VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

POUŽITÍ SLITIN HOŘČÍKU

APPLICATIONS OF MAGNESIUM ALLOYS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE TOMÁŠ KÖHLER
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. KAREL NĚMEC, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Tomáš Köhler

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

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:

Použití slitin hořčíku

v anglickém jazyce:

Applications of magnesium alloys

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zpracování přehledu o slitinách hořčíku s následným zaměřením na materiály používané ve strojírenství. Dále vyhodnocení výhod a nevýhod slitin hořčíku pro aplikaci na konkrétní strojní součásti.

Cíle bakalářské práce:

1) Zpracovat přehled o hořčíku a jeho slitinách
2) Definovat oblasti jejich využití
3) Konkretizovat použití slitin hořčíku ve strojírenství
4) Zhodnotit výhody a nevýhody aplikace těchto materiálů pro konkrétní aplikace

Seznam odborné literatury:

1) Kainer, K.U.: Magnesium alloys and technologies. Weinheim: Wiley-VCH, 2003. 285 s. ISBN 3-527-30570-X
2) Sedláček, V.: Neželezné kovy a slitiny. 1. vyd., Praha: SNTL, 1979. 398 s.
3) Ptáček, L., Ustohal, V. : Slitiny hořčíku a jejich využití. In. Metal 98. Ostrava, Tanger. 1998, s. 45–49
4) Ptáček, L. : Nauka o materiálu II. 2. opr. a rozš. vyd., Brno: CERM, 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3
5) Vojtěch, D.: Kovové materiály. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 2006. 136 s. ISBN 80-7080-600-1

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Karel Němec, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 2.2.2015

L.S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc. Ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. Děkan fakulty

Abstrakt

Bakalářská práce zahrnuje základní poznatky o hořčíku a jeho slitinách. Zabývá se také jejich vlastnostmi, rozdělením a možnostmi tepelného zpracování. Práce dále shrnuje aplikace hořčíkových slitin v jednotlivých průmyslových odvětvích. U použití pro konkrétní součásti je provedeno také srovnání s jinými konstrukčními materiály, včetně vyhodnocení výhod a nevýhod použití hořčíkových slitin.

Klíčová slova

Hořčík, slitiny hořčíku, aplikace slitin hořčíku

Abstract

This bachelor thesis includes basic knowledge of magnesium and its alloys. It also deals with their properties, division, and possibilities of heat treatment. The thesis then summarizes the application of magnesium alloys in individual branches of industries. With their usage for particular parts, a comparison with other construction materials, including the evaluation of using magnesium alloys and their advantages and disadvantages, is conducted.

Key words

Magnesium, magnesium alloys, application of magnesium alloys

Bibliografická citace

KÖHLER, T. *Použití slitin hořčíku.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Němec, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto závěrečnou práci vypracoval samostatně s použitím literatury a informačních zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu na konci práce.

V Brně dne 26.5.2015

……..
Tomáš Köhler

Poděkování

Tímto děkuji Ing. Karlu Němcovi, Ph.D. za poskytnutí užitečných rad a připomínek při vypracování mé bakalářské práce a dále mé rodině a přítelkyni za podporu.

Obsah

1 Úvod 10
2 Hořčík 11
2.1 Historie 11
2.2 Výskyt hořčíku v přírodě 11
2.3 Vlastnosti hořčíku 11
2.4 Výroba hořčíku 13
2.4.1 Výroba tavnou elektrolýzou 13
2.4.2 Výroba termickou redukcí 13
2.4.3 Rafinace hořčíku 14
2.5 Použití čistého hořčíku 14
3 Slitiny hořčíku 15
3.1 Slévárenské slitiny hořčíku 16
3.1.1 Slitiny Mg-Al-Zn 16
3.1.2 Slitiny Mg-Zn 16
3.1.3 Slitiny Mg-Mn 16
3.1.4 Slitiny Mg-Li 17
3.1.5 Slitiny Mg-Al-Si 17
3.1.6 Slitiny Mg-Zn-Zr-Th 17
3.2 Slitiny hořčíku ke tváření 17
3.3 Značení slitin hořčíku 18
3.3.1 Značení dle ČSN 18
3.3.2 Značení dle ČSN EN 18
3.3.3 Značení dle ASTM 19
3.3.4 Značení odpadu neželezných kovů 20
3.4 Tepelné zpracování hořčíkových slitin 20
3.4.1 Žíhání ke snížení pnutí 21
3.4.2 Žíhání homogenizační 21
3.4.3 Žíhání rekrystalizační 21
3.4.4 Vytvrzování 21
3.5 Recyklace hořčíku a jeho slitin 22
4 Využití slitin hořčíku 24
4.1 Automobilový průmysl 24
4.1.1 Konkrétní příklady aplikací v automobilovém průmyslu 25
4.2 Letecký průmysl 27
4.3 Využití slitin hořčíku v elektrotechnice 28

4.4 Využití hořčíku a jeho slitin pro vojenské účely 28
4.5 Využití slitin hořčíku pro sportovní vybavení 29
4.6 Ostatní oblasti využití 30
4.7 Využití slitin hořčíku v lékařství 30
4.7.1 Kovové biomateriály 30
4.7.2 Slitiny hořčíku jako biodegradovatelný materiál 30
4.8 Využití hořčíku pro skladování vodíku 33
5 Závěr 34
6 Seznam použitých zdrojů a literatury 35
7 Seznam použitých zkratek a symbolů 38

1 Úvod

Současným trendem ve strojírenství je dlouhodobě snižovat zátěž na životní prostředí. K tomu nedílnou měrou přispívá snižování spotřeby paliva, kterého lze dosáhnout snížením hmotnosti automobilů, letadel a podobně. Proto roste podíl lehkých neželezných kovů jako konstrukčních materiálů ve stavbě dopravních prostředků. Mezi lehké neželezné kovy, tj. kovy s měrnou hmotností nižší než 5 000 $kg \cdot m^{-3}$, využívanými pro tyto aplikace patří zejména slitiny hliníku (2 690 $kg \cdot m^{-3}$), slitiny titanu (4 505 $kg \cdot m^{-3}$) a také slitiny hořčíku (1 780 $kg \cdot m^{-3}$), které v posledních letech prošly výrazným rozvojem [4, 6].

Hořčík je považován za nejlehčí známý konstrukční materiál, pokud nebereme do úvahy berylium, které je toxické. Nepatří mezi vzácné kovy, jelikož je ve značné míře obsažen v zemské kůře. Dalším zdrojem jsou oceány a slaná jezera, například známé Mrtvé moře ležící na hranicích Izraele s Jordánskem nebo solné jezero ve Spojených státech amerických, konkrétně v Utahu. Navzdory tomu je hořčík relativně drahý, což je způsobeno jeho náročnými technologiemi výroby [5]. Ačkoli je výroba hořčíku energeticky poměrně náročná, množství energie potřebné k výrobě daného objemu je nízké, vzhledem k nízké měrné hmotnosti kovu. Vztaženo na objem, je tedy třeba mnohem méně energie k výrobě hořčíku než hliníku nebo zinku. Navíc se předpokládá další vývoj v oblasti optimalizace a zlepšení stávajících výrobních metod, což by mohlo mít za následek nové možnosti vedoucí ke snížení nákladů na výrobu primárního hořčíku [1].

Vzhledem k horším mechanickým vlastnostem hořčíku byly pro konstrukční účely vyvinuty nejrůznější slitiny, které mají lepší mechanické vlastnosti, zejména pevnost, avšak zachovaly si přednosti čistého hořčíku. Asi nejznámější je slitina AZ91 (obsahující 9 hm. % Al, 1 hm. % Zn a méně než 1 hm. % Mn), často používaná pro odlitky zhotovené tlakovým litím. V současnosti existuje snaha o rozšíření hořčíkových slitin tvářených, kde se však projevuje problém nízké tažnosti hořčíku, která je způsobena hexagonální krystalickou mřížkou s těsným uspořádáním. Současné výzkumné trendy se tedy snaží o vytvoření hořčíkových slitin s dobrou tažností, vysokou pevností, dobrou odolností proti působení zvýšených teplot a v neposlední řadě také o snížení ceny současných slitin [5].

2 Hořčík

2.1 Historie

První zmínka o využití hořčíku pochází z léta roku 1618, kdy v Anglii, nedaleko městečka Epsom, farmář Henry Wicker zpozoroval na svém dobytku, že odmítá pít vodu ze studny. Zjistil, že voda má zvláštní hořkou chuť a po jejím odpaření vzniká sůl, která má léčivé účinky. Objevenou solí byl síran hořečnatý $MgSO_4$, respektive jeho heptahydrát $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, později známý jako epsomská sůl [7].

O další pokrok v použití hořčíku se zasloužil skotský chemik a fyzik Joseph Black. Ten v roce 1755 provedl experiment, po kterém vyvodil rozdíl mezi oxidem hořečnatým MgO a oxidem vápenatým CaO, které byly vyráběny z podobných hornin (magnezitu a vápence) a rozpoznal tak hořčík jako chemický prvek [8].

Jako první však dokázal izolovat malé množství čistého kovu až anglický chemik Humphry Davy v roce 1808, a to pomocí elektrolýzy vlhkého MgO. Následně navrhnul název Magnium podle místa původu magnezitu $MgCO_3$ z Magnesie v Řecku [7].

O dvacet let později, tedy v roce 1828, vyrobil větší množství kovového hořčíku francouzský vědec Antoine-Alexandre-Brutus Bussy. Toho Bussy dosáhl za pomoci zahřívání chloridu hořečnatého redukovaným draslíkem. Roku 1886 pak začala první úspěšná průmyslová výroba hořčíku, založená na elektrolýze karnalitu, německou firmou Aluminium und Magnesiumfabrik Hemelingen [9].

2.2 Výskyt hořčíku v přírodě

Hořčík je chemický prvek se značkou Mg (z latinského Magnesium). Jedná se o osmý nejrozšířenější prvek v zemské kůře a po železe a hliníku třetí nejrozšířenější kov, jeho obsah je 2,35 %. Nevyskytuje se však v čisté formě, ale v podobě chemických sloučenin, zejména v horninách, a ve značné míře je obsažen v mořské vodě ($MgCl_2$), což vede k tvrzení, že jsou světové zásoby prakticky neomezené. Seznam nejdůležitějších surovin používaných na výrobu hořčíku je uveden v tab. 1. Suroviny lze rozdělit na oxidické a chloridové. Z oxidických získáváme MgO, zatímco z chloridových se vyrábí $MgCl_2$ [5, 10, 11].

