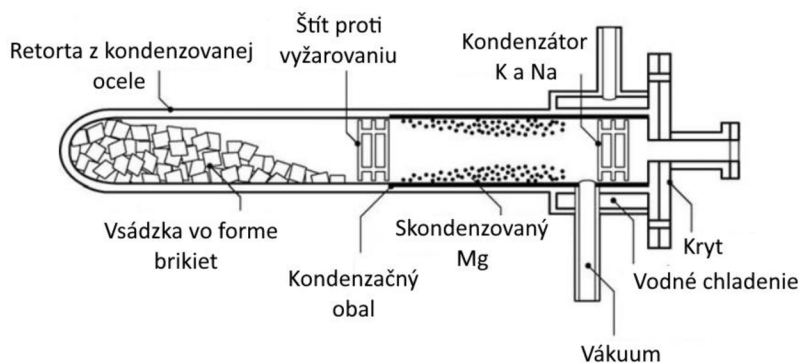


obr. 2 Elektrolyzér pre elektrolytické vylučovanie Mg [11]

- **Termické redukčné procesy**

Metalo-termické redukčné procesy oxidu horečnatého sú oproti elektrolyze $MgCl_2$ jednoduchšími postupmi. Ako redukovač používame kremík, hliník alebo uhlík. Redukčné prostriedky sú najdrahšou položkou vo vsádzke, preto ich účelné využitie je nutnou podmienkou prosperujúcej výroby. Uhlík je lacný prvok, ale používa sa ako reakčné činidlo zriedkavo, kvôli reakčnej teplote, ktorá je nad $1800\text{ }^\circ\text{C}$ a potrebe rýchleho ochladenia reakčných plynov. Ďalším redukčným činidlom je hliník, ktorý sa používa málokedy, kvôli jeho vysokej cene. Najpoužívanejší je kremík, napriek tomu že je menej účinný ako hliník.[10]

Charakteristické pre tieto metódy je, že vznikajú horčikové pary, zatiaľ čo ostatné zložky sú v tuhom alebo kvapalnom stave. Reakcie musia prebiehať vo vákuu alebo v internom plyne, pretože horčikové pary rýchlo reagujú s kyslíkom a s dusíkom. Najznámejším a najpoužívanejším termickým redukčným procesom je Pidgeonov proces (obr. 3) [11]



obr. 3 Retorta používaná v procese Pidgeon [11]

1.5 Využitie čistého Mg

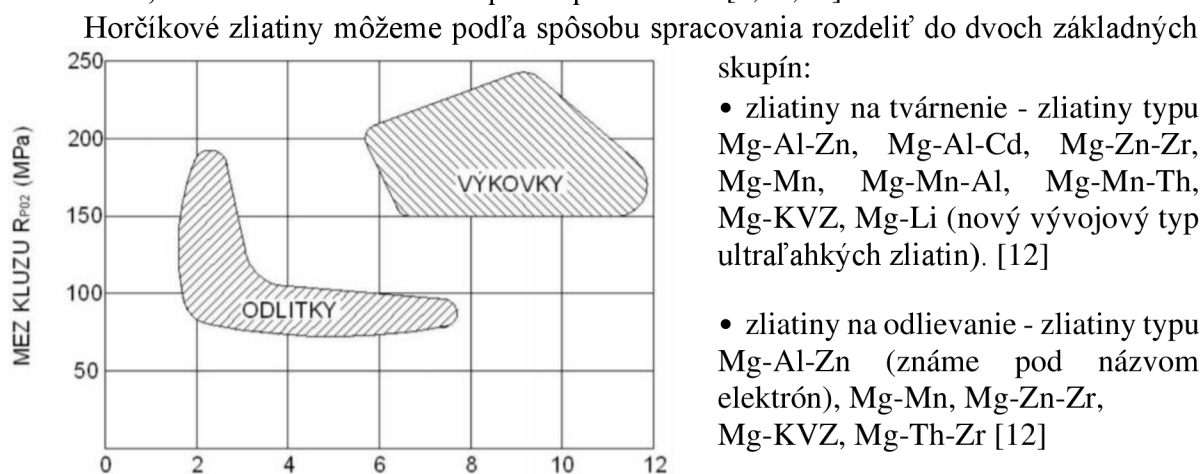
Čistý horčík najčastejšie používame ako géter. Táto látka na seba viaže zvyšky plynov, týmto nám umožňuje dosiahnuť vysoké vákuum. Spaľovanie horčíka produkuje biele svetlo. Vďaka tomu je ideálny pre ohňostroje, svetlice a flash fotografie. Funguje aj ako činidlo na výrobu uránu zo soli. Ióny prvku sú potrebné pre každý živý organizmus. To je dôvod, prečo je horčíková soľ súčasťou hnojív a potravín. Horčík sa tiež používa na odstránenie síry zo železa a ocele. Do istej miery ho môžeme používať ako konštrukčný materiál, avšak nevýhodou je nízka mechanická vlastnosť a slabá korózná odolnosť. Preto sa väčšina horčíku využíva ako prísada do iných zliatin. [17]

Na zliatiny sa v dnešnej dobe využíva iba 40 % primárneho horčíku. Na výrobu hliníkových zliatin používame ďalších približne 40 % horčíku. Na spracovanie zliatin železa využívame približne 10 %. Zostávajúcich 10 % produkcie horčíku používame na rôzne iné procesy, ako je napríklad anodická ochrana. V chemickom priemysle sa využíva na výrobu chemikálií na báze horčíka, tiež na výrobu pyrotechniky a v rôznych iných odvetviach. [1,14]

2 HORČÍKOVÉ ZLIATINY

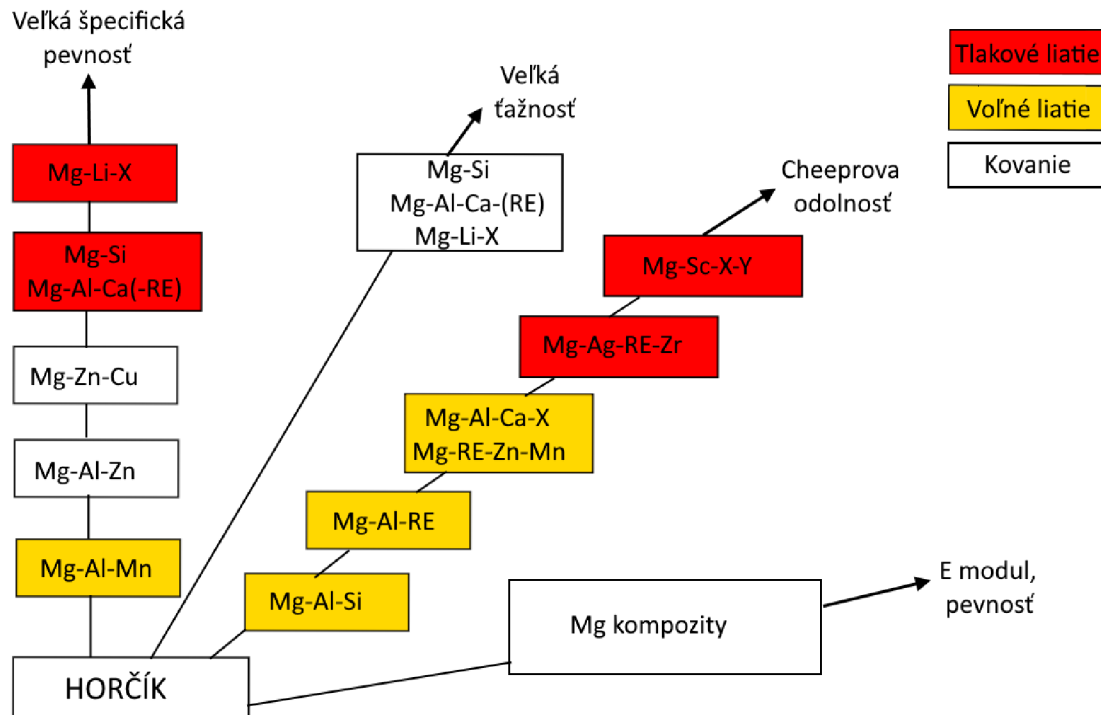
Najväčšie pozitívum horčíkových zliatin je ich nízka merná hmotnosť. V posledných rokoch výrazne využitie týchto zliatin zvyšuje vďaka pokročilým výskumom. Dôvodom je neustály dopyt v automobilovom, leteckom a inom priemysle kvôli túžbe po ľahších mobilných technikách. Medzi špecifické mechanické vlastnosti patrí dobrá merná pevnosť (podobná ako u zliatin hliníku a ocelí), schopnosť tlmenia vibrácií všetkých frekvencií. Ďalšou výhodou je nízka teplota tavenia, ktorá pozitívne vplyva na zlievarenské vlastnosti. V kombinácii s vhodnými legúrami odstraňujeme zlievarenské vady ako sú praskliny za tepla alebo mikrostažneniny. V neposlednom rade medzi prednosti horčíkových zliatin patrí ich dobrá obrobiteľnosť a navyše majú dobrú recyklovateľnosť. [1,12,17]

Každá zliatina má svoje pre aj proti a výnimkou nie sú ani horčíkové. V porovnaní s hliníkovými zliatinami majú Mg zliatiny zložitejšiu výrobu a technologické spracovanie. Vzhľadom k tomu, že je horčík veľmi reaktívny s kyslíkom za vysokých teplôt, tavenie aj odlievanie musí prebiehať pod ochrannou atmosférou alebo taviacimi soľami, čo má negatívny dopad na ekológiu. Medzi ďalšie nežiadúce vlastnosti patria horšia zvariteľnosť, nízka tvrdosť a odolnosť proti opotrebeniu. [1,12,17]



obr. 4 Mechanické vlastnosti odlievaných a kovaných horčíkových zliatin [12]

Na obrázku 5 sú uvedené vývojové trendy horčíkových zliatin podľa mechanických vlastností ako je vysoká pevnosť, ťažnosť, odolnosť proti creepu alebo kompozitov, a spôsob výrobných technológií. [9]



obr. 5 Smery vývoja horčíkových zliatin [9]

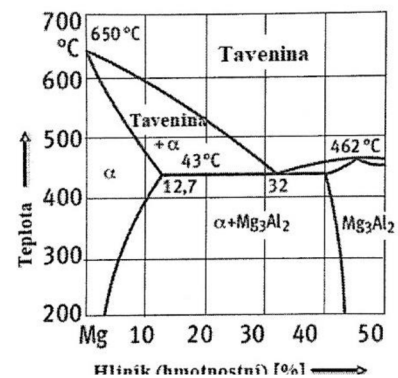
2.1 Vplyv prísadových prvkov v horčíkových zliatinách