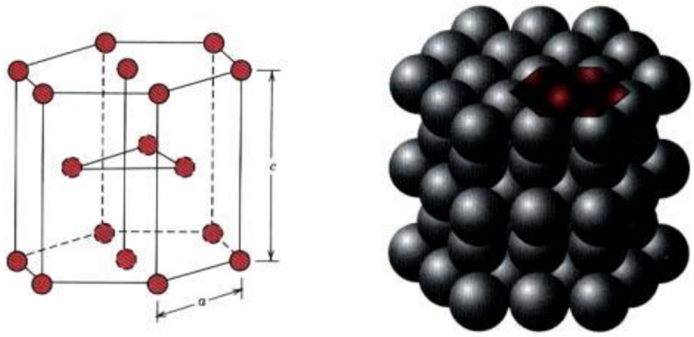
Tab. 1 Nejdůležitější suroviny pro výrobu hořčíku [5]

Název minerálu	Chemická značka	Obsah Mg [%]	Typ suroviny
Magnezit	$MgCO_3$	28,8	oxidická
Dolomit	$CaCO_3 \cdot MgCO_3$	13,2	oxidická
Serpentinit	$3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$	26,3	oxidická
Karnalit	$MgCl_2 \cdot KCl \cdot 6H_2O$	8,8	chloridová
Bischofit	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	11,96	chloridová
Mořská voda	-	0,12 až 0,31	chloridová

2.3 Vlastnosti hořčíku

Hořčík je nepolymorfní kov bílé barvy, zařazovaný do skupiny lehkých neželezných kovů. Má druhou nejmenší měrnou hmotnost ze všech kovů periodické soustavy prvků a velký poloměr atomů. Hodnota měrné hmotnosti je 1 738 $kg \cdot m^{-3}$. Má šesterečnou krystalickou

mřížkou s těsným uspořádáním (obr. 1) a pouze jednou aktivní skluzovou rovinou (0001), což způsobuje jeho špatnou tvárnost za studena. Tvárnost získává až při ohřátí na teplotu vyšší než 225 °C. Teplota tavení čistého Mg je 650 °C. Další důležité vlastnosti Mg jsou uvedeny v tab. 2 [1, 12].



Obr. 1 Šesterečná (hexagonální) krystalická mřížka s těsným uspořádáním [13]

Tab. 2 Vlastnosti čistého Mg [1, 2, 8]

Protonové číslo	12
Relativní atomová hmotnost	24,305
Elektronová konfigurace	$[Ne]3s^2$
Elektronegativita	1,31
Měrná hmotnost [$g \cdot cm^{-3}$]	1,738
Měrná tepelná kapacita [$J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$]	1 023 (při 20 °C)
Tepelná vodivost [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	156
Elektrická vodivost [$S \cdot m^{-1}$]	$2{,}24 \cdot 10^7$
Součinitel délkové roztažnosti [K^{-1}]	$26 \cdot 10^{-6}$
Teplota tání [°C]	650±0,5
Teplota varu [°C]	1 090
Modul pružnosti v tahu [GPa]	44,7
Modul pružnosti ve smyku [GPa]	17,3
Tvrdost podle Brinella [HB]	40
Smluvní mez kluzu [MPa]	100
Mez pevnosti v tahu [MPa]	180
Tažnost [%]	15÷17

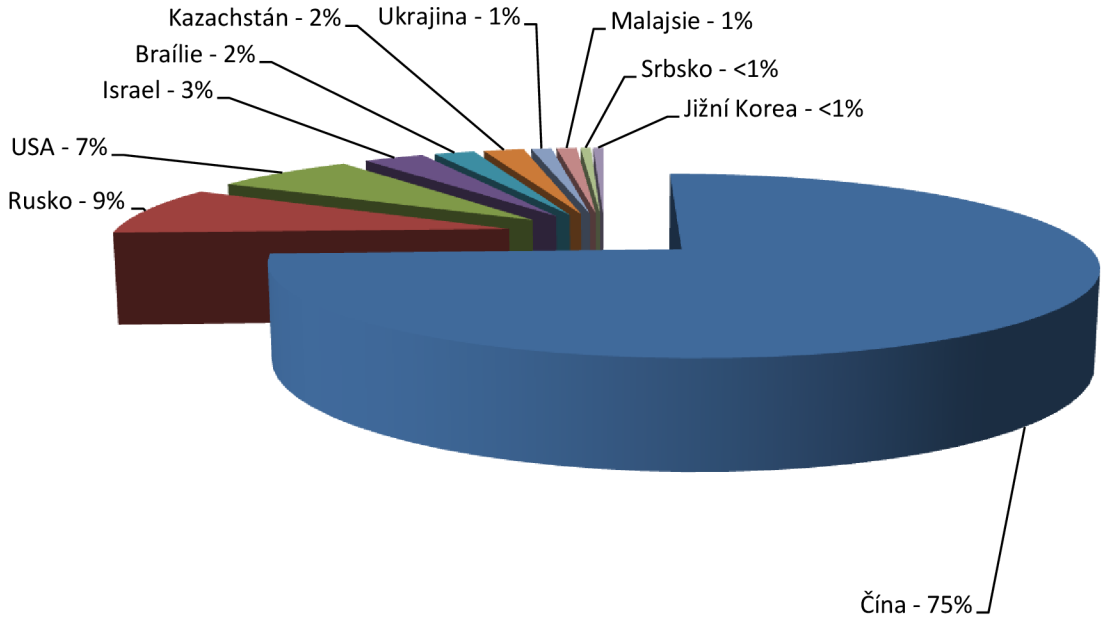
Hlavní výhodou hořčíku je jeho nízká měrná hmotnost. Hořčík je kov netoxický, čehož se využívá například v lékařství [4]. Čistý hořčík nemá jako konstrukční kov přílišné využití, zejména pro svou poměrně nízkou mez pevnosti v tahu. Mezi další nevýhody patří špatná korozní odolnost [1].

Nevýhodou, projevující se při výrobě je, že hořčík má vysokou afinitu vzhledem ke kyslíku. S ohledem na tuto skutečnost je nutné provádět jak výrobu, tak i tavení v ochranné atmosféře (např. inertní plyny), což má negativní dopad na výslednou cenu. Za vyšších teplot může dojít až ke vznícení. Hořčík na vzduchu hoří intenzivním bílým plamenem. Při tomto procesu vzniká směs oxidu hořečnatého MgO a nitridu hořečnatého Mg_3N_2 podle rovnic (2-1) a (2-2) [5, 11].

$$2Mg + O_2 \rightarrow 2MgO \quad (2\text{-}1)$$
$$3Mg + N_2 \rightarrow Mg_3N_2 \quad (2\text{-}2)$$

2.4 Výroba hořčíku

Světová produkce hořčíku v posledních letech výrazně roste. Zatímco v roce 2002 bylo vyrobeno 499 000 t kovového hořčíku, v roce 2012 to bylo zhruba 905 000 t. Největší nárůst zaznamenala Čína, která v roce 2012 vyrobila 608 000 t, což představuje asi 75 % celkové produkce. Procentuální zastoupení produkce primárního kovového hořčíku jednotlivých států je znázorněno na obr. 2 [14].



Obr. 2 Množství vyrobeného kovového hořčíku v jednotlivých státech [14]

2.4.1 Výroba tavnou elektrolýzou

Nejčastějším způsobem průmyslové výroby hořčíku je výroba tavnou elektrolýzou roztaveným bezvodným roztokem chloridu hořečnatého, chloridu draselného a chloridu sodného o teplotě cca 700 °C. Při elektrolýze dochází k vylučování hořčíku na katodě (ocelové desky) a chloru na anodě (grafitová tyč). Hořčík vyplouvá na povrch elektrolytu a následně je odebírán. Chlor se v plynné formě odvádí obráceným žlabem [15]. Základní reakcí je [16]:

$$MgCl_2 \rightarrow Mg_{(tavenina)} + Cl_{2(plyn)} \quad (2\text{-}3)$$

2.4.2 Výroba termickou redukcí

Termický způsob výroby hořčíku je druhou nejpoužívanější metodou. Výhodou oproti tavné elektrolýze je jeho jednoduchost, není třeba vyrábět bezvodný $MgCl_2$, což vede ke snížení nákladů. Navíc také dochází k vyloučení chloru, který má negativní vliv na vlastnosti hořčíku. Nejčastější je silikotermická redukce křemíkem nebo slitinou křemíku (ferosiliciem). Redukce se uskutečňuje při teplotě kolem 1 150 až 1 200 °C, po dobu 10 h a při tlaku 0,1 kPa [5, 17].

2.4.3 Rafinace hořčíku

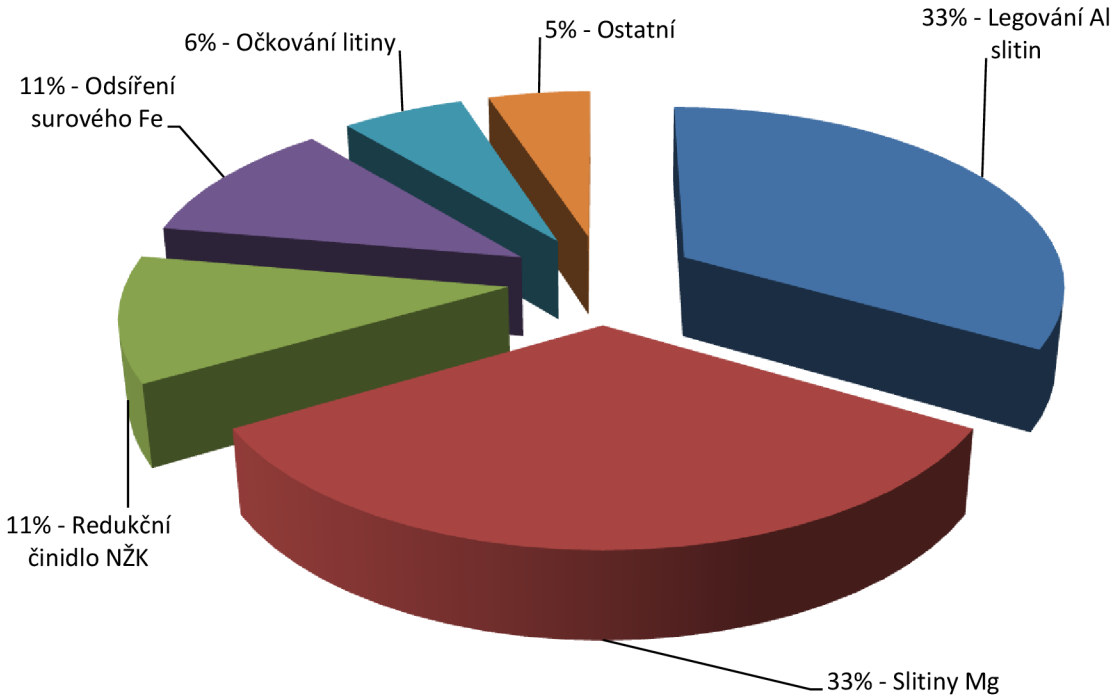
Následným procesem při výrobě hořčíku je jeho rafinace. Hořčík, který je vyrobený elektrolýzou, má čistotu 99,4 ÷ 99,6 % Mg, zatímco hořčík vyrobený silikotermickou redukcí má vyšší čistotu, která dosahuje hodnot až 98 % Mg. Při rafinaci se odstraňují nečistoty.

Nekovové nečistoty, jako jsou oxidy, nitridy, karbidy a chloridy jsou odstraněny při rafinačním tavení přidáním tavidel na bázi chloridů, které smáčejí a pokrývají povrch nečistot, které následně klesají na dno taveniny a tvoří kal. Kovové nečistoty (Fe, Si, Ca, Na, Mn, Cu, Ni, Zn, Al) mají negativní vliv zejména na korozní odolnost. Rozpustnost kovů v tavenině hořčíku klesá s teplotou, proto se rafinace provádí při teplotách 660 až 680 °C. I zde se do taveniny přidávají chloridy, které následně klesají na dno taveniny.