Vhodnou kombináciou horčíku s inými prvkami získavame konštrukčné materiály. Pri výbere legujúcich prvkov sa musíme zamyslieť, ktoré vlastnosti chceme zlepšiť – pevnosť, zliateľnosť, odolnosť proti creepu, lepšiu odolnosť proti korózii, zvýšený modul pružnosti. Pri výbere vhodných legujúcich prvkov musíme brať v úvahu, že pri zlepšení jednej vlastnosti môžeme zhoršiť inú vlastnosť, preto si musíme vopred určiť, načo budeme danú zliatinu používať. [9]

Medzi základné legujúce prvky zaraďujeme Al, Mn, Zn prípadne Li. Ďalej medzi doplnkové kovy patria napríklad Th, Zr, Si, Ag, Ti a kovy vzácnych zemín ako sú La, Ce, Nb, Pr, Sc, Gd, Y. [9]

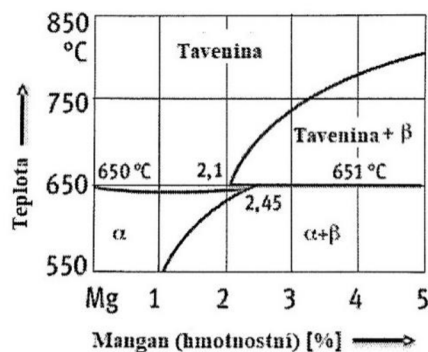
Legujúce prvky:

- **Hliník (Al)** je základným prvkom v liatych zliatinách horčíku a zároveň je najčastejšie používaný legujúci prvok. Zlepšuje pevnosť a optimalizuje pomer pevnosti a ťažnosti. Zliatiny sú dobre zliateľné. Maximálna rozpustnosť v horčíku je 11,5 at. % to je približne 12,7 hm. %. Tepelne spracovávať môžeme zliatiny s obsahom hliníka nad 6 hm. %. [9,15,16]



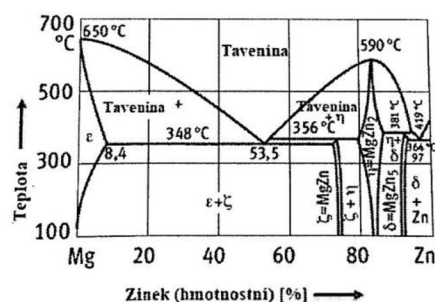
obr. 6 Binárny diagram Mg-Al [3]

- **Mangán (Mn)** sa ako prísadový prvok používa hlavne na zvýšenie odolnosti proti korózii v slanej vode, keďže samotný horčík rýchlo koroduje. V horčíkových zliatinách nám mangán zjemňuje zrno, zvyšuje medzu kluzu a zlepšuje zlievateľnosť. Ďalšou prednosťou je zníženie rozpustnosti železa. Mn sa zvyčajne používa v kombinácii s iným legujúcim prvkom, najčastejšie s Al. [9,15,19,20]



obr. 7 Binárny diagram Mg-Mn [3]

- **Zinok (Zn)** sa väčšinou nevyskytuje v zlúčeninách samostatne, ale v kombinácii s hliníkom alebo zirkóniom a thoriom. Zinok nám dopomáha k zlepšeniu pevnosti v horčíkových zliatinách. Podobne ako mangán nám zjemňuje zrno a zlepšuje zlievateľnosť. [9,15,19]



obr. 8 Binárny diagram Mg-Zn [3]

- **Lítium (Li)** je jediný legujúci prvok, ktorý má menšiu mernú hmotnosť ako čistý horčík a tým ešte viac znižuje jeho hmotnosť. Zliatiny horčíku s lítiom patria medzi najľahšie, preto sú perspektívne konštrukčné materiály. Pri pridaní Li do zliatiny zvýšime ťažnosť na úkor zníženia pevnosti. [9]
- **Thorium (Th)** síce zlepšuje zlievateľnosť, ale v poslednej dobe sa obmedzuje jeho používanie, pretože je rádioaktívne. [9]
- **Zirkónium (Zr)** je používaný v zliatinách so zinkom, vzácnymi zeminami, thoriom, a yttriom alebo ich kombinácii za zámerom zjemnenia zrna. Efektívne zjemňuje zrno iba rozpustené zirkónium. Vďaka dobrej viazanosti ku kyslíku sa zvyšuje pevnosť v ťahu bez straty kujnosti. [9,20]
- **Kremík (Si)** sa ako prísada používa len v niektorých zliatinách. Jeho hlavnou úlohou je zvýšiť tekutosť roztavených zliatin. V prítomnosti železa znižuje korozivzdornosť. [9]
- **Kovy vzácných zemín (RE)** zlepšujú vlastnosti za vyšších teplôt a zvyšujú creepovú odolnosť. Zvýšenie odolnosti voči tečeniu, odolnosť proti korózii a vysokoteplotná medza pevnosti sú hlavné dôvody používania RE v horčíkových zliatinách. Nevýhodou kovov vzácných zemín je vysoká cena, preto sa používajú v technicky vysoko vyspelých zliatinách. [9,20]
- **Vápnik (Ca)** je ako legujúci prvok pridávaný stále častejšie za účelom vývoja zliatin odolných voči cheepu. Zlepšuje válcovateľnosť plechov ale pri obsahu väčšom ako 0,3% znižuje zvariteľnosť. Taktiež pôsobí ako dezoxidant. Nevýhodou pridaním tohto legujúceho prvku je, že môže spôsobiť vznik trhlín za tepla. [9]

Škodlivé prímiesy:

- **Berylium (Be)** sa používa pre zníženie oxidácie v tavenine. Táto prímies je veľmi málo rozpustná. Do roztaveného kovu sa pridáva v malých množstvách. Môže spôsobiť nežiaduce zhrubnutie zrna, čím zhorší výsledné mechanické vlastnosti. [9]
- **Med' (Cu)** síce priaznivo ovplyvňuje pevnosť za vyšších teplôt, ale pri obsahu väčšom ako 0,05 hm. % zvyšuje náchylnosť ku korózii. [9]
- **Nikel (Ni)** znižuje odolnosť proti korózii už pri malých koncentráciách. [9]
- **Železo (Fe)** je v podstate rovnako škodlivá prímies ako nikel, pretože znižuje odolnosť proti korózii pri presiahnutí 0,005 hm. %. [9]
- **Cín** s malými prídavkami hliníku zlepšuje ťažnosť a znižuje náklonnosť k tvorbe trhlín pri kovaní [9]

2.2 Tvárne zliatiny

Horčíkové zliatiny majú prevažne hexagonálnu mriežku s najtesnejším usporiadaním, to znamená, že za normálnych teplôt majú nedostatok sklzových systémov, ktoré negatívne ovplyvňujú tvárnosť. Zvýšením teploty týchto zliatin nám umožní prevádzať procesy spracovania ako sú pretlačovanie, valcovanie a kovanie. Teplota pretlačovania sa v závislosti na chemickom zložení zliatin pohybuje v teplotnom intervale 300 až 480 °C. Valcovacie teploty sa pohybujú v nižšom intervale a to od 340 do 440 °C a pre dovalcovanie používame teploty okolo 225 až 250 °C. Najnižšiu teplotu tvárnenia používame pri kovaní a to v intervale 290 až 385°C. [9,12,14].

Podobne ako zlievarenské zliatiny sa tvárne zliatiny používajú na výrobu komponentov v leteckom a automobilovom priemysle. Štruktúrne sú si tieto zliatiny veľmi podobné, avšak oproti zlievarenským zliatinám majú špecifické mechanické vlastnosti. Ako polotovar pre tvárnenie sa používa horúci odliatok, ktorý je následne mechanicky spracovávaný, aby bola roztrúsená liata mikroštruktúra. [9,14]

2.3 Zlievarenské zliatiny

Nadpolovičnú väčšinu horčíkových zliatin tvoria zliatiny zlievarenské. Približne 70 % zliatin sa spracováva technológiou odlievania. Binárna sústava je základom týchto zliatin, je však obohatená o ďalšie prísady, ktorými môžu byť najmä zliatiny horčíka s pridaným hliníkom, mangánom eventuálne s lítiom alebo zinkom. Prísady zvyšujú odolnosť voči korózii, zlepšujú technologické alebo mechanické vlastnosti. Tavenina však musí byť chránená struskou alebo ochrannou atmosférou oxidu siričitého (SO₂), pretože pri odlievaní sa prejavuje vysoká horľavosť. Pevnosť zlievarenských zliatin horčíku sa pohybuje v rozmedzí 200 – 280 MPa. [9,12,13]

Z horčíkových zliatin sa väčšina odliatkov vyrába tlakovým liatím. Táto technológia zabezpečuje vysokú presnosť odliatkov, tvarovú rozmanitosť a možnosť odlievania tenkostenných dielov. [14]

3 SPRACOVANIE ZLIATIN NA ODLIEVANIE

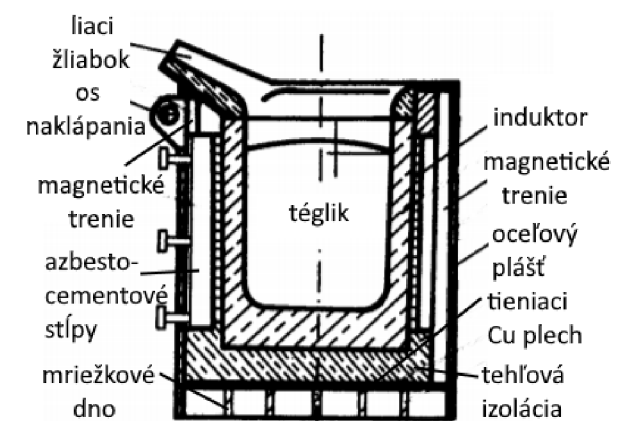
3.1 Tavenie

Tavenie zliatin horčíku sa zaraďuje medzi energeticky najnáročnejšie tavenie kovov. Na natavenie 1kg horčíka potrebujeme 1185 kJ zatiaľ čo pri natavení hliníka iba 1063 kJ. Tavenie horčíka sa najčastejšie vykonáva v indukčných peciach (obr. 9). Ich použitie je výhodné pre vákuové tavenie. Ďalej sa používajú elektrické odporové pece (obr. 10), ktoré sú najvýhodnejšie, pretože v nich dochádza k minimálnemu pohybu taveniny a taktiež v nich môžeme regulovať teplotu horčíka. Najmenej sa používajú plameňové pece, ktoré môžu byť plynové alebo na tekuté palivá.[1]

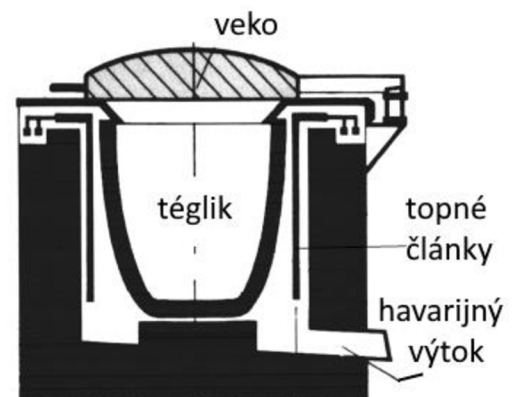
Princíp práce indukčných elektrických pecí spočíva v tom, že striedavý prúd vhodnej frekvencie je privádzaný do primárnej cievky - induktora, okolo ktorej sa vytvorí striedavé elektromagnetické pole. Sekundárnym vinutím je vlastne kovová vsádzka vložená do tohto elektro-magnetického poľa. Vo vsádzke sa indukujú striedavé prúdy, účinkom ktorých sa vsádzka ohrieva a taví. Nakoľko teplo vzniká priamo vo vsádzke, táto má najvyššiu teplotu v celom zariadení. Zdrojom prúdu sú generátory s rôznou frekvenciou.