Při následném odlévání je nutné udržovat laminární proudění a ustálený tok roztaveného hořčíku, jelikož při turbulentním proudění vznikají u odlitků povrchové praskliny. Výsledná čistota odlitků se pohybuje v rozmezí 99,90 až 99,95 % Mg [5].

2.5 Použití čistého hořčíku

Hlavní oblastí použití čistého hořčíku je legování hliníkových slitin, které představuje asi 33 % světové spotřeby hořčíku. V současnosti se však stále rozšiřuje oblast použití hořčíkových slitin, a tak je množství hořčíku spotřebovaného pro jeho slitiny již přibližně stejné. Dalšími oblastmi použití čistého Mg je jako redukční činidlo neželezných kovů, zejména titanu (11 %), a na odsíření surové železa, jehož výroba však z důvodu hospodářské recese v posledních letech poklesla. Průměrná spotřeba činí 50 g hořčíku na 1 t oceli. Okolo 6 % celkové produkce se dále spotřebuje na očkování litiny. Mezi ostatní oblasti použití patří například elektrochemická protikorozní ochrana pomocí anod z hořčíku. Dále se hořčíku využívá také pro svou reaktivnost v pyrotechnice. Množství hořčíku spotřebovaného na jednotlivé aplikace v procentech ukazuje obr. 3 [5, 14].



Obr. 3 Hlavní oblasti spotřeby čistého hořčíku [14]

3 Slitiny hořčíku

Jelikož se hořčík vyznačuje nízkou hustotou, hlavní předností jeho slitin je právě nízká měrná hmotnost, která se pohybuje v rozmezí 1 760 až 1 990 kg·m^{-3}. Dalšími výhodami těchto slitin je schopnost dobře tlumit vibrace, dobrá obrobitelnost a slévatelnost.

Nevýhodou pak je poměrně malá pevnost v porovnání se slitinami hliníku (ani po vytvrzení pevnost nepřesahuje 400 MPa) [4]. Mez kluzu hořčíkových slitin souvisí s hodnotou kritického skluzového napětí, která je pro čistý hořčík nízká.

Kritické skluzové napětí je závislé na čistotě kovu (s rostoucí čistotou klesá hodnota kritického skluzového napětí), struktuře a termodynamických podmínkách deformace. Pokud nečistoty spolu se základním kovem tvoří tuhé roztoky, roste kritické skluzové napětí intenzivněji, oproti stavu kdy se nečistoty nerozpouští. V hořčíku příměsové prvky interagují s dislokacemi. Vliv na kritické skluzové napětí lze přibližně určit vztahem,

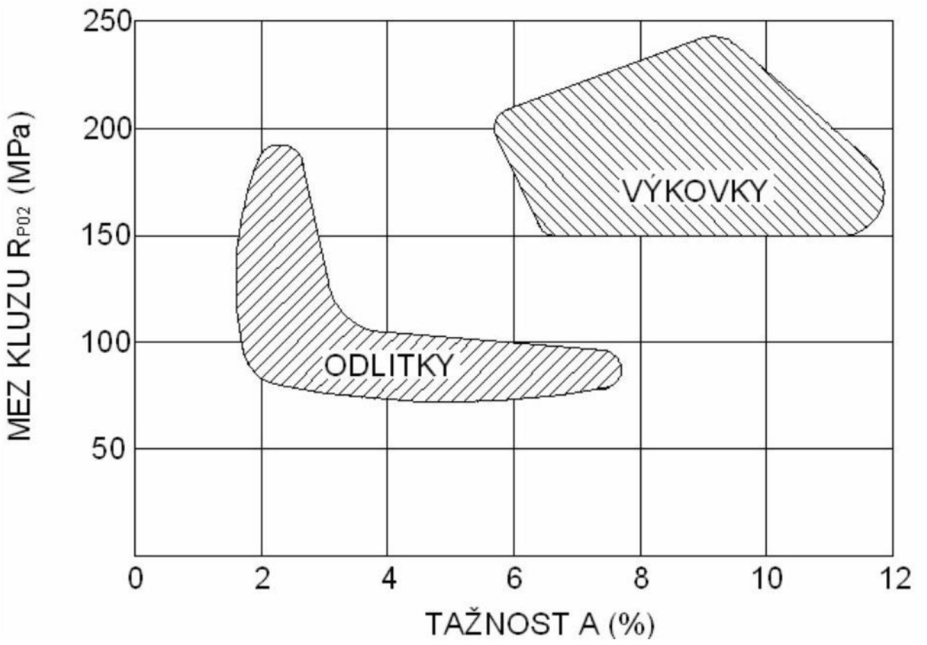
$$\tau_{kr} \approx c^n \tag{3-1}$$

kde c je koncentrace přísadových atomů, n je exponent ($n \approx 0{,}5$ až 0,66). U většiny kovů lze říci, že se vzrůstající teplotou τ_{kr} klesá, ale u slitin hořčíku není tento vliv jednoznačný. Mez kluzu hořčíkových slitin lze tedy vyjádřit vztahem

$$\sigma_k = \frac{\tau_{kr}}{m} \tag{3-2}$$

kde m je Schmidtův faktor ($m_{max} \approx 0{,}5$) [18].

Slitiny hořčíku mají také nízkou vrubovou houževnatost (KU = 1,2 ÷ 4,2 J) a nízkou tvrdost. Vzhledem ke špatné tvárnosti hořčíku mají častější zastoupení slévárenské slitiny, oproti slitinám ke tváření, chemickým složením jsou si však tyto slitiny podobné. Na obr. 4 je uvedena závislost tažnosti A a smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ a jejich porovnání pro slévárenské slitiny hořčíku a slitiny kované [3, 4].



Obr. 4 Mechanické vlastnosti odlévaných slitin a slitin kovaných [18]

3.1 Slévárenské slitiny hořčíku

Převážnou většinu hořčíkových slitin tvoří slitiny slévárenské [19]. Základ těchto slitin je vždy binární soustava rozšířená o další přísady, které zlepšují mechanické a technologické vlastnosti, nebo zvyšují odolnost proti korozi. Nejčastější jsou slitiny hořčíku s hliníkem, zinkem, manganem, případně lithiem. Při slévárenském procesu se projevuje vysoká hořlavost těchto slitin, proto musí být tavenina chráněna struskou nebo ochrannou atmosférou oxidu siřičitého. Běžné slévárenské slitiny hořčíku dosahují pevnosti okolo 200-280 MPa, vyznačují se ale také nízkou tažností [2, 20].

Většina součástí ze slévárenských slitin se vyrábí tlakovým litím. Touto technologií je možno dosáhnout vysoké produktivity a přesností výrobků a to i pro tvarově složité odlitky. Při nízké rychlosti ochlazování získá odlitek jemnozrnnou strukturu. Naopak při rychlém ochlazení způsobuje uzavření plynu (porozitu), což způsobuje například obtížnou svařitelnost odlitků [5].

3.1.1 Slitiny Mg-Al-Zn

Slitiny hořčíku, jejichž základním systémem je ternární soustava Mg-Al-Zn jsou používané nejčastěji. Jsou známé pod obchodním názvem „elektrony“. Obsah hliníku se pohybuje v rozmezí 2 až 9 % a v těchto slitinách plní především funkci zpevnění. Zlepšuje však také slévárenské vlastnosti. Maximální rozpustnost hliníku v hořčíku je 11,5 % při eutektické teplotě 437 °C. Při eutektické reakci se tvoří směs dvou fází. Fáze α je substituční tuhý roztok Al v Mg a fáze β je intermetalická sloučenina ($Mg_{17}Al_{12}$). Obsah zinku ve slitinách je nejvýše 3 %, zinek má na zpevnění pouze malý vliv. Slitiny na této bázi jsou velmi náchylné na čistotu, přičemž i malé množství jiných, nežádoucích prvků jako je Fe, Ni nebo Cu, zhoršuje korozní odolnost slitiny. V České republice je jedinou normovanou slitinou hořčíku MgAl8Zn1 (ČSN 42 4911), která odpovídá slitině AZ81. Odlévání této slitiny probíhá do pískových nebo kovových forem, ale je možné ji odlévat i tlakovým litím. Minimální tloušťka stěn odlitků z této slitiny se pohybuje okolo 3 až 4 mm. Tyto odlitky mohou pracovat při hodnotách teplot do 150 ºC při zatížení [3, 4, 5].

3.1.2 Slitiny Mg-Zn

Slitiny hořčíku se zinkem se svým strukturním složením podobají slitinám s hliníkem. Zinku ve slitinách bývá okolo 1 až 2 %. Zinek ve slitině zvyšuje mez kluzu a mez pevnosti, pevnost však může být zvýšena i precipitačním vytvrzováním (rozpouštěcí žíhání při teplotě 380 ºC, po dobu 10 h a následné ochlazení ve vodě). V technické praxi se často používají slitiny Mg-Zn obsahující malé množství manganu pro zvýšení korozní odolnosti. Dalšími používanými legurami jsou zirkon a kovy vzácných zemin, zejména pro jejich pozitivní vliv na mechanické vlastnosti a zvýšení oblasti pracovních teplot. Obsah zirkonu se v těchto slitinách pohybuje v rozmezí 0,25 až 0,7 %. Slitiny legovány zirkonem mají jemnější zrno a tím i lepší pevnostní charakteristiky [20].

3.1.3 Slitiny Mg-Mn

Slitiny se základním binárním systémem hořčík-mangan se vyznačují horšími slévárenskými vlastnosti, zejména nižší zabíhavostí a vyšší smrštivostí, ve srovnání s ostatními slitinami hořčíku. Mají však nižší pórozitu, a proto jsou vhodné spíše pro méně namáhané odlitky. Mangan v těchto slitinách způsobuje také lepší svařitelnost a zvyšuje korozní odolnost. V průběhu krystalizace mají slitiny Mg-Mn snahu tvořit hrubé zrno, což vede k relativně špatným mechanickým vlastnostem. Zrno je možné zjemnit přidáním malého množství křemíku [2, 20].

3.1.4 Slitiny Mg-Li

Jelikož má lithium nižší měrnou hmotnost než hořčík (530 kg·m^{-3}), tyto slitiny jsou jedním z nejlehčích konstrukčních materiálů. Měrná hmotnost slitin Mg-Li je 1 350 až 1 600 kg·m^{-3}. Tyto slitiny je možné dělit na binární a polykomponentní. Binární slitiny mohou být tvořeny fází α (obsah lithia do 5,7 hm. %), směsí α+β (5,7 až 10,4 hm. % Li) a fází β (obsah Li nad 10,4 hm. %). Obě fáze mají rozdílné krystalické mřížky, zatímco fáze α má hexagonální mřížku těsně uspořádanou, fáze β má mřížku krychlovou prostorově středěnou. Krystalická mřížka ovlivňuje mechanické i technologické vlastnosti. Množství lithia ve slitině zhoršuje pevnost, ale hodnota modulu pružnosti a meze kluzu v tlaku je vyšší než u jiných slitin hořčíku. Další nevýhodou je malá odolnost proti tečení a reaktivita komponent v tekutém stavu [3, 20].

3.1.5 Slitiny Mg-Al-Si

Křemík jako legura ve slitinách hořčíku vede k tvorbě Mg_2Si precipitátů (krystalická mřížka kubická plošně středěná), které se vyznačují nízkou měrnou hmotností, vysokou tvrdostí a nízkou teplotní roztažností. Největší výhodou těchto kovů je vysoká teplota tání (1 085 °C). Křemík nemá schopnost vázat na sebe hliník, a tak nedochází k tvorbě β fáze. Nejběžnějšími slitinami jsou AS21 a AS41. Tyto slitiny se mohou používat do rozmezí teplot 130 až 150 °C. Slévatelnost slitin je výrazně odlišná, zatímco AS41 má poměrně dobrou slévatelnost, slitina AS21 nikoliv. Toto je způsobeno tím, že křemík zlepšuje tekutost, avšak pouze pokud je obsah hliníku nejméně 4 % [5].

3.1.6 Slitiny Mg-Zn-Zr-Th

Speciální skupinu tvoří slitiny s thoriem, které byly vyvinuty v Rusku. Tyto slitiny se vyznačují jednou z nejvyšších žárupevností z hořčíkových slitin. Jsou schopny dlouhodobě pracovat až při teplotách 350 ºC [20].

3.2 Slitiny hořčíku ke tváření

Využitelnost hořčíkových slitin ke tváření je vzhledem k jejich špatné tvárnosti omezená. Tvárnost však lze zvyšovat ohřátím slitiny nad teplotu 220 ºC, kdy se stávají aktivními další skluzové systémy a projeví se rekrystalizační procesy. Nejčastějšími technologiemi pro tváření hořčíkových slitin jsou protlačování, válcování a kování (volné i zápustkové). Oblast tvářecích teplot je pro každou technologii odlišná (viz tab. 3) [20].

Tab. 3 Oblast tvářecích teplot [20]

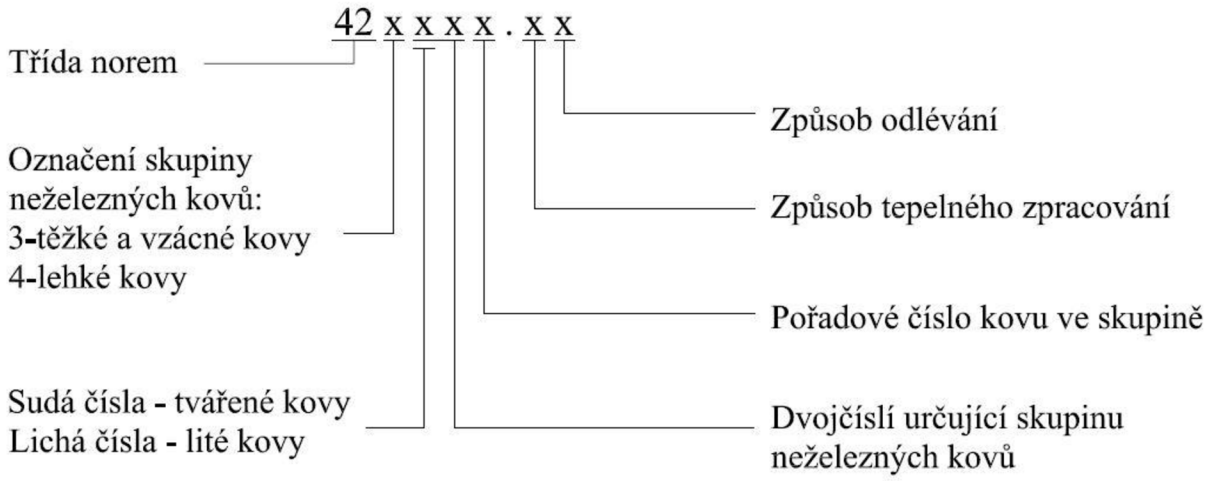
Technologie tváření	Oblast tvářecích teplot [ºC]
Kování	200 až 300
Protlačování	300 až 400
Válcování	400 až 500

Slitiny tvářené strukturně odpovídají slévárenským slitinám hořčíku, ale existují zde určité odlišnosti. Jako legur se u tvářených slitin nepoužívá kovů vzácných zemin. Klasické slitiny jsou nejčastěji legovány hliníkem a zinkem nebo manganem. Tyto slitiny jsou vhodné pouze pro tváření za tepla. Větší množství hliníku (8,5 %) umožňuje využít vytvrzování za tepla pro zvýšení pevnosti. Další možností je legování zirkonem, který způsobuje jemnější zrno a v kombinaci se zinkem zvyšuje pevnost. Slitiny hořčíku s manganem mají lepší svařitelnost a korozní odolnost. Mimo to mangan také zlepšuje zpracovatelnost a tím umožňuje tváření za normálních teplot [2, 20].

3.3 Značení slitin hořčíku

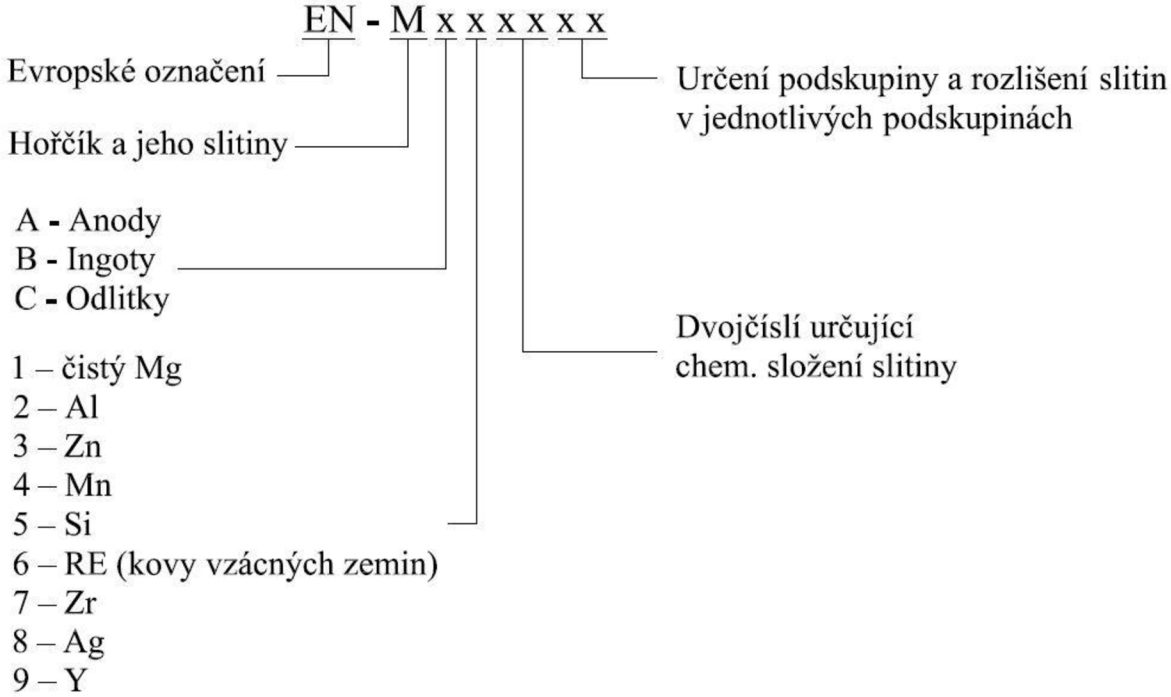
3.3.1 Značení dle ČSN

Hořčíkové slitiny mohou být značeny číselně dle české normy *ČSN 42 0055 Neželezné kovy. Číselné označování těžkých a lehkých neželezných kovů*. Značení podle této normy vypadá následovně [21, 22]:



3.3.2 Značení dle ČSN EN

Dalším možným značením hořčíkových slitin je dle evropské normy *ČSN EN 1754 Hořčík a slitiny hořčíku – anody, ingoty a odlitky z hořčíku a slitin hořčíku – označování (42 1482)*. Značení se řídí následujícími pravidly [23]:



Na 6. až 10. místě může být číselné označení nahrazeno kódovým označením pomocí chemických značek prvků. Jako příklad tohoto značení lze uvést v technické praxi často se vyskytující slitinu EN-MC21110, které odpovídá číselné značení EN-MCMgAl8Zn1 [24].

3.3.3 Značení dle ASTM

Celosvětově používaným standardizovaným značením hořčíkových slitin je norma ASTM. Dle ASTM se označení slitiny skládá z těchto částí:

- první část - dvě velká písmena, označující hlavní legující prvky (dle tab. 4) v pořadí podle jejich množství ve slitině,
- druhá část - dvě číslice, které vyjadřují množství těchto přísad, zaokrouhlené na celá procenta,
- třetí část - jedno velké písmeno (nepoužívá se písmen I a O), které ve většině případů vyjadřuje stupeň čistoty,
- čtvrtá část - jedno velké písmeno a jedno číslo, vyjadřující tepelné zpracování slitiny (viz tab. 5, 6 a 7).

Tab. 4 Značení legujících prvků ve slitinách dle ASTM [1]

Značka	**Legující prvek**	**Značka**	**Legující prvek**
A	Hliník (Al)	N	Nikl (Ni)
B	Bismut (Bi)	P	Olovo (Pb)
C	Měď (Cu)	Q	Stříbro (Ag)
D	Kadmium (Cd)	R	Chrom (Cr)
E	Kovy vzácných zemin	S	Křemík (Si)
F	Železo (Fe)	T	Cín (Sn)
H	Thorium (Th)	W	Yttrium (Y)
K	Zirkonium (Zr)	Y	Antimon (Sb)
L	Lithium (Li)	Z	Zinek (Zn)
M	Mangan (Mn)		

Tab. 5 Značení způsobu tepelného zpracování slitin dle ASTM [5]

Značka	**Význam**
F	Podle technologie výroby
O	Rekrystalizační žíhání (pouze výkovky)
H	Deformační zpevnění
W	Rozpouštěcí žíhání
T	Tepelné zpracování

Tab. 6 Značení způsobu tepelného zpracování slitin dle ASTM – podskupina H [5]

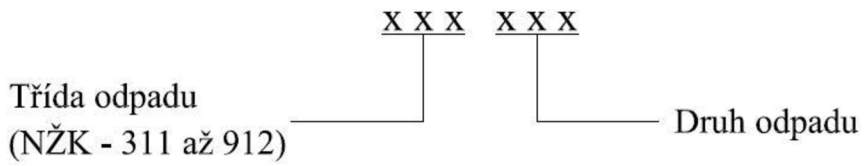
Podskupina H	
H1 plus další číslice	Deformační zpevnění
H2 plus další číslice	Deformační zpevnění a částečné žíhání
H3 plus další číslice	Deformační zpevnění a stabilizování

Tab. 7 Značení způsobu tepelného zpracování slitin dle ASTM – podskupina T [5]

Podskupina T	
T1	Ochlazení a přirozené stárnutí
T2	Žíhání (pouze odlitky)
T3	Rozpouštěcí žíhání a deformace za studena
T4	Rozpouštěcí žíhání
T5	Ochlazení a umělé stárnutí
T6	Rozpouštěcí žíhání a umělé stárnutí
T7	Rozpouštěcí žíhání a stabilizace
T8	Rozpouštěcí žíhání, deformace za studena a umělé stárnutí
T9	Rozpouštěcí žíhání, umělé stárnutí a deformace za studena
T10	Ochlazení, umělé stárnutí a deformace za studena

3.3.4 Značení odpadu neželezných kovů

Odpad neželezných kovů má důležitý význam pro hutě i slévárny, proto má každý své označení, aby nedošlo k jeho míchání či znečištění jinými materiály. Nejdůležitější roli má zpracovatelský odpad, což je odpad vznikající při výrobě, jako je například obrábění nebo tváření (třísky, odřezky, zmetky apod.). Třída odpadu musí být zapsána v popisovém poli výrobního výkresu číselným označením podle normy *ČSN 42 1331 - Odpady neželezných kovů a jejich slitin.* Druh odpadu se do popisového pole neuvádí. Označení má následující předpis [21, 25]:



3.4 Tepelné zpracování hořčíkových slitin

Neželezné kovy se obecně vyznačují vysoce rozdílnými fyzikálními, mechanickými a technologickými vlastnostmi. Tyto vlastnosti lze ovládat různými pochody:

- legováním (substituční nebo intersticiální zpevnění),
- tvářením (dislokační zpevnění) – s měnícím se průřezem roste mez kluzu a pevnosti, ale výrazně klesá tažnost materiálu,
- tepelným zpracováním (zpevnění transformační nebo precipitační) [26].