V elektrickej odporovej peci je teplo vyvíjané priechodom prúdu cez vhodný vnútorný odpor, ktorým môže byť samotný náboj, odpor zabudovaný v náboji alebo odpor obklopujúci náboj. Väčšina odporových pecí je nepriameho typu. V peciach s nepriamym tepelným odporom sa elektrická energia premieňa na teplo, keď cez ohrievacie prvky prúdi prúd. Teplo sa prenáša na výrobky, ktoré sa majú zohriať, žiarením, prúdením alebo vedením. Odporová pec môže byť dobre utesnená, v takom prípade sa zahrievanie uskutočňuje vo vákuu, alebo môže obsahovať buď plyné médium, ktoré zabraňuje oxidácii, alebo špeciálnu atmosféru pre chemické tvrdenie puzdra, napríklad na karburizáciu alebo nitridáciu. [21]

Pri tavení horčíkových zliatin prichádzame na problém a tým je vysoká afinita ku kyslíku $2Mg + O_2 = 2MgO$. Horčíkové zliatiny môžu behom tavenia a odlievania vo formách horieť, preto je nutná ochrana taveniny pred vzdušným kyslíkom a pred vlhkosťou. Taveninu môžeme ochraňovať soľami na bázi $MgCl_2 \cdot KCl$ (karnalit), ktoré sa aplikujú na hladinu kovu v peci. Roztavený kov nám tiež môže ochrániť prášková síra – takzvaný práškový kvet. V peci a pri liati tiež používame na ochranu atmosféry s obsahom SF_6 (hexafluorid sírový) alebo CO_2 . [1,21,22]



obr. 9 Elektrická indukčná pec [22]



obr. 10 Elektrická odporová pec [21]

3.2 Technológie odlievania

Medzi výhody horčikových zliatin patrí odlievateľnosť, preto túto výhodu využívame na odlievanie rôznych súčastí. Podľa tvarovej zložitosti súčastí, veľkosti, množstve dielcov a výsledných mechanických vlastností využívame rôzne technológie odlievania. [23,24]

3.2.1 Tlakové liatie

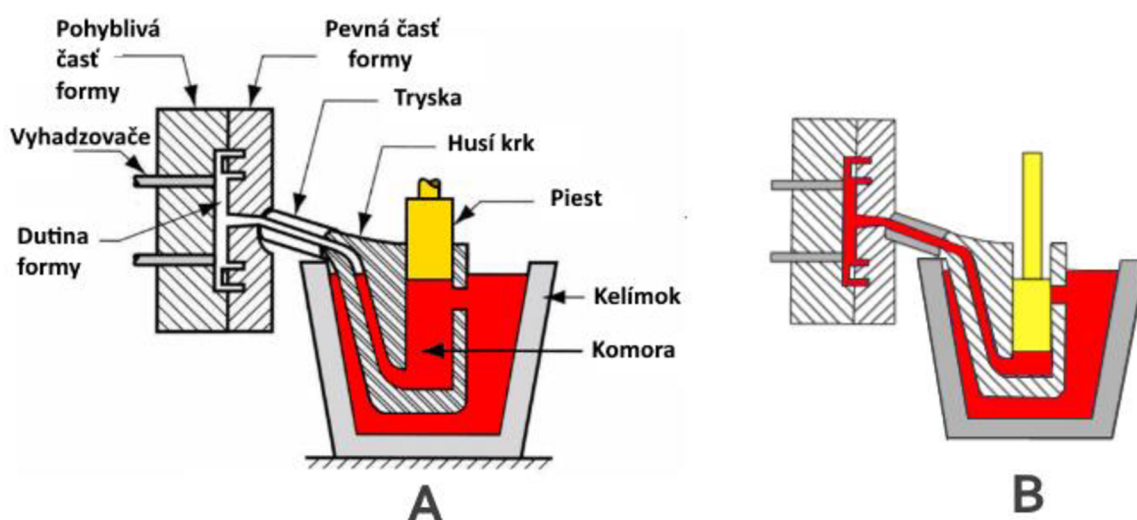
Najčastejšou technológiou odlievania horčika je tlakové liatie, ktoré spočíva vo vtlačaní tekutého kovu do kovových trvalých foriem pod vysokým tlakom – asi 200 MPa. [25]

Podľa konštrukcie môžeme rozdeliť tlakové stroje na dva základné typy: tlakové liatie s teplou a so studenou komorou.

Vzhľadom k horčikovej afinite ku kyslíku sa tlakové liatie so studenou komorou nepoužíva, pretože pri tejto metóde sa musí tlaková komora naplniť presne odmeraným objemom roztaveného kovu. Pri tomto procese nedokážeme ochrániť horčík pred atmosférou a začne nám oxidovať.

Na druhej strane odlievanie pod tlakom v teplej komore je vhodná metóda pre liatie horčíku, zinku a iných zliatin s nízkou teplotou tavenia. Výhodou horčika pri tejto metóde odlievania je, že nereagujú so železom a nerozpúšťajú tým taviace formy. Vďaka tomu, že sú vo forme vysoké prietokové rýchlosti až do ukončenia plnenia, táto metóda prináša mnoho výhod. Medzi najdôležitejšie patrí znížená pórovitosť, možnosť vyrábať tenkostenné súčastí so zložitými tvarmi, vysokou kvalitou povrchu, dobrou pevnosťou a s presnými rozmermi odliatkov. [1,6,24]

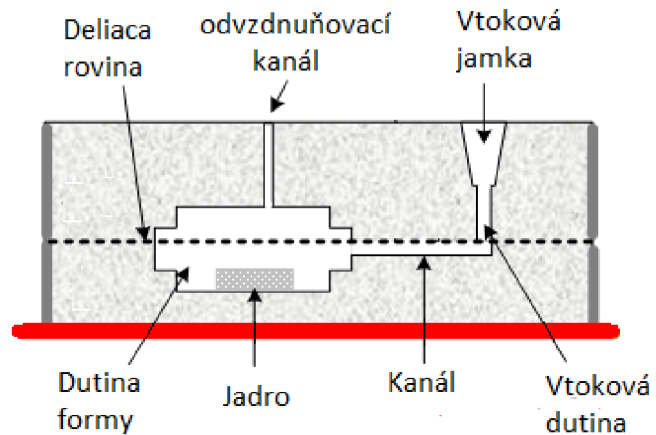
Vstrekovací mechanizmus stroja s horúcou komorou je ponorený do roztaveného kovu. Pec je k stroju pripevnená pomocou prírodného systému kovu, ktorý nazývame husí krk. Piest sa zdvíha a umožňuje, aby tavenina vyplnila priestor valca (obr. 11 – A). V tejto fáze je forma uzavretá. V druhej fáze piest klesá a tlačí taveninu husím krkom do dutiny formy (obr. 11 – B). Počas celého procesu liatia až do úplného stuhnutia sa piest udržiava pod tlakom. Forma sa otvorí. Piest sa zdvíha a zvyšky taveniny sa vracajú husím krkom späť do komory. Vyhadzovač vytlačí odliatok z formy. [21,25]



obr. 11 Schéma tlakového liatia s teplou komorou [26]

3.2.2 Liatie do pieskových foriem

Princíp technológie liatia do piesku (obr.13) pozostáva z umiestnenia modelu do piesku. Tento model odpovedá tvaru výsledného odliatku a je vyrobený z dreva, hliníkových zliatin a iných materiálov. Niektoré metódy výroby foriem využívajú odpariteľné modely, najčastejšie zo speneného polystyrénu. V piesku sa ručným zhutňovaním alebo strojovo vytvorí dutina požadovaného tvaru. Rovnakým postupom je zhotovená aj druhá polovica pieskovej formy, kde ale vytvoríme aj vtokovú jamku, vtokovú dutinu, kanál a odvzdušňovacie kanály.



obr. 12 Schéma odliavania do piesku [39]

Z formy opatrne vyberieme model a spojíme vrchnú a spodnú časť. [39]

Odlievanie začína naliatím roztaveného kovu do vtokovej jamky, ktorý cez vtokovú dutinu a kanál postupuje do dutiny formy. Vzduch vo vnútri dutiny a plyny, ktoré vznikajú pri styku roztaveného kovu s povrchom formy, sa odvádzajú cez odvzdušňovacie kanále (výfukové kanále). Po stuhnutí a ochladení kovu na požadovanú teplotu sa odliatok trepaním odstráni z formy. Po vytlačení odliatku je piesková forma zničená. [38,39]

Liatie do pieskových foriem sa používa na malosériovú a kusovú výrobu zvláštnych tvarov odliatkov. Na rozdiel od tlakového liatia, touto metódou môžeme odlievať odliatky väčších rozmerov a odliatky s hrubšími stenami. Výhodami gravitačného liatia sú nižšie náklady na formovacie materiály a vybavenie. Túto metódu používame na odlievanie širokej škály kovov a zliatin (železných a neželezných) s teplotou tavenia do 1800 °C. Na druhej strane odliatky majú hrubý povrch a štruktúru zrna, zľú rozmerovú presnosť, vysokú toleranciu obrábania a nemôžeme odlievať tenkostenné tvary [39].