Ve slitinách hořčíku jsou při tepelném zpracování ve srovnání se slitinami hliníku nutné výrazně delší doby výdrže na teplotách tepelného zpracování. Doby výdrže u hořčíkových slitin mohou dosahovat až 16 hodin, protože difuzní pochody zde probíhají velmi pomalu. Ohřev hořčíkových slitin se standardně provádí v elektrických komorových pecích v ochranné atmosféře, která se skládá ze směsi vzduchu s oxidem siřičitým, přičemž množství SO_2 v této ochranné atmosféře je 0,7 hm. % až 1 hm. %. Dalším prostředím, ve kterém lze provádět ohřev slitin hořčíku, jsou taveniny solí. Zakázány však jsou kyanidy a dusičnany, kvůli

nebezpečí výbuchu, vznícení nebo otravy. Jednotlivé způsoby tepelného zpracování jsou voleny podle chemického složení a požadavků na součást [3].

3.4.1 Žíhání ke snížení pnutí

Tento způsob tepelného zpracování následuje po operacích, která vnitřní pnutí vyvolávají. To může být například svařování, nerovnoměrné chladnutí odlitku nebo i rozsáhlé obrábění. U tvářených slitin hořčíku se žíhací teploty pohybují okolo 260 až 330 ºC, po dobu 1 až 2 h. U slitin k odlévání je teplota vyšší, asi 300 až 340 ºC, po dobu 2 až 3 h. Ochlazování probíhá vždy v peci [26].

3.4.2 Žíhání homogenizační

Jeho účelem je odstranit nerovnovážné rozdělení přísadových prvků ve slitině, jelikož tím slitina dosáhne lepších pevnostních charakteristik odlitků. Při žíhání se fáze vyloučené na hranicích zrn rozpustí v základní matrici, čímž se dosáhne rovnoměrnějšího chemického složení [18]. Dalším důvodem je také zlepšení tvárnosti slitiny. Například v elektronu MgAl8Zn1 je velké množství eutektických částic sloučeniny Mg_4Al_3, které se vylučují na hranicích zrn tuhého roztoku α. To způsobuje vysokou křehkost elektronu v litém stavu. Po provedení homogenizačního žíhání se ve struktuře nachází pouze homogenní tuhý roztok α, který obsahuje nevelké množství nerozpuštěných fází. To můžou být například částice manganu, který je zde příměsí. Teplota homogenizačního žíhání této slitiny je 410 až 420 ºC, po dobu 8 až 16 h. Po homogenizačním žíhání se hodnota meze pevnosti zvýší zhruba o 35 % a tažnost o 63 %, oproti hodnotám slitiny v tepelně nezpracovaném stavu po odlití. Hodnoty mechanických vlastností před a po homogenizačním žíhání jsou znázorněny v tab. 8 [3].

3.4.3 Žíhání rekrystalizační

Rekrystalizační žíhání nemá u hořčíkových slitin přílišné využití, protože tyto slitiny se obvykle tvářejí pouze za tepla. Žíhací teploty se pohybují kolem 250 až 350 ºC, přičemž tato teplota se odvíjí od čistoty a stupně tváření. Při překročení těchto teplot dochází k hrubnutí zrna, což vede ke zhoršení mechanických vlastností [3, 26].

3.4.4 Vytvrzování

U neželezných kovů je nejčastějším způsobem tepelného zpracování vytvrzování. Proces vytvrzování je složen z více technologických procesů, které na sebe navazují a vzájemně spolu souvisí tak, že jejich jednotlivé provedení značně ovlivňuje výsledný efekt. Jednotlivými procesy jsou:

- rozpouštěcí žíhání,
- ochlazení,
- stárnutí materiálu [26].

U hořčíkových slitin se provádí vytvrzování jen u soustav, kde pomocí něj lze dosáhnout výrazného nárůstu pevnosti. Ochlazování, které následuje po rozpouštěcím žíhání, se provádí volně na vzduchu nebo ve vroucí vodě. Stárnutí se u hořčíkových slitin používá pouze umělé. U některých slitin se provádí pouze umělé stárnutí, bez rozpouštěcího ohřevu [3].

Tab. 8 Mechanické vlastnosti slitiny MgAl8Zn1 po TZ s ochlazováním na vzduchu [3]

Stav	Teplota [°C]	Doba [h]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{10} [%]	Z [%]
Litý stav			95	170	3	4
Homogenizační žíhání	410-420	8-16	85	260	8	10
Homogenizační žíhání	410-420	8-16				
+ stárnutí	170-205	16	120	260	3	8

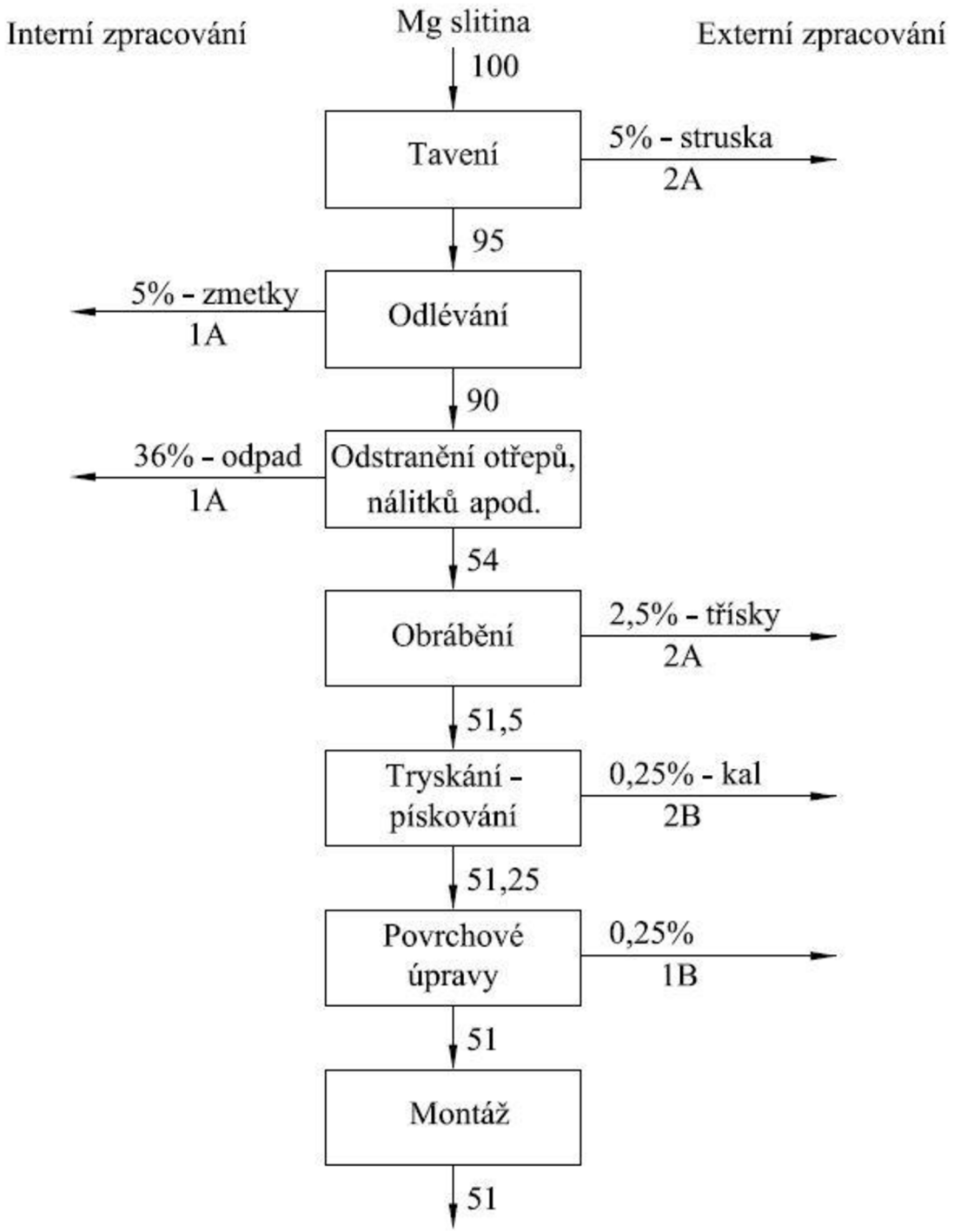
3.5 Recyklace hořčíku a jeho slitin

S nárůstem spotřeby hořčíku bylo nutno začít řešit také otázku jeho recyklace. Hořčík využitý na odsíření ocelí, výrobu litiny nebo na anody, recyklován již není. Nicméně dvě hlavní aplikace hořčíku, a to sice legování hliníku a slitiny hořčíku, je možné alespoň částečně recyklovat. Hlavním podnětem pro recyklaci hořčíku, který je používaný jako legura pro slitiny hliníku, je značná úspora energie. Zatímco na výrobu primárního hořčíku je třeba nejméně 35 kWh/kg, na jeho recyklaci je to pouze okolo 3 kWh/kg [1].

Druhou hlavní oblastí recyklace je recyklace slitin hořčíku. Ta zahrnuje odpad vzniklý při výrobě součástí a hořčíkový šrot. Slitiny hořčíku mají poměrně vysoké množství přísadových prvků. Speciální slitiny mohou obsahovat až 10 % kovů vzácných zemin či vysoký obsah lithia. Avšak průměrný hořčíkový šrot obsahuje 4-13 % Al, 0,1-0,3 % Mn, do 5 % Zn, do 0,4 % Cu a do 1,5 % Si. Na průměrné složení se odráží nejvíce používané slitiny. Přítomnost niklu a mědi je nežádoucí, do šrotu se dostává například z recyklace komponent telefonů a počítačů. Druhotné suroviny hořčíkových slitin lze dělit do následujících kategorií:

- 1A – vysoká kvalita, čistý odpad,
- 1B – vyhozené součástky obsahující např. ocel, hliník ale bez mědi či mosazi,
- 1C – znečištěný, mastný, mokrý šrot, který může obsahovat měď či nikl,
- 2A – tříska vzniklá při obrábění, struska bohatá na kovy (někdy může být dělena na mokrou, mastnou aj.),
- 2B – struska obsahující málo kovů, kal z obrábění,
- 2C – šrot obsahující rafinační soli.

Obr. 5 znázorňuje množství a typ odpadu, který vzniká při procesu výroby součásti ze slitiny hořčíku technologií tlakového lití. Je vidět, že až 40 % vstupní suroviny je čistý odpad, který je možné znovu zpracovat interně ve slévárně. Odpady 1B až 2C se zpracovávají externě v odborných zpracovatelských firmách [1].



Obr. 5 Množství a typ odpadu při procesu výroby součásti ze slitiny hořčíku tlakovým litím [1]

4 Využití slitin hořčíku

Z důvodu snahy snižovat zátěž životního prostředí neustále roste využití lehkých neželezných kovů jako konstrukčních materiálů. Slitiny hořčíku díky svému vysokému poměru R_m/ρ nacházejí uplatnění hned v několika průmyslových odvětvích, mezi které patří například automobilový, letecký či elektrotechnický průmysl. Některé často používané slitiny a jejich chemické složení a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tab. 9.

Tab. 9 Chemické složení a mechanické vlastnosti vybraných slitin [27]

Slitina	**Al [hm. %]**	**Zn [hm. %]**	**Mn [hm. %]**	**Si [hm. %]**	**$R_{p0,2}$ [MPa]**	**R_m [MPa]**	**A [%]**
AZ91	9,2	0,7	0,2	-	150	250	7
AM60	5,8	0,01	0,3	0,01	130	250	14
AS41	4,5	0,2	0,2	1,0	130	250	15

Slitina	**Zr [hm. %]**	**Zn [hm. %]**	**RE [hm. %]**	**Ag [hm. %]**	**Y [hm. %]**	**$R_{p0,2}$ [MPa]**	**R_m [MPa]**	**A [%]**
EZ33	0,6	2,7	3,3	-	-	110	160	2
QE22	0,7	-	2,1	2,5	-	195	260	3
WE54	0,7	-	3,0	-	5,2	170	250	2

4.1 Automobilový průmysl

Automobilový průmysl je bezesporu jedním z hlavních odvětví strojního průmyslu, ve kterém nachází slitiny hořčíku široké uplatnění a automobilové firmy kladou důraz na rozvoj jejich použití [28]. K prvnímu použití slitin hořčíku v automobilovém průmyslu došlo v Německu, kdy roku 1933 profesor Ferdinand Porsche dostal za úkol zkonstruovat pro německou společnost Volkswagen automobil, později všeobecně známý jako „Brouk“. Již u prvního modelu se udává spotřeba hořčíku více jak 20 kg na jeden automobil. Toto vozidlo se stalo velice populárním a celkem se vyrobilo více než 20 milionů kusů, přičemž se odhaduje, že celkem bylo na výrobu tohoto modelu spotřebováno asi 400 000 t hořčíku [29].

V automobilovém průmyslu našly uplatnění zejména slévárenské slitiny hořčíku, ale v dnešní době stále roste také využití slitin ke tváření. Nejčastějšími slitinami hořčíku v tomto průmyslovém odvětví jsou slitiny typu Al-Mg-(Zn, Mn), které patří mezi nejstarší používané slitiny. Proto jsou již cenově dostupné a nabízejí vhodné mechanické vlastnosti. Hořčíkové slitiny se používají především na součásti motoru, převodové skříně, na šasi, litá kola ale v neposlední řadě také v interiéru vozidla. Hlavním důvodem je snížení hmotnosti vozidla, což má přímý dopad na spotřebu paliva a nepřímý dopad na životní prostředí [28]. V minulosti byl průmysl omezen na tvarově složité odlitky, hlavně pro součásti motoru, agregátů a kol, přičemž převažovala technologie tlakového lití, především z ekonomických důvodů [18].

V současné době se klade důraz na snahu nahradit součásti podvozku z hliníkových slitin a oceli hořčíkovými slitinami. U těchto součástí jsou však nezbytné vysoké nároky na pevnost v tahu, houževnatost a únavovou pevnost. Proto se jako nejvhodnější technologie pro výrobu těchto součástí nabízí kování [18].

4.1.1 Konkrétní příklady aplikací v automobilovém průmyslu

- Kryty palivové nádrže (AM60B) – Mercedes-Benz SLK.
  Důvody použití: redukce hmotnosti (cca o 4 kg oproti krytům z oceli), odpadá nutnost dalšího zpracování.

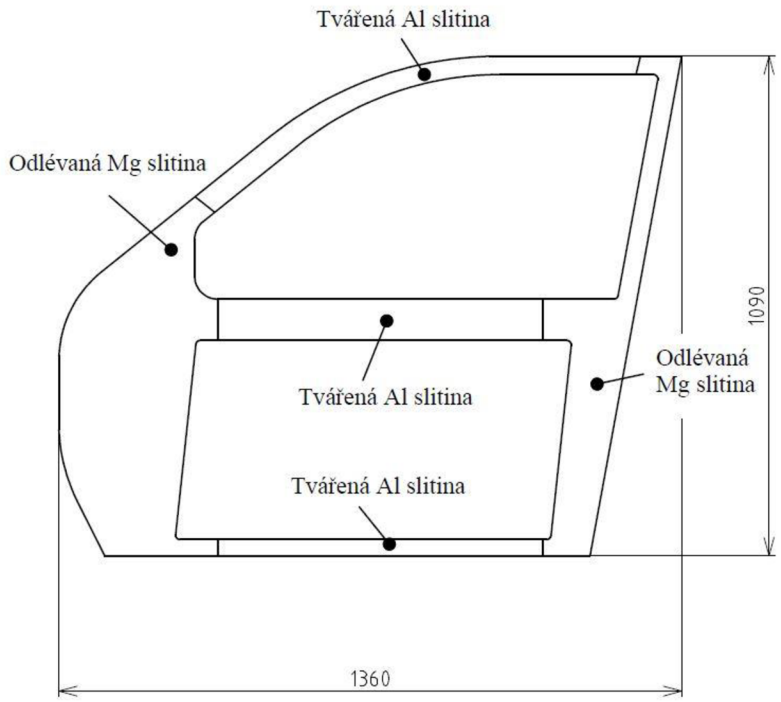
- Palubní deska (AM50) – automobily Cadilac.
  Důvody použití: redukce hmotnosti, rozměrová a montážní přesnost (jedna část nahrazuje celou řadu jednotlivých dílů), možnost využití zjednodušené konstrukce, není nutná povrchová úprava (jedná se o součást do interiéru).

- Rámy sedadel (AM60) – Alfa Romeo Meridian.
  Důvody použití: redukce hmotnosti, deformační vlastnosti, možnost využití zjednodušené konstrukce.

- Sloupek řízení (AZ91D) – automobily Audi.
  Důvody použití: redukce hmotnosti, rozměrová přesnost.

- Dveře automobilů (AM50).
  Důvody použití: redukce hmotnosti.

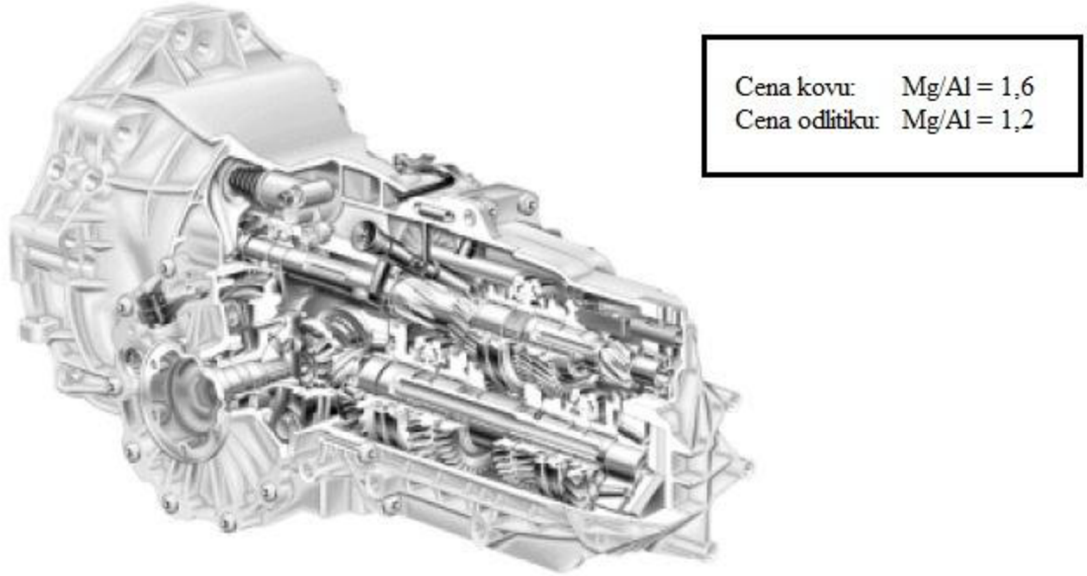
Dveře se často vyrábějí jako kombinace slitin hořčíku se slitinami hliníku. Jedna z možností této konstrukce je zobrazena na obr. 6. Odlitky mohou být menší a mohou mít také tenčí stěny, což vede ke snížení výrobních nákladů a hmotnosti. Naopak z hlediska namáhání se jako kritická místa projevila okenní rám a část u prahu dveří, proto jsou vyráběny ze slitin s vyšší pevností [1, 31].



Obr. 6 Příklad řešení konstrukce dveří [1]

- Převodová skříň (AZ91D) – automobily VW.
  Důvody použití: redukce hmotnosti, tlumení vibrací, tuhost skříně.

Ačkoliv je hořčík dražším kovem než hliník, je zde několik dalších faktorů ovlivňujících výslednou cenu. Například, porovnáme-li slitinu AZ91 s běžně používanou hliníkovou slitinou AlSi9Cu3, výsledné výrobní náklady převodové skříně z hořčíkové slitiny jsou vyšší pouze asi o 20 %. A to i přesto, že cena surovin pro slitinu AZ91 je asi o 60 % vyšší (obr. 7). To je způsobeno větší životností nástrojů a levnějším zpracováním hořčíkových slitin [31].