Pri odlievaní horčíku do piesku musíme brať v úvahu jeho niekoľko špecifických vlastností, preto by sa mali dodržiavať tieto pravidlá:

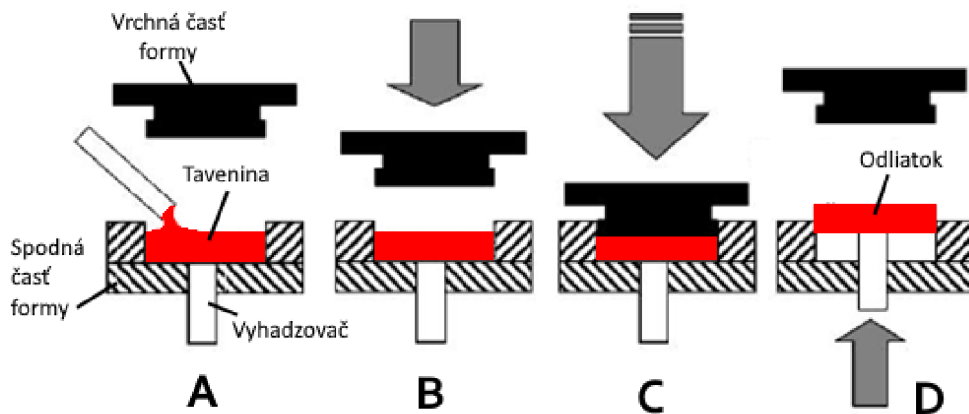
- Vlhkosť formovacích zmesí musí byť minimálna a do zmesí sa musia pridať rôzne prísady (prášková síra a kyselina boritá) spomaľujúce alebo zastavujúce reakcie horenia, aby sa zabránilo vzájomnému pôsobeniu taveniny s formou. Horenie by mohlo vzniknúť reakciou horčíka so zvyčajne používanými materiálmi zlievarenských foriem, reakciou horčíka s vodou a za vyšších teplôt aj reakciou horčíka s kremičitým pieskom.[1]
- Vtoková sústava musí byť navrhnutá tak, aby nedochádzalo k víreniu v tavenine, pretože na povrchu horčíku sa tvorí oxidačná vrstva, ktorá sa pri turbulenciách zamiešava do roztaveného kovu.[1]
- Vzhľadom k tomu, že horčík má nízku hustotu, pri odlievaní je jeho metalostatický tlak plnenia do pieskovej formy veľmi nízky. Z tohto dôvodu musia mať formy dobrú priepustnosť vzduchu a mať zaručený kvalitný odvod plynov, aby nedochádzalo k nezabehnutiu taveniny do užších miest a s tým spojená zmetkovitosť odliatkov. [1]

3.2.3 Squeeze casting

Squeeze casting je metóda, ktorá kombinuje výhody odlievacích a kovacích procesov na výrobu kvalitných odliatkov. Táto technológia sa v súčasnosti rozvíja hlavne v automobilovom priemysle a to najmä kvôli zlepšeniu mechanických vlastností jednotlivých častí výrobkov, rastúcim cenám a vysokej produkcii. [29]

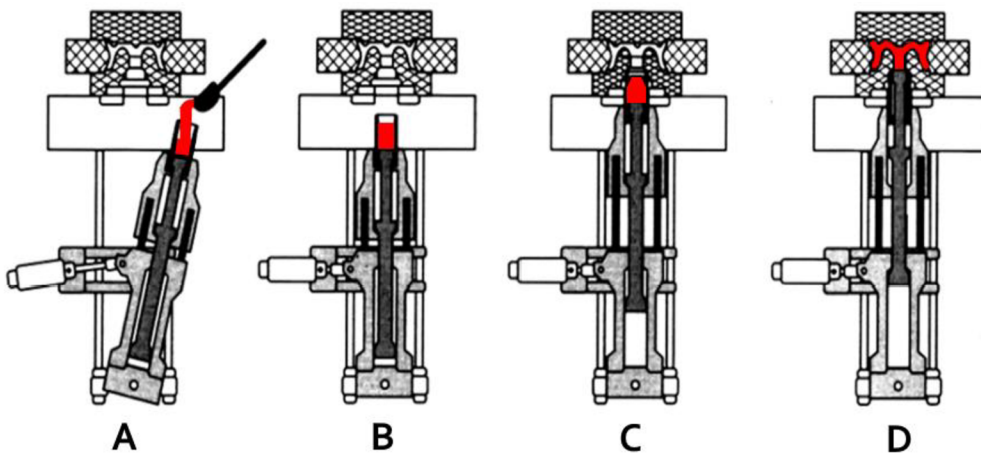
Podľa konštrukcie odlievacieho zariadenia rozlišujeme dva spôsoby squeeze castingu a to na priamy a nepriamy squeeze casting.

Priama metóda squeeze castingu spočíva v pomalom liatí presne odmeranej dávky taveniny do predhriatej spodnej časti (obr. 14 – A). Následne tlačí vrchná časť formy konštantným tlakom (obr. 14 – B). Tlak pôsobí počas celej doby tuhnutia (obr. 14 – C). Po stuhnutí odliatok vyberieme pomocou vyhadzovačov (obr. 14 – D). Túto metódu používame hlavne pre výrobu masívnych odliatkov.[21,28]



obr. 13 Výrobný proces priameho squeeze castingu [27]

Pri nepriamom squeeze castingu je kov dávkaný do komory lisu, ktorá je umiestnená pod vlastnou kovovou formou. Valec je obvykle výklopný (obr. 15 – A). Po naliatí kovu sa vráti do pracovnej polohy (obr. 15 – B) a potom sa kov veľmi pomalou rýchlosťou (radovo 0,5 m/s) vtlačuje do formy (obr. 15 – C). Rovnako ako pri priamej metóde tlak pôsobí počas celej doby tuhnutia (obr. 15 – D). Po stuhnutí je odliatok vytlačený vyhadzovačom.[21]

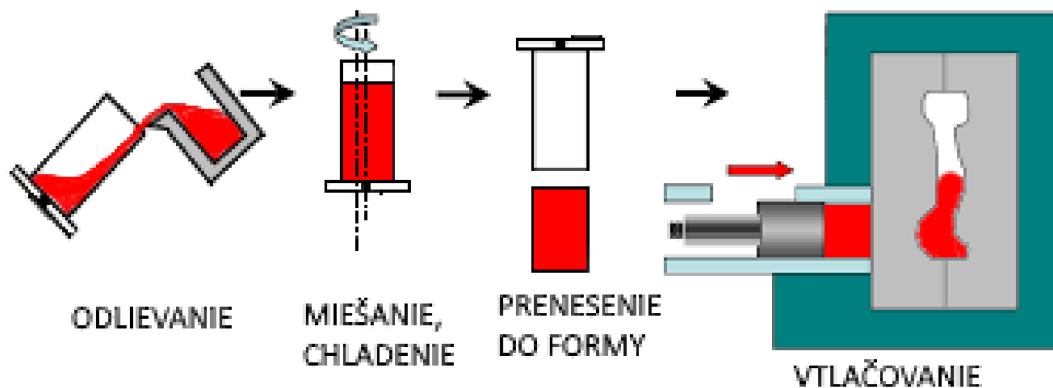


obr. 14 Výrobný proces nepriameho squeeze castingu [21]

3.2.4 Rheocasting

Rheocasting je technika odlievania čiastočne stuhnutej zliatiny, ktorá je však stále tekutá. Táto zliatina sa privádza opatrným ochladzovaním do stavu, kedy sa vo vsádzke nachádza tavenina aj tuhá fáza. Mechanickým miešaním vsádzky zabezpečíme rozbitie dendritov, čím sa vytvoria kompaktné takmer guľovité tvary tuhej fázy. [21,30]

Proces rheocastingu (obr. 16) prebieha naliatím roztavenej zliatiny do téglu, v ktorom prebieha riadené chladenie za stáleho indukčného alebo mechanického miešania. Po dosiahnutí požadovanej teploty obsah téglu vylejeme do odlievacej komory. Piest potom vtlačuje polotuhú zmes do dutiny formy a počas celej doby tuhnutia sa udržuje pod tlakom. [31]

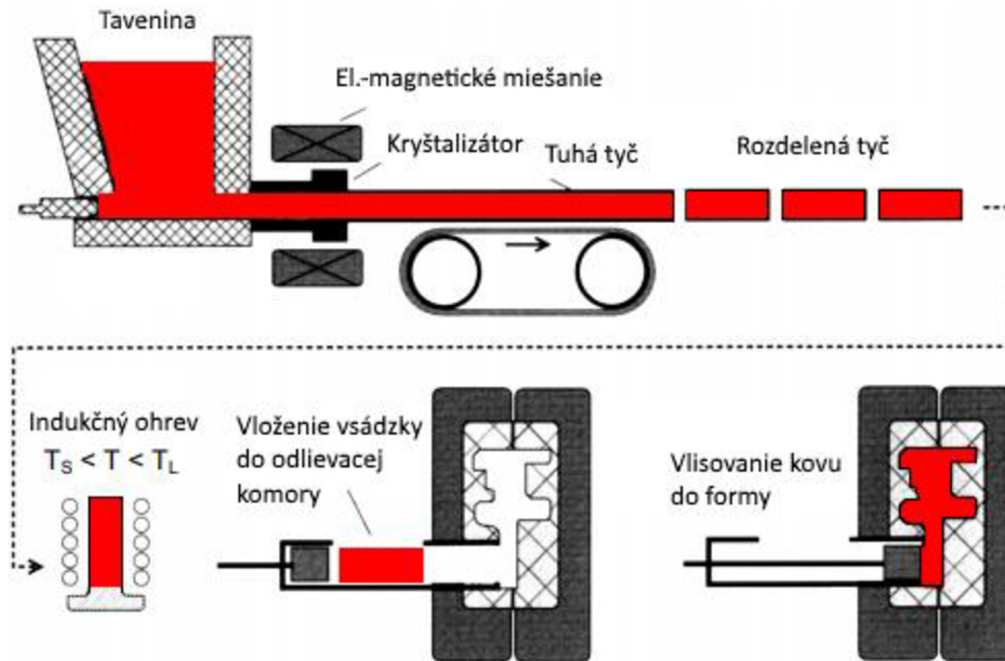


obr. 15 Schématické znázornenie procesu rheocasting [33]

Odliatky zhotovené procesom rheocasting dosahujú vysokú ťažnosť aj bez tepelného spracovania, avšak môžeme ich komplexne tepelne spracovávať pre dosiahnutie lepšej medze klzu a medze pevnosti. Vďaka nízkej plniacej rýchlosti a nízkej odlievacej teplote sa zvyšuje životnosť formy, dokonca až dvojnásobne. Ďalšou výhodou tohto procesu je pretavovanie zvyškového kovu, čím znížime náklady na recykláciu a využívame vsádzku takmer na 100%. Nutnou potrebou je špeciálne zariadenie, ktoré je schopné vytvoriť vhodnú globulárnu štruktúru, čo je nevýhoda pre tento proces. [30,31,32,37]

3.2.5 Thixocasting

Thixocasting (obr. 17) je podobná technika ako rheocasting. Pri tomto procese, na rozdiel od rheocastingu, musíme pred-pripraviť tyče, ktoré následne narežeme na predom vypočítaný objem odliatku. Potom sa tieto časti jednosmerným prúdom znovu zahrievajú na teplotu polotuhého liatia. Vsádzku vylejeme do odlievacej komory a pomocou piestu vlisujeme kov do dutiny formy. [30,31]

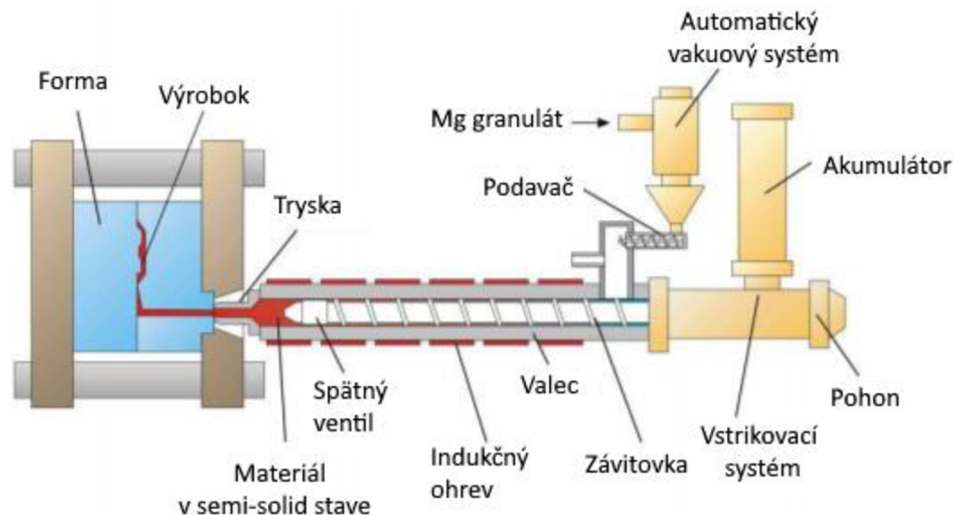


obr. 16 Výrobný postup pri metóde Thixocasting [31]

Medzi najvýznamnejšie výhody Thixocastingu patria zdokonalené mechanické vlastnosti odliatku a dobrá akosť povrchu. Zložitú geometriu dosahujeme v jednom tváriacom kroku, čím zvyšujeme produktivitu. Kovové formy sú menej namáhané vďaka nižšej odlievacej teplote. Ďalšou výhodou thixocastingu je, že celý proces môžeme automatizovať. Nevýhodou je recyklácia odpadového materiálu, ktorý vzniká pri výrobe chybných odliatkov a pri prídavnom materiáli na vtokových sústavách. Zároveň sa zvyšujú náklady, kvôli rozdeleniu výroby a s tým spojené opakované ohrievanie materiálu. [32]

3.2.6 Thixomolding

Táto technológia sa používa najmä na výrobu súčastí z horčikových zliatin. Pred samotným procesom je nutné pripraviť materiál, ktorý môže byť dodávaný vo forme odpadných kusov alebo triesok. Vstupný materiál rozmelieme na veľmi malé kusy. Proces thixomoldingu (obr. 18) spočíva v nasypaní triesok alebo granúl horčiku do nádoby, z ktorej cez podávač putuje do valca. Vo valci je závitovka, ktorá polotovar mieša a homogenizuje. Počas celej doby je materiál vo valci indukčne ohrievaný. Posledným krokom je vstreknutie pripraveného materiálu do dutiny formy. [34,35]



obr. 17 Schéma Thixomoldingu [35]

Spracovanie horčikových zliatin touto technológiou má veľa výhod. Medzi najpodstatnejšie patrí najmä vysoká povrchová akosť, rozmerová presnosť a minimálna pórovitosť výrobku. Taktiež je táto metóda ekonomickejšia. Vďaka nižšej spotrebe energie a tepelného namáhania formy sa znižujú náklady na výrobu. [35,36]

3.3 Obrábanie a povrchové úpravy

Obrábanie odliatkov z horčikových zliatin prináša mnoho obmedzení, preto musíme dodržiavať prísne bezpečnostné predpisy. Ako je spomenuté v predošlých kapitolách, zápalná teplota horčika je nižšia ako teplota tavenia (450 °C), preto je veľmi dôležitá voľba reznej rýchlosti, aby nedošlo k lokálnemu prehriatiu materiálu a prípadnému horeniu. S rezaním je spojená aj vhodná voľba reznej kvapaliny, ktorá nesmie byť na vodnej báze, vzhľadom k reaktivite horčika. Špeciálne bezpečnostné predpisy sa vzťahujú aj na nakladanie s odpadmi, ako sú triesky po obrábaní a prach. Všetky činnosti ako sú manipulácia, skladovanie a likvidácia horčikových zliatin popisuje norma a musia byť presne definované v interných bezpečnostných predpisoch podniku. [1]

Reaktivita horčikových tavenín s kyslíkom a vodou nie je jediný problém horčikových zliatin. Napriek tomu, že horčík je veľmi podobný hliníku, má závažné rozdielne vlastnosti, hlavne čo sa týka odolnosti voči korózii. Vytvorenie pasívnej oxidickej vrstvy na povrchu dodáva odolnosť voči korózii iba hliníku, pri horčíku vzniká problém z dôvodu nesúdržnosti povrchovej vrstvy. Na povrchu sa totiž v skutočnosti tvorí trojitá pasivačná vrstva, ktorá sa skladá zo spodnej hydratovanej vrstvy, prostrednej hustej, tenkej vrstvy a povrchovej vrstvy, ktorá je silno porézna. V povrchovej vrstve vzniká silné pnutie

(nezhoda hexagonálnej mriežky horčíku a geometrického usporiadania hydroxidu horečnatého), kvôli ktorému praská najmä prostredná pasivačná vrstva. Prasklinami potom prenikajú nečistoty, voda a vzdušný kyslík hlbšie do odliatku kde vzniká korózia. Z tohto dôvodu majú nechránené horčíkové odliatky zo zliatin, ktoré nemajú zvýšenú korozivzdornosť, veľmi krátku životnosť, často v týždňoch alebo dňoch. [1]

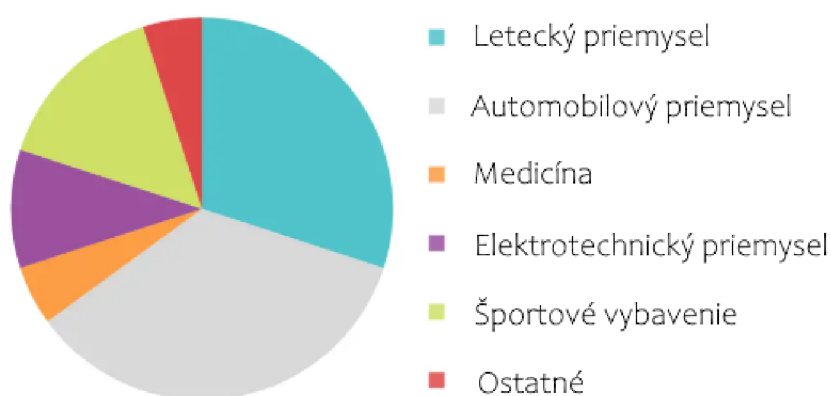
Zvršok horčíkových odliatkov preto musíme ošetriť vhodnou povrchovou úpravou, najčastejšie konverznými povlakmi. Po očistení, odmastení a aktivovaní povrchu sú horčíkové odliatky umiestnené do aktívnej chemického kúpeľa – kyseliny chromitej, kyseliny fluorovodíkovej, nitrátu kyseliny chromitej, kyseliny sírovej alebo dusičnej. K chemickej reakcii medzi horčíkom a daným kúpeľom dochádza bez pôsobenia vonkajších zdrojov energie. Kúpele aplikujeme klasickým ponorením, natieraním alebo sprayovaním. Pri chemickej reakcii vznikne povrchová vrstva hrúbky 1-5 μ m. Po aktivácii je nutný dôkladný oplach povrchu. Po oplachu je aplikovaný chemický kúpeľ – chromátovanie, na vytvorenie chromátového povlaku. [1]

4 POUŽITIE HORČÍKOVÝCH ODLIATKOV

Zliatiny horčíka sa používajú v rôznych aplikáciách po celom svete. Sú preferovaným materiálom pri hľadaní zníženia hmotnosti bez toho, aby bola ohrozená celková pevnosť. Tlmiaca kapacita vibrácií je prospešná aj v aplikáciách, pri ktorých sa musia znížiť vnútorné sily vysokorýchlostných komponentov. Tieto zliatiny sa tiež používajú ako náhrada za niektoré technické plasty kvôli ich vyššej tuhosti, vysokej recyklačnej schopnosti a nižším výrobným nákladom. [40]

Na obr. 19 je koláčový graf znázorňujúci trh použitia zliatin horčíku v percentách podľa priemyselného zámeru za rok 2019.

Využitie zliatin horčíku pre rok 2019



obr. 18 Využitie zliatin horčíku pre rok 2019 [40]

4.1 Automobilový priemysel

Využitie horčíku a jeho zliatin najviac rastie v sektore automobilového priemyslu, vďaka kombinácii dvoch významných vlastností – vysokej pevnosti a nízkej hustoty. V automobilových aplikáciách redukcia hmotnosti zlepši výkon vozidla znížením valivého odporu a energia sa používa pri zrýchľovaní, čím sa zníži spotreba paliva a emisií, aby automobilky splňovali čoraz prísnejšie emisné normy. Našťastie, veľa dielov môže byť vyrobených z horčíkových zliatin. Ako je znázornené na obr. 20, horčíkové zliatiny sa používajú takmer všade vo vozidle vrátane hnacej jednotky, karosérie a krytov palivových nádrží, podvozku a iných. Veľa komponentov sa nachádza v interiéri, pretože tu súčiastky nekorodujú. Sú to napríklad volant, rámy sedadiel, konzoly stĺpikov riadenia, ale aj skrinách airbagov vodiča. Medzi najbežnejšie aplikácie horčíka patria motorové bloky, prevodovky a spojkové skrine, olejové vane, kolesá a držiaky motorov, kde je možné rozdeliť napätie a tým sa vyhnúť vysokému zaťaženiu. V týchto aplikáciách horčík poskytuje zníženie hmotnosti o 40 - 50 % a o 15 - 33 % v porovnaní s oceľou a hliníkom, preto mnoho veľkých automobilových spoločností nahradilo oceľ a hliník horčíkom v rôznych častiach svojich výrobkov. [41, 42]

Zníženie hmotnosti v automobilových aplikáciách nie je jediným dôvodom použitia horčíku. Aplikovanie na prednej časti vozidla poskytuje vozidlu nielen nižšiu celkovú hmotnosť, ale umožňuje aj posunutie ťažiska smerom dozadu, čím sa zlepši jeho ovládateľnosť a schopnosť otáčania. Oceľové komponenty vo vozidlách môžu byť nahradené jediným odliatkom horčíka, ktorý zvyšuje pevnosť materiálu. Vďaka dobrej odlievateľnosti výroba dielov vyžaduje menej nástrojov a presné odliatky nemusíme obrábať, čo znižuje výrobné náklady. [41]

Odhaduje sa, že do roku 2020 nahradí 500 kilogramov horčíka 500 kilogramov ocele a 130 libier hliníka na vozidlo, čo predstavuje celkové zníženie hmotnosti o 15%. Táto úspora hmotnosti by následne viedla k úspore paliva od 9 % do 12 %. Vzhľadom na veľký počet vozidiel vyrobených na celom svete by tieto úspory hmotnosti mohli viesť k výraznému poklesu oxidu uhličitého uvoľňovaného do atmosféry, čím by sa znížil jeho škodlivý vplyv na globálne otepľovanie. Z tohto dôvodu je horčík známy ako zelený kov 21. storočia. [41]



obr. 19 Využitie horčíkových zliatin v automobiloch [42]