Obr. 7 Převodovka se skříní z Mg slitiny a porovnání cen s Al slitinou [31]

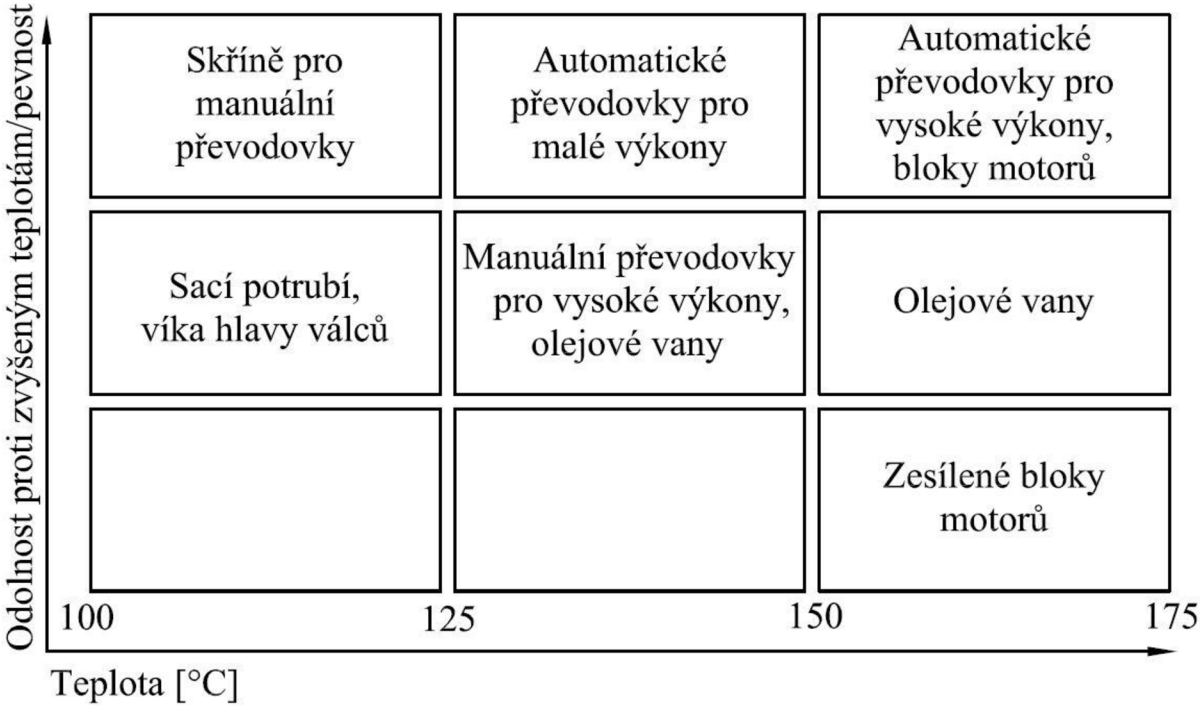
Mezi nejpoužívanější aplikaci slitin hořčíku v automobilovém průmyslu patří kola. Ty mohou být buď litá, nebo kovaná. Kované disky kol mají oproti těm odlévaným několik předností. Porovnání výhod a nevýhod kovaných kol z hořčíkové slitiny ZK30 (používané např. u Audi A8) s litými a s kovanými koly z hliníkových slitin je uvedeno v tab. 10 [1]. Je vidět, že značnou výhodou pro kola z hořčíkových slitin vyrobených kováním, je zejména nízká hmotnost. Toho se s úspěchem využívá například pro kola závodních motocyklů, kde výsledná cena produktu není tak podstatná jako u sériově vyráběných vozidel [31].

Tab. 10 Porovnání kovaných kol z hořčíkových slitin s jinými návrhy [1]

Výhody a nevýhody kovaných kol z hořčíkové slitiny v porovnání s	
litými koly z hořčíkové slitiny	+ 5-10 % úspora hmotnosti při zachování stejného tvaru + vyšší využití z důvodu vyšší pevnosti a tvrdosti + neporézní mikrostruktura bez kavit - vyšší cena
kovanými koly z hliníkové slitiny	+ 10-15% úspora hmotnosti při zachování stejného tvaru - nižší využití z důvodu nižší pevnosti a tvrdosti - horší korozní odolnost - vyšší cena

Nevýhody slitin hořčíku, které jsou pro součásti automobilů nejpodstatnější, jsou zejména špatná korozní odolnost a nízká odolnost proti působení zvýšených teplot. Korozní odolnost se dá do jisté míry zlepšit legováním, avšak neřeší problém galvanické koroze, která vzniká například při styku slitiny hořčíku s jiným kovem. Tento problém je nutné řešit nátěrem či povlakem.

Na obr. 8 jsou uvedeny požadavky na poměr odolnosti za působení zvýšených teplot ku pevnosti, v závislosti na provozních teplotách, pro jednotlivé součásti vyráběné ze slitin hořčíku. Je vidět, že například bloky spalovacích motorů musí pracovat při teplotách okolo 175 °C, v některých případech dokonce až při 200 °C. Proto se pracuje na výzkumu rozvoje slitin, které jsou odolné vysokým provozním teplotám. Některé jsou již na trhu, například upravené slitiny AE a AJ. Hořčíkové slitiny pro tyto aplikace obvykle obsahují hliník pro lepší slévatelnost. Dalšími přísadami je stroncium, vápník a kovy vzácných zemin pro zlepšení odolnosti proti působení vyšších teplot. [30]



Obr. 8 Požadavky součástí na poměr odolnost vůči zvýšeným teplotám/pevnost v závislosti na provozní teplotě [30]

4.2 Letecký průmysl

Další významnou oblastí využívající slitin hořčíku je letecký průmysl. Používání slitin hořčíku v leteckém průmyslu začalo během období druhé světové války. V 50. letech minulého století bylo již využití v konstrukcích letadel široké. Například na výrobu amerického bombardéru B-36 bylo spotřebováno asi 8 600 kg hořčíku, přičemž zhruba polovina byla využita na konstrukční účely. V 70. a 80. letech však spotřeba poklesla z důvodu projevujících se nedostatků v součástech letadel. Byla to zejména špatná odolnost proti korozi, nedostatečná pevnost a malá odolnost proti působení vyšších provozních teplot. Uplatnění slitin hořčíku nebylo tedy tak významné, k čemuž přispěl také výrazný cenový rozdíl v porovnání se slitinami hliníku.

Teprve v 90. letech došlo opět k nárůstu využití slitin hořčíku. Tento trend byl ovlivněn několika faktory. Jedním z nich byl fakt, že nárůst využití slitin hořčíku v automobilovém průmyslu přinesl několik způsobů řešení špatné korozní odolnosti, a to například zvýšením čistoty slitin spolu s vývojem nových technologií povlakování nebo povrchových úprav. Dalším důvodem zvýšení poptávky po slitinách hořčíku v leteckém průmyslu byl vývoj nové generace slitin, které měly vyšší pevnost. Některé z nich se také již používaly na součásti vrtulníků. Například slitina WE54 se používala na převodové skříně vrtulníků, které jsou vystaveny vysokým vibracím, koroznímu prostředí a zvýšeným teplotám.

Mezi další používané slitiny Mg patří slitiny EQ21, EQ22, ZE41, AM50, AM80 a AZ91. Tyto slitiny se používají například na konstrukce sedadel, pedály, kola nebo různé uzávěry. V poslední době hořčíkové slitiny nahrazují součásti dosud vyráběné ze slitin hliníku, jelikož i v leteckém průmyslu se projevuje trend snižování spotřeby paliva, čehož lze dosáhnout právě použitím materiálů s nižší měrnou hmotností, které sníží celkovou hmotnost letounu [31].

4.3 Využití slitin hořčíku v elektrotechnice

Další, dnes již běžnou oblastí využití slitin hořčíku, jsou součástky spotřební elektroniky. Mnoho let platilo přesvědčení, že plasty jsou nejvhodnějším řešením požadavku nízké hmotnosti přenosných elektronických zařízení. Výhodou plastů v těchto aplikacích je kromě nízké ceny zejména velká flexibilita při návrhu složitých skříní a součástí, které je možné vyrobit vstřikováním. Dalším plusem pro plasty je snadná výroba součástí různých barev a textury.

Přes všechny tyto výhody však nachází slitiny lehkých kovů v elektronických zařízeních své uplatnění. Jedním z hlavních důvodů použití hořčíkových slitin je stínění proti elektromagnetické interferenci (EMI). S rostoucím počtem elektronických přístrojů se stále častěji začaly objevovat problémy se ztrátou funkcí přístrojů. Plasty využité jako konstrukční materiály, nemají schopnost stínit EMI, a proto do nich musejí být často přidávány kovové prášky za účelem zlepšení této schopnosti. Proto je v mnoha případech vhodné využít slitiny hořčíku.

Druhý problém použití plastů souvisí s ochranou životního prostředí. Na recyklaci elektronických zařízení je v poslední době kladen velký důraz. Zařízení, obsahující plastové kryty plné různých elektronických součástek, je velmi obtížné recyklovat. Není proto pochyb, že z hlediska recyklace jsou hořčíkové slitiny vhodnějším materiálem. Recyklace hořčíku je navíc vzhledem k jeho nízkému bodu tání velmi ekonomicky efektivní. Dalšími výhodami slitin hořčíku ve srovnání s plasty, které hrají roli v elektronice, jsou lepší tepelná vodivost, vyšší tuhost a lepší schopnost tlumit vibrace přístrojů. Neposledním faktorem při rozhodování volby materiálu je také důraz na vzhled. Někteří zákazníci dávají přednost právě kovovým krytům elektronických přístrojů, jelikož jim dává dojem vysoké kvality a prvotřídního produktu [31].

Častou slitinou pro tyto aplikace je slitina AZ91B případně AZ91D, která je vhodná pro tlakové lití a využívá se např. pro součástí počítačů, kamer, promítacích přístrojů apod. [29]

4.4 Využití hořčíku a jeho slitin pro vojenské účely

Zbrojní průmysl je důležitý zejména v oblasti vývoje slitin hořčíku. Například společnost General Dynamics vyvinula speciální obojživelné vozidlo EFV pro americké námořnictvo. Pro toto vozidlo byla použita speciální slitina Elektron 21. Tato slitina je schopná pracovat při

vyšších teplotách (až 200 °C), má dobrou slévatelnost ale také dobrou korozní odolnost. Při běžných teplotách je mez pevnosti 280 MPa, což je pro srovnání více než například u slitiny AZ91E (200 MPa) [32].

Další významnou slitinou pro vojenská letadla a vrtulníky je slitina WE43. Společně s Elektronem 21 se využívá například u bitevních vrtulníků Sikorsky H-60, Ah-64 Apache nebo u stíhacích letounů F-22, F-35 či F-16. Vojenská letadla operují v náročnějších podmínkách než civilní letouny, proto je nutné, aby slitiny splňovaly přísnější kritéria.

Kromě slitin hořčíku zde nachází uplatnění i čistý hořčík. Je používán pro pyrotechnické výrobky, jako jsou například světlice pro ochranu letadel proti tepelně naváděným raketám [33].

4.5 Využití slitin hořčíku pro sportovní vybavení

Jelikož obliba sportů v současnosti vzrůstá, roste také poptávka po sportovním vybavení pro velkou škálu sportů. Vývoj vybavení umožňuje profesionálním sportovcům zlepšovat své výkony a pro rekreační sportovce se vybavení stává pohodlnějším a snadněji ovladatelným [34]. Slitiny hořčíku jsou využívány například na tenisové rakety, golfové hole, sportovní luky, skokanské tyče a další (obr. 9) [35].