4.2 Letecký a kozmický priemysel

Automobily, dodávky a nákladné autá nie sú jedinými vozidlami, ktoré do svojich konštrukcií zabudovali horčík. Letecký priemysel má dlhú históriu používania kovu v mnohých aplikáciách civilných aj vojenských. Ak chceme dosiahnuť zníženie emisií a vyššiu palivovú účinnosť, je nevyhnutné znížiť hmotnosť vzdušných a kozmických lodí, ako aj projektívov. Tieto zmeny budú mať za následok aj nižšie prevádzkové náklady. Horčík je ideálnym materiálom na použitie v týchto aplikáciách, a to z dôvodu obmedzeného pokračujúceho zlepšovania redukcie hmotnosti hliníka, vysokých nákladov na lamináty z kovových vlákien a zlých vlastností nárazov a poškodení plastov s nízkou hustotou pri vystavení extrémnym teplotám. Horčík sa nachádza v spätných klapkách Boeingu, ako aj v skrinkách prevodoviek pre motory a lietadlá a vrtuľníky. [17,41]

Kozmické lode a rakety tiež obsahujú aj horčík a jeho zliatiny. Pri konštrukcii rakiet je kľúčovým faktorom voľba vhodného materiálu, ktorý znesie extrémne podmienky pri štartovaní, ale aj tie, ktorým čelia počas prevádzky. Horčík je schopný odolať extrémne zvýšeným teplotám, vystaveniu ozónu a pôsobeniu vysoko-energetických častíc a látok. Používa sa tiež vo veľkom množstve v medzikontinentálnych balistických raketách. [41]



obr. 20 Využitie horčíkových zliatin v lietadlách [42]

4.3 Elektrotechnický priemysel

Spotrebná elektronika je ďalšou oblasťou, v ktorej horčík a jeho zliatiny zohrávajú významnú úlohu. Každý chce ľahšie a tenšie notebooky, fotoaparáty a mobilné telefóny, ktoré sú dostatočne odolné, aby vydržali každodenné používanie. Najdôležitejší potenciál má na všetkých druhoch ručných elektronických zariadení, od reproduktorov, cez puzdrá prenosných multimediálnych zariadení, fotoaparáty až po smartfóny. Zliatiny Mg majú vynikajúcu schopnosť tlmiť elektromagnetické a vysokofrekvenčné rušenie, preto sa často používajú v krytoch pre mobilné telefóny. Na modernom trhu rastie malá a prenosná elektronika. Dopyt po kompaktných zariadeniach, ktoré sa dajú ľahko prepravovať, je úspešný a horčík je často kľúčovým prvkom pri uspokojovaní tohto dopytu. Mnoho zliatin horčíka, ktoré sa používajú ako náhrada plastov, sú rovnako ľahké, ale sú oveľa pevnejšie a odolnejšie, majú taktiež 100-krát lepší rozptyl tepla. Ďalším dôvodom, prečo horčíkové zliatiny nahrádzajú plasty je ten, že sa môže pretaviť, znovu použiť a recyklovať. [41,43]

Vďaka schopnosti horčíka chrániť vnútornú technológiu pred elektromagnetickým rušením a vysokofrekvenčným rušením (EMI / RFI) sa z neho robí ideálny ľahký kov pre elektroniku v domácnosti. Kuchynský robot (mixér) sa už dlho považuje za priemyselný štandard v kuchyni. Šéfkuchári, kuchári a pekári používajú túto pomôcku na mixovanie a miešanie svojich obľúbených receptov. Ako materiál pre skrinku prevodového stojanu bol zvolený horčík, pretože puzdro vyrobené horčíka odoláva vyšším teplotám a môže byť formované bez akýchkoľvek sekundárnych operácií, bez obrábania úložných vreciek a vodiacich kolíkov. Dizajnéri mixéru tiež uvádzajú horčík ako veľmi stabilný materiál. Hlavnou výhodou vysokovýkonného stojanového mixéra je to, že puzdro vyrobené z horčíka môže byť vystavené vyššiemu zaťaženiu a teplotám ako predtým používaný termostatový plast. [41,43]



obr. 21 Elektrotechnické zariadenia [41]

4.4 Medicína

Implantáty na báze horčička sú použiteľné pri rôznych indikáciách pri ortopedických a traumatických chirurgických výkonoch. Môžu sa používať v prípadoch zlomenín a iných zväzkov malých kostí a malých kĺbov, vrátane skalnatých zlomenín, avulzových zlomenín, stredných a bočných malleolárnych zlomenín, intraartikulárnych zlomenín tarzálav, metatarzov, karpálov a metakarpálov, bunionektómie a osteotómia okolo chodidla a členku, artrodéza malých kĺbov, zlomeniny patelly, zlomeniny hrudnej kosti a hlavy, zlomeniny hlavy a hlboké kĺbové zlomeniny distálneho humeru. Sú tiež vhodné na použitie v kostiach lakťa, bedra, ruky, ramena, kolena, členka a chodidla. [44]

Tým, že horčička je biologicky kompatibilný aj biologicky odbúrateľný, kovový implantát sa v kosti úplne rozpustí, keď sa kosť vylieči, takže rýchlosť jej absorpcie kolíše. Tým pádom druhá operácia na odstránenie implantátov nie je potrebná. Vďaka novým zisteniam môžu byť zliatiny horčička a ich degradačné správanie teraz navrhnuté podľa potreby. Napríklad rýchlosť rozpadu stentov na rozšírenie zúžených krvných ciev by mala byť oveľa pomalšia ako v prípade skrutiek, ktoré sa vrtajú do kostí. Dôležitú úlohu zohráva aj vek pacienta: telo detí štípi implantáty horčička podstatne rýchlejšie ako telo dospelého človeka. Mechanické vlastnosti horčička sú podobné vlastnostiam ľudskej kosti, čo z neho robí vhodný materiál pre tieto stabilné, ale re-absorbovateľné implantáty. [44]

Široké využitie absorbovateľného horčička znižuje zbytočné zásahy a práceneschopnosť a súčasne zvyšuje kvalitu liečby. Chirurgovia, ktorí používajú tento produkt, šetria zdroje a čas a zároveň pomáhajú svojim pacientom dosahovať maximálne regeneračné výsledky. Aplikácia ochranných náterov môže zabrániť problémom s koróziou v situáciách, keď je potrebné trvalejšie riešenie. V súčasnosti prebieha výskum a testovanie rôznych zliatin a receptúr pre ochranné povrchové úpravy s cieľom rozšíriť škálu spôsobov, akými sa horčička môže používať v lekárskejších aplikáciách.[41,44]



obr. 22 Implantáty z horčička [41]

4.5 Športové vybavenie

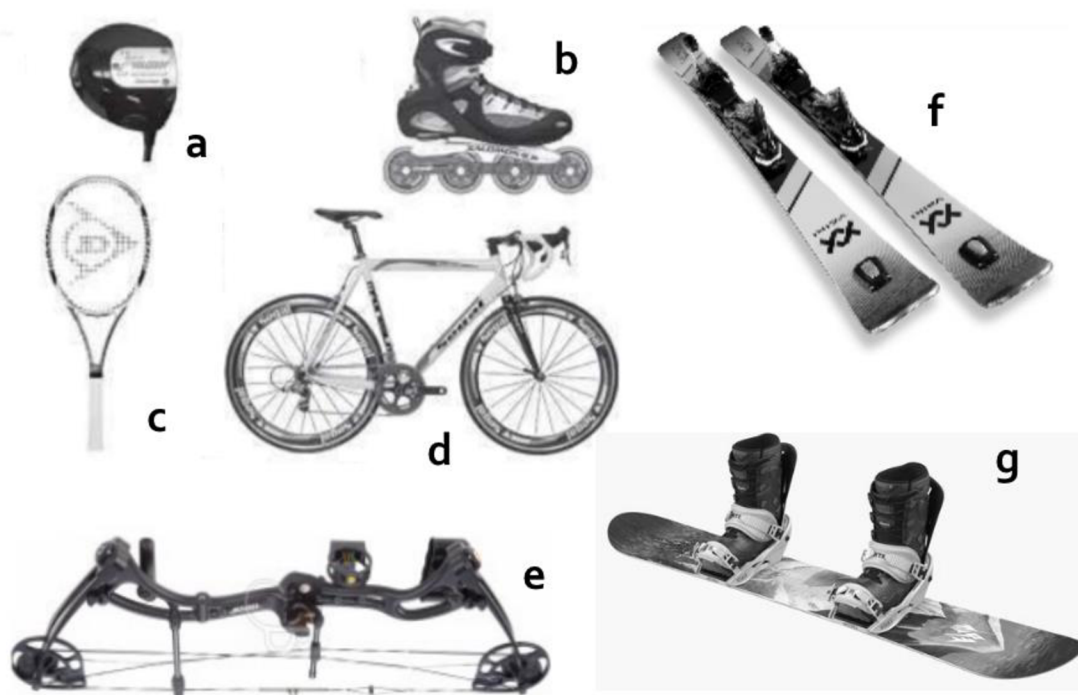
Použitie horčíku sa neobmedzuje iba na priemysel. Vytvára tiež veľa dobrých ohlasov v odvetví športu. Dosahuje vysoký výkon na úplne novú úroveň. Nielen, že je horčík ľahký, odolný a silnejší ako hliník, ale absorbuje aj 16 - krát viac nárazov a vibrácií, čo z neho robí ideálny kov, ktorý prináša konkurenčným športovcom výhody.[41]

Mnoho výrobcov motocyklov a horských bicyklov začleňuje horčík do svojich prémiových dizajnov už roky, zatiaľ čo nové inovácie používané v odvetviach športu priťahujú ďalšiu pozornosť. [18]

Lyžiari, snowboardisti a dokonca aj korčuliari teraz nájdu časť svojho vybavenia z horčíka, pretože poskytuje oveľa lepšiu stabilitu pri vyšších rýchlostiach, čo umožňuje plynulejšiu a pohodlnejšiu jazdu. [18]

Horčík má tiež schopnosť formovať sa do zložitých tvarov, čo je ideálne pre použitie v golfovom vybavení, tenisových raketách a rukovätiach lukostrelby. Golfové palice vyrábané z horčíkových zliatin sú ľahšie a majú lepšie rozloženie hmotnosti, čo umožňuje golfistom dlhšie a výkonnejšie odpaly.[41]

Na obr. 24 sú uvedené niektoré športové vybavenia vyrobené zo zliatin horčíku.



obr. 23 Športové pomôcky zo zliatin horčíku: (a) hlava golfovej palice, (b) kolieskové korčule, (c) tenisová raketa, (d) rám z bicykla, (e) luk, (f) lyže, (g) snowboard [41]

4.6 Ostatné

Horčík sa používa pri návrhu optických a ručných nástrojov. Ľudia, ktorí nosia okuliare si často želajú esteticky príjemný rám, ktorý nepociťuje pri každodennom nosení, ale je dostatočne odolný na to, aby sa s ním dalo plno fungovať počas celého dňa. Puškohľady a ďalekohľady musia byť stabilné, efektívne a ľahké – všetky tieto konštrukčné kritéria spĺňajú horčíkové zliatiny. [41]

Ručné pracovné nástroje a zariadenia, ako sú reťazové píly, ručné nožnice, ručné vrtáčky, pneumatické klince a buriny, sú dokonalými kandidátmi na použitie horčíkových dielov. Pri tvorbe ručných nástrojov, ako sú tieto, sú všetky žiaduce vlastnosti nízka hustota, porovnávacia sila a tlmenie vibrácií. Komponenty vyrobené z horčíkových zliatin vždy zohrávali dôležitú úlohu v mnohých reťazových pilách STIHL a elektrických nástrojoch. Spoločnosť otvorila továreň, ktorá každý rok vyrobí približne 26 miliónov dielov, vrátane komponentov pre výroby STIHL, ako sú čistiace píly, univerzálne motory pre dúchadlá a kryty reťazových píl pre reťazové píly.[43]

Horčík si našiel využitie aj v malých domácich spotrebičoch, ako sú napríklad vysávače. Použitím tohto materiálu na výrobu vákuovej hlavy prináša výhody. Vysávač bude dostatočne ľahký na to, aby sa bezproblémovo pohyboval a aby bol pri normálnom používaní a pri kontakte s nábytkom a inými prekážkami dostatočne odolný voči nárazom do iných predmetov.[41]

5 RECYKLÁCIA A DOPAD NA ŽIVOTNÉ PROSTREDIE

Horčík a jeho zliatiny sú plne recyklovateľné. Pre pomerne veľkú zmetkovitosť odliatkov (50 – 70 %) spôsobenú tým, že Mg nemá ideálne zlievarenské vlastnosti, je recyklácia veľmi dôležitým faktorom pre ekonomiku aj ekológiu výroby. Ako už bolo spomenuté výroba horčíku z rúd je energeticky veľmi náročná, v porovnaní s pretavovaním (recykláciou), kde sa spotrebováva iba 5% energie potrebnej pre výrobu primárneho kovu. [1,10]

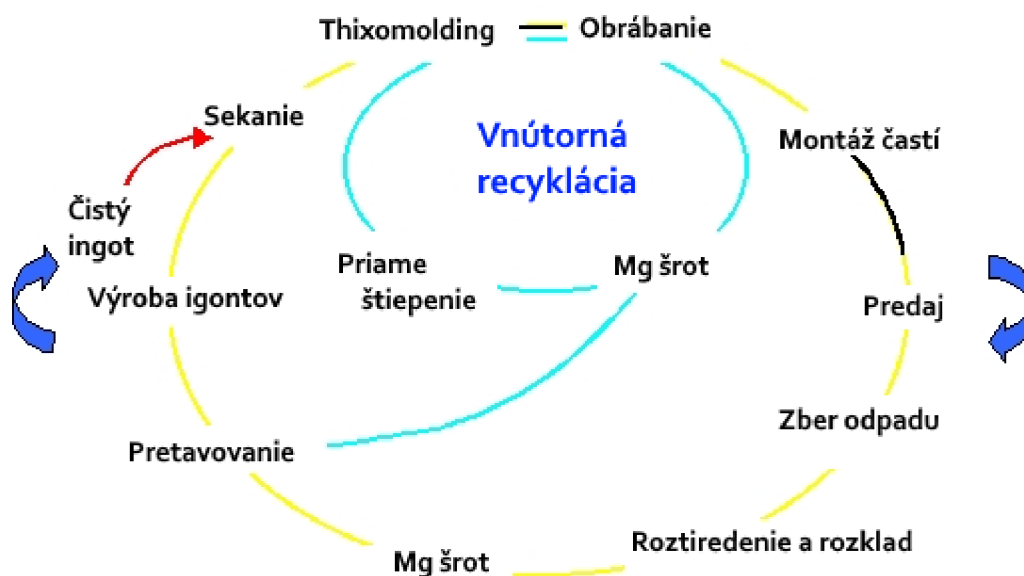
Chemické a fyzikálne zloženie je hlavným kritériom, ktoré ovplyvňuje, či budú alebo nebudú súčasti recyklované. Pred recykláciou bývajú súčasti drvené, triedené, briketované a sú z nich odstraňované rôzne náterové hmoty. [1]

V súčasnej dobe je možno jednoducho recyklovať iba horčíkový odpad bez nečistôt. Čím je vyšší obsah nečistôt v horčíkovom odpade, tým vyžaduje recyklácia vyššiu energetickú náročnosť a s tým spojené aj vyššie náklady pre dosiahnutie čistoty. Prvým spôsobom odstraňovania povlakov je termálne spracovanie. Najdôkladnejšie odstraňuje organické povlaky pred tavením horčíku za minimálne náklady, preto je táto metóda najpoužívanejšia. Druhým spôsobom je použitie rozpúšťadiel, ktoré sú viac škodlivé k životnému prostrediu a cenovo menej výhodné ako termálne spracovanie. [1,10]

Povrchové úpravy, ktoré sa používajú na dekoratívne modifikácie horčíkových odliatkov, súčasne chránia pred koróziou. Zo širokej škály volíme vhodné mechanické a chemické úpravy povrchu, tak aby sme dosiahli požadovaný konečný stav výrobku. Práve z týchto dôvodov je recyklácia horčíku a jeho zliatin veľmi obtiažna. Povrchové úpravy môžeme odstraňovať tromi spôsobmi a to: rotačnými pecami, pásovým odstraňovaním a fluidne. [1]

Obsah zvyškovej vlhkosti je rizikovým faktorom pri tavení horčíkového odpadu, preto je nutné túto vlhkosť aspoň čiastočne odstrániť. Organické látky v horčíkovom odpade nesmú presahovať 10 % objemu. Až 5 % hmotnosti povlakovaných dielov tvorí tenká vrstva farby a laku na povrchu horčíkových odliatkov. [1]

Najefektívnejší spôsob ako odstrániť farby a oleje z horčíkových zliatin a čipov je skrz samozápalné vlastnosti týchto zliatin. Teplota rozkladu je závislá na zložení organických zlúčenín, bodu tavenia zliatiny a samozrejme záleží aj na atmosfére. Pre odstránenie organických zlúčenín sa používajú teploty 200 – 400 °C. [1]



obr. 24 Recyklácia horčíku [36]

6 SÚČASNOSŤ A PERSPEKTÍVA HORČÍKOVÝCH ZLIATIN

Horčík nazývame kovom budúcnosti. Celosvetová spotreba horčíka vzrastie v nasledujúcom desaťročí o viac ako 5 %, ale so značnými regionálnymi rozdielmi v tempe rastu. [45]

Environmentálne faktory budú hrať hlavnú úlohu pri ovplyvňovaní budúceho dopytu a ponuky horčíka. Prebiehajúci a posilňujúci podnet na zníženie úrovne znečistenia sa bude naďalej veľmi zameriavať na automobilový priemysel, ktorý je hlavným trhom zliatin horčíka a zliatin hliníka obsahujúcich horčík. Snahou o zníženie hmotnosti vozidla, a teda aj emisií, bude dopyt po týchto zliatinách narastať. Napríklad v Číne sa plánuje zvýšenie obsahu horčíka v automobiloch z 8,6 kg / auto v roku 2017 na 45 kg do roku 2030.[45]

Zároveň je veľmi pravdepodobné, že dôjde k významnej zmene spôsobu výroby horčíka. Až do začiatku 90. rokov 20. storočia dominovali globálne dodávky elektrolytické procesy. Rýchly rast výroby v Číne vyústil do tepelných procesov, najmä Pidgeonovho procesu, ktorý získal významný podiel na trhu. V súčasnosti je pravdepodobne viac ako 80% celosvetovej ponuky prostredníctvom procesu Pidgeon, ktorý predstavuje väčšinu čínskej výroby; elektrolytické procesy zostávajú v iných krajinách normou. Aj keď je Pidgeonov proces relatívne lacný, má svoje nevýhody, medzi ktoré patrí podstatne znečisťujúcejší spôsob ako alternatívne trasy.[45]

Spoločnosť LMG uvedená na zozname ASX oznámila, že po uspokojujivých výsledkoch štúdie uskutočniteľnosti dokončenej v roku 2019 má pokračovať vo výstavbe závodu na výrobu horčíka v Austrálii. Projekt LMG sa nachádza v údolí Latrobe, ktoré je hlavným centrom výroby energie na báze hnedého uhlia. Spoločnosť LMG použije patentovaný hydromet / tepelný proces na výrobu horčíka a vedľajších produktov z popolčeka. Tento proces je relatívne šetrný k životnému prostrediu a vytvoril by celkom 12 t CO₂ na tonu Mg.[45]

AMI informovala, že v roku 2020 začne s výstavbou závodu v kanadskom Québéku s úplnou výrobou od roku 2021. Závod bude spracovávať hlušiny z opustených operácií ťažby azbestu v Quebecu. Využíva patentovaný elektrolytický proces a hydro-elektrickú energiu, vďaka čomu je relatívne čistý.[45]

Spoločne by tieto dva projekty mohli prispieť takmer 10 % na svetový trh, čo nie je obrovské, ale mohlo by to znamenať začiatok prechodu od tradičných procesov k „zelenšiemu“ horčíku.[45]

ZÁVER

Horčík patrí prakticky k najľahším kovom, ktoré možno použiť na výrobu konštrukčných dielov. Na rozdiel od iných kovov sa dá odlievať do extrémne tenkostenných a tvarovo komplexných súčiastok, ktoré sú často ľahšie, ako keby boli vyrobené z plastu. Hoci oproti plastovým súčiastkam majú takmer desaťkrát vyššiu tuhosť.

Výrobní inžinieri majú zvyčajne za úlohu znižovať výrobné náklady, aby sa zvýšila ziskovosť, takže časti vyrobené z materiálov s vyššou cenou, ako je horčík, môžu inžinierovi predstavovať príležitosť na zníženie nákladov. Lacné dodanie horčíka a zlepšené zliatiny horčíka by mohli viesť k dlhodobému použitiu mnohých ďalších horčíkových automobilových súčiastok. Kým sa tak nestane, je potrebné zvážiť nákladové faktory horčíka okrem obmedzení týkajúcich sa vlastností a výrobných obmedzení.

Úsilie v oblasti výskumu a vývoja horčíka nebolo také rozsiahle ako výskum a vývoj zliatin hliníka a ocele, takže horčík má obmedzenú množinu využitia v porovnaní s hliníkom a oceľou. Napriek tomu použitie horčíkových zliatin prináša ďalšie výhody, aplikácie horčíka sú naďalej rozvíjajúce sa spôsoby, akými sa môžu a budú ďalej používať, sú početné. Dopyt po trvalo udržateľných, ľahkých a recyklovateľných materiáloch sa neustále zvyšuje s tlakom na výroby šetrné k životnému prostrediu.

Na druhej strane neustále prísňujúce sa environmentálne predpisy sťažujú podmienky výrobcov horčíkových komponentov. Všetky fázy spracovania zliatin horčíku sú energeticky náročné a je používané veľké množstvo skleníkových plynov, nebezpečných a toxických látok, preto sú producenti nútení používať ekologickejšie procesy a prostriedky výroby týchto odliatkov. Výskum a vývoj výroby odliatkov z horčíkových zliatin za účelom zníženia dopadov na životné prostredie s minimálnymi nákladmi zatiaľ zaostáva, a to sú dôvody, prečo sa často rozhoduje pri voľbe medzi horčíkom a inými konštrukčnými materiálmi.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

1. Sborník přednášek z 8. HOLEČKOVY KONFERENCE. In: *Metalurgie a technologie slitin neželezných kovů*. Praha: Česká slévárenská společnost, 2019, s. 21-34. ISBN 978-80-02-02857-4.
2. Magnesium, *Magnesium square* [online]. Netherlands, 2009 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://www.magnesiumsquare.com/>
3. Wikiskripta. *Hořčík* [online]. 2016 [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/w/Ho%C5%99%C4%8D%C3%ADk>
4. Slévárenská ročenka. *Slitiny hliníku a hořčíku na odlitky* Brno: česká slévárenská společnost, člen ČSVTS, c2017. ISBN 978-80-02-02747-8. ISSN 0231-7087.
5. KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2005. ISBN 978-80-7080-568-8.
6. Drozd Zděnek, Hořčík – materiál budoucnosti [Internet]. [Praha]; 2009 [cit. 2020-06-10] Dostupné z: http://kdf.mff.cuni.cz/~koudelkova/U3V/Drozd_horcik.pdf
7. MatNet. *Hořčíkové zliatiny - vlastnosti* [online]. Slovakia: Výskumovo- vývojová a inovačná sieť pre oblasť mteriálov a technológií, c2006 [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/data/files/742.pdf>
8. MatNet. *Zlievarenské Al zliatiny – vlastnosti* [online]. Slovakia: Výskumovo- vývojová a inovačná sieť pre oblasť mteriálov a technológií, c2006 [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/data/files/702.pdf>
9. DRÁPALA, Jaromír, Lumír KUCHAR, Karel TOMÁŠEK a Zuzanka TROJANOVÁ. *Hořčík, jeho slitiny a binární systémy hořčík - příměs*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2004. ISBN 80-248-0579-0.
10. SCOTT, Robert A. a John WILEY. *Encyclopedia of inorganic and bioinorganic chemistry* [online]. USA: Wiley, ©2015 [cit. 2020-06-12]. ISBN 9781119951438. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119951438>
11. JANDOVÁ, Jitka, Nguyen HONG VU a Petr DVOŘÁK. *Metody výroby neželezných kovů a zpracování odpadů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2018. ISBN 978-80-7592-026-3.
12. PTÁČEK, L. – *Slévárenské slitiny hořčíku*. Slévárenství. 2-3/2004, roč. 52, č. 2-3, s. 61-66. ISSN 0037-6825
13. GRÍGEROVÁ, T.- LUKÁČ, I.- KOŘENÝ, R.: *Zlievárenstvo neželezných kovov*, 1. vydanie, Bratislava, Alfa, 1988.
14. MICHINA, Štefan a Lenka MICHINOVÁ. *Neželezné kovy*. Ústí nad Labem, 2014. ISBN ISBN 978-80-260-7132-7.
15. AVEDESIAN, M., BAKER, H. ASM speciality handbook–*Magnesium and magnesium alloys*. Ohio, USA: ASM International, 1 999. 314 s. ISBN 0-87170-657-1.
16. ČERNÝ, M. *Korozní vlastnosti kovových konstrukčních materiálů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1 984. 264 s

17. ZAHRADNÍČEK, Rudolf, Karol SEMRÁD, Romana DOBÁKOVÁ a Jozef ČERŇAN. *Materiály a komponenty*. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2015. ISBN 978-80-553-2019-9.
18. The metal of the future. *Alliance magnesium* [online]. Canada [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <http://alliancemagnesium.com/magnesium/metal-future/>
19. STANČEK, L. *Technológia I: Zlievanie*. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2 006. 134 s. ISBN 80-227-2350-9.
20. KAINER, KU. *Magnesium - Alloys and Technologies*. 1st ed. Weinheim: Wiley - VCH, 2003. 290 p. ISBN 3-527-30570-X
21. ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
22. NOVÁK, Pavel, Margita SEFČÍKOVÁ a Daniel HLUBEŇ. *Elektrotepelná a svetelná technika*. Košice: Technická univerzita Košice, 2006. ISBN 80-8073-501-8.
23. *Handtmann* [online]. [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: <https://www.handtmann.de/sk/lahka-zliatina/technologie/tlakove-liatie/>
24. Hot chamber die casting. *Dynacast* [online]. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.dynacast.com/en/specialty-die-casting/die-cast-process/hot-chamber-die-casting>
25. Die casting. *SubsTech Substances and Technologies* [online]. 2012 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=die_casting
26. Chicago white metal casting: *Hot chamber vs. cold chamber die casting*. [online]. Illinois, 2016 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://cwmdiecast.com/2016/05/27/die-casting-101-hot-chamber-vs-cold-chamber/>
27. GUPTA, M., SHARON, N. M. L. *Magnesium, magnesium alloys and magnesium composites*. New Jersey: John Wiley and Sons, 2011. 258s. ISBN 9780470494172.
28. Squeeze casting. *Science direct* [online]. c2020 [cit. 2020-06-12]. ISSN 0927-796X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/squeeze-casting>
29. Borui: *Squeeze casting advantages* [online]. China, 2013 [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <http://www.metals-china.com/squeeze-casting-advantages.html>
30. CAMPBELL, John. *Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Techniques and Design*. First edition. Oxford: Butterworth Heinemann, 2011, 1130 s. ISBN 1856178099.
31. KAUFMANN, Helmut, Heimo WABUSSEG a Peter J. UGGOWITZER. *Metallurgical and processing aspects of the NRC semi-solid casting technology* [online]. b.r., , 1-11 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/284666583>
32. BRYKSÍ, Vlastimil a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. *Studium mechanických vlastností odlitků litých technologií rheocasting*. 2013.
33. Bryksí Stunová, B. & Bryksí, V. (2015). *Phase segregation during processing of semi-solid slurry by rheocasting method SEED*. *Manufacturing Technology*. 15(4), 515-520

34. Medical design and outsourcing. *Injection Molding with Magnesium* [online]. 2011 [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <https://www.medicaldesignandoutsourcing.com/injection-molding-with-magnesium/>
35. Magnesium injection moulding. *Neue Materialien furth* [online]. c2019 [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <https://www.nmfgmbh.de/technologie/giesstechnik/magnesiumspritzgiessen/?lang=en>
36. The japan steel works. *Magnesium alloy injection molding machine* [online]. Japan, ©2019 [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: https://www.jsw.co.jp/en/product/molding_machine/mg/thixomolding.html
37. Rheocasting. *Science direct* [online]. c2020 [cit. 2020-06-12]. ISSN 0927-796X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/rheocasting>
38. MatNet. *Liatie do piesku* [online]. Slovakia: Výskumovo- vývojová a inovačná sieť pre oblasť mterriálov a technológií, c2006 [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=289>
39. Sand casting. *SubsTech Substances and Technologies* [online]. 2012 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=sand_casting
40. Mordor intelligence. *Magnesium alloy market - growth, trends, ande forecast (2020 - 2025)*. [online]. India, c2020 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/magnesium-alloy-market>
41. Magnesium uses. *Asian metal* [online]. [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <http://metalpedia.asianmetal.com/metal/magnesium/application.shtml>
42. Dziubińska, Anna & Surdacki, Piotr & Dziubiński, Mięczysław & Barszcz, Marcin. *The foming of magnesium alloy forgings for aircraft* [online]. 2016 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/319418022_THE_FORMING_OF_MAGNESIUM_ALLOY_FORGINGS_FOR_AIRCRAFT_AND_AUTOMOTIVE_APPLICATIONS
43. The influence of alloy element on magnesium for electronic devices applications. *Intech Open* [online]. 2014 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/light-metal-alloys-applications/the-influence-of-alloy-element-on-magnesium-for-electronic-devices-applications-a-review>
44. Neue Erkenntnisse ebnen den Weg für bessere Implantate. *Aargauer Zeitung* [online]. 2019 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://www.aargauerzeitung.ch/schweiz/neue-erkenntnisse-ebnen-den-weg-fuer-bessere-implantate-135886881>
45. Roskill, *Magnesium metal*, Global Industry, Markets and Outlook [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://roskill.com/market-report/magnesium-metal/>

ZOZNAM OBRÁZKOV

obr. 1 Koláčový graf náležísiiek horčíku [3]	12
obr. 2 Elektrolýzér pre elektrolýtické vylučovanie Mg [11]	13
obr. 3 Retorta používaná v procese Pidgeon [11].....	13
obr. 4 Mechanické vlastnosti odlievajúcich a kovaných horčíkových zliatin [12].....	14
obr. 5 Smery vývoja horčíkových zliatin [9].....	15
obr. 6 Binárny diagram Mg-Al [3]	15
obr. 7 Binárny diagram Mg-Mn [3].....	16
obr. 8 Binárny diagram Mg-Zn [3].....	16
obr. 9 Elektrická indukčná pec [22]	18
obr. 10 Elektrická odporová pec [21]	18
obr. 11 Schéma tlakového liatia s teplou komorou [26].....	19
obr. 12 Schéma odlievania do piesku [39]	20
obr. 13 Výrobný proces priameho squeeze castingu [27]	21
obr. 14 Výrobný proces nepriameho squeeze castingu [21].....	21
obr. 15 Schématické znázornenie procesu rheocasting [33].....	22
obr. 16 Výrobný postup pri metóde Thixocasting [31]	23
obr. 17 Schéma Thixomoldingu [35].....	24
obr. 18 Využitie zliatin horčíku pre rok 2019 [40].....	25
obr. 19 Využitie horčíkových zliatin v automobiloch [42]	26
obr. 20 Využitie horčíkových zliatin v lietadlách [42].....	27
obr. 21 Elektrotechnické zariadenia [41].....	28
obr. 22 Implantáty z horčíka [41]	29
obr. 23 Športové pomôcky zo zliatin horčíku: (a) hlava golfovej palice, (b) kolieskové korčule, (c) tenisová raketa, (d) rám z bicykla, (e) luk, (f) lyže, (g) snowboard [41]	30
obr. 24 Recyklácia horčíku [36]	32

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1 – Fyzikálne vlastnosti [5,7,8]	11
Tab. 2 – Mechanické vlastnosti [4,7,8]	11