Obr. 9 Příklady využití slitin hořčíku pro sportovní vybavení a) hlava golfové hole, b) rám kolečkových bruslí, c) hlava tenisové rakety, d) rám jízdního kola [35]

Vysoké využití nacházejí hořčíkové slitiny u jízdních kol. Hlavní částí jízdního kola je rám. I zde jsou hlavními důvody použití slitin hořčíku jejich vysoký poměr R_m/ρ a nízká měrná hmotnost. Důležitá je však také schopnost tlumit vibrace, což vede ke komfortnější jízdě. Problém korozní odolnosti je obvykle řešen úpravou povrchu. Nevýhodou, která brání širšímu použití je vysoká cena [34, 35]. Další materiály pro výrobu rámů jízdních kol jsou zejména:

Ocel – patří stále k nejčastějším materiálům pro výrobu rámů jízdních kol. Často používaná je ocel s přísadou chromu a molybdenu. Hlavní předností oceli je především nízká

cena v porovnání s ostatními používanými konstrukčními materiály. Dalšími výhodami jsou však také schopnost tlumit vibrace a dobrá svařitelnost. Nevýhodou rámů z oceli je pak zejména jejich vysoká hmotnost. Tento problém může být částečně redukován použitím trubek o menší tloušťce stěny, to však může vést k problémům při svařování, kdy u tenkostěnné trubky nemusí být vytvořen dostatečně kvalitní svar. Problém také může nastat při větším namáhání na ohyb, kdy tenkostěnné trubky mají menší únosnost [34].

Slitiny hliníku – vyznačují se nižší pevností ve srovnání s ocelí, ale poměr R_m/ρ mají vyšší, což je pro tyto aplikace žádoucí. Většina rámů vyráběných z hliníkových slitin je svařována metodou TIG, což znamená, že se na trhu začaly objevovat teprve poté, co se tato metoda stala ekonomickou. Důležitá je také cena těchto slitin, která je vyšší než u ocelí.

Slitiny titanu – spojují v sobě hned několik výhod, které jsou pro rámy kol žádoucí. Jsou to dobrý poměr R_m/ρ, vynikající odolnost proti korozi a schopnost tlumit vibrace. Nevýhodou je špatná obrobitelnost ale hlavně vysoká cena titanu, která zabraňuje většímu využití [36].

4.6 Ostatní oblasti využití

Další oblastí využití slitin hořčíku jsou součásti ručního nářadí. Zde napomáhají k dosažení vyšší pracovní efektivity a díky své nízké hmotnosti jsou také snadněji přenosné. Nízká měrná hmotnost ve spojení s odolností proti nárazu a schopností tlumit vibrace, a tím i snižovat hlučnost nářadí, dělají ze slitin hořčíku vhodný konstrukční materiál pro širokou škálu profesionálního nářadí. Těchto vlastností se s úspěchem využívá například u:

- krytů řetězových pil,
- válců pneumatických nastřelovaček hřebíků,
- převodovek a motorů ručního nářadí,
- krytů vrtaček [35].

4.7 Využití slitin hořčíku v lékařství

4.7.1 Kovové biomateriály

V současné době existuje velké množství známých kovových biomateriálů používaných pro výrobu náhrad poškozených či nesprávně fungujících částí lidského těla. Požadavky kladeny na tyto materiály jsou vysoké. Hlavní kritéria, která musí biomaterály splňovat jsou:

- jejich mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti musí odpovídat požadované funkci,
- jejich výroba v dané čistotě musí být reprodukovatelná,
- musejí mít schopnost sterilizace beze změny tvaru nebo jejich vlastností,
- při styku s biologickým materiálem si musí udržet své vlastnosti,
- materiály musí být nekarcinogenní a nesmějí způsobovat záněty nebo alergické reakce,
- materiály při styku s krví nesmí způsobit trombózu.

Tradičními kovovými biomaterály jsou korozivzdorné oceli, slitiny titanu a kobaltu. Vedle těchto korozně odolných materiálů zaznamenávají rozvoj také materiály biodegradovatelné [37, 38].

4.7.2 Slitiny hořčíku jako biodegradovatelný materiál

Nejčastěji používaným biodegradovatelným materiálem jsou polymery. Pro některé aplikace však nemusí dosahovat dostatečných mechanických vlastností, proto je v současné

době věnována značná pozornost využití slitin hořčíku jako biodegradovatelných materiálů. Tyto materiály v lidském těle pomalu korodují, přičemž platí, že nesmí být toxické, karcinogenní či alergenní. Dalším požadavkem je, aby docházelo k jejich snadnému vyloučení z lidského organismu přírodní cestou.

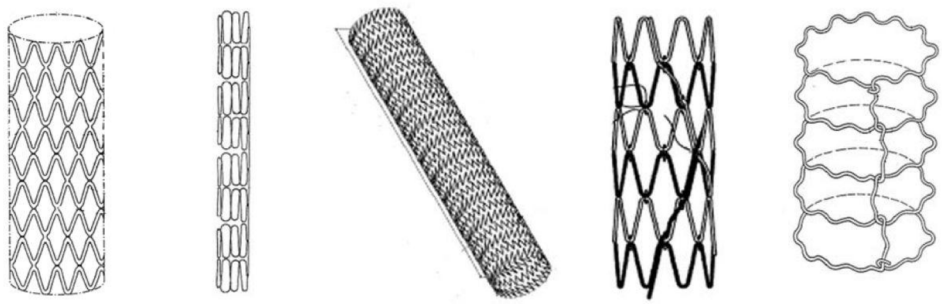
Biodegradovatelné materiály se proto používají zejména pro aplikace kde je jejich funkce pouze dočasná, což jsou například šrouby pro fixování zlomenin. Nevýhodou použití korozně odolného materiálu pro tyto aplikace je, že musí být odstraněn dalším chirurgickým zákrokem. U biodegradovatelného materiálu dochází k postupnému rozkladu a jeho náhradě uzdravenou lidskou tkání, čímž odpadá nutnost dalšího operativního zákroku pro jeho vyjmutí. Zde je tedy špatná korozní odolnost hořčíkových slitin využita ve prospěch.

Srovnání vlastností materiálů používaných pro fixaci zlomenin je uvedeno v tab. 11, ze které je vidět, že pevnost hořčíkových slitin je výrazně vyšší než u biodegradovatelných polymerů, což je pro fixace zlomenin důležité. Další výhodou hořčíkových slitin je fakt, že hodnoty měrné hmotnosti, pevnosti i modulu pružnosti jsou bližší hodnotám lidských kostí ve srovnání s ostatními materiály. Hodnota modulu pružnosti je v tomto případě velmi důležitá, protože použití materiálu s výrazně odlišnou hodnotou modulu pružnosti může vést k problémům se správným hojením fixovaných kostí [37, 38].

Tab. 11 Vlastnosti materiálů pro fixaci zlomenin v porovnání s lidskou kostí [38]

Materiál	**Měrná hmotnost [kg·m^{-3}]**	**Pevnost v tahu [MPa]**	**Modul pružnosti [GPa]**
Slitiny titanu	~ 4500	600-1100	110
Korozivzdorné oceli	~ 8000	600-1000	200
Polymery	~ 1000	~30	~2
Slitiny hořčíku	~ 2000	150-450	45
Lidská kost	~ 2000	30-280	5-20

Další možností využití slitin hořčíku v lékařství je na stenty. Stenty jsou výztuže cév, močových nebo jícnových trubic, které mají za úkol zajistit jejich stálou světlost. Mají schopnost expanze a po jejich zavedení katetry na požadované místo dojde k jejich rozvinutí a vtlačení do stěny cévy, močové trubice apod. Jejich plášť má strukturu různě složité mřížky (obr. 10) a konce jsou otevřené.



Obr. 10 Možné tvary stentů [37]

I zde se však vyskytuje při použití titanových slitin nebo korozivzdorných ocelí problém, že po splnění svých funkcí je stent nutné vytáhnout, protože dlouhodobé umístění stentu v těle vede ke změnám okolních tkání.

Pro výrobu stentů jsou tedy používány různé slitiny hořčíku. U slitin s hliníkem jako legujícím prvek se vedou diskuze, kvůli spojitosti hliníku s onemocněním mozku. Slitiny jsou voleny nejen na základě mechanických a technologických vlastností, ale zřetel je brán také na toxicitu jednotlivých přísad. Nejméně toxickými prvky jsou hořčík a vápník. Množství přísad podle prvků, které mohou být toxické pro průměrného člověka, udává tab. 12. Slitiny hořčíku používané na výrobu stentů jsou například [37, 39]:

- MgAl3Zn1,
- MgAl5Mn0,5,
- MgAl2RE1,
- MgY5Nd3,5.

Tab. 12 Množství vybraných prvků, které je již považováno za toxické [37]

Prvek	**Toxická dávka**
Železo (Fe)	20-30 mg/kg
Hořčík (Mg)	500 mg/den
Vápník (Ca)	2500 mg/den
Zinek (Zn)	150 mg
Mangan (Mn)	11 mg/den
Lithium (Li)	40 mg/den

U biodegradovatelných materiálů je nutné, aby se v lidském organismu rychle odbourávaly, proto je žádoucí aby byla korozní rychlost poměrně vysoká. U stentu z hořčíkové slitiny o tloušťce 1 mm je korozní rychlost až v desítkách milimetrů za rok.

Při korozi hořčíku dochází k anodické (4-1) a katodické reakci (4-2). Během anodické reakce dochází k rozpouštění kovu, jedná se o reakci oxidační. Při katodické reakci dochází k redukci vody za vzniku vodíku a iontů OH^-, tedy reakci redukční.

$$Mg \rightarrow Mg^{2+} + 2e^- \tag{4-1}$$

$$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^- \tag{4-2}$$

Tělní tekutiny jsou zhruba neutrální vodné roztoky, proto se na povrchu hořčíkových slitin vytváří pasivní vrstva hydroxidu hořečnatého, která korozi výrazně zpomaluje.

$$Mg^{2+} + 2OH^- \rightarrow Mg(OH)_2 \tag{4-3}$$

Tuto vrstvu však porušují chloridové ionty Cl^-, které jsou obsaženy v tělních tekutinách, a proto je rychlost koroze stentů vysoká. Je třeba však dát pozor na plynný vodík, který se při reakcích uvolňuje, protože tělní tekutiny jsou schopny jej absorbovat jen do určité míry. Pokud by vznikal příliš rychle, mohlo by dojít k tvorbě vodíkových kapes v místě styku stentu s tkání, které by zpomalily hojení a tím by došlo k zániku stentu dříve, než by bylo žádoucí.

Je však možné korozní rychlost ovlivnit chemickým složením slitiny. Legující prvky mohou korozi urychlovat nebo naopak zpomalovat. Mezi prvky, které korozi hořčíkových slitin výrazně urychlují, patří železo, nikl a měď [37].

4.8 Využití hořčíku pro skladování vodíku

Vodík je stále častěji uvažován jako palivo, které by mohlo v budoucnosti nahradit klasická paliva pro pohon automobilů. Výhodou spalování vodíku je fakt, že energie, kterou jsme schopni z 1 kg vodíku získat, je asi 2,6krát větší ve srovnání s množstvím energie z benzínu. Velkou výhodou vodíku je také jeho ekologičnost. Spalování vodíku neprodukuje žádný oxid uhličitý, pouze vodu. Jistou nevýhodou v těchto aplikacích však může být jeho nízká měrná hmotnost, která je pro zkapalněný vodík pouze 70 $kg \cdot m^{-3}$, což je asi 10krát méně než u benzínu. Pro ujetí stejné vzdálenosti s těmito rozdílnými palivy je třeba vodík o asi čtyřikrát větším objemu, což vede k potřebě skladovat co největší hmotnost vodíku v co nejmenším objemu. Toho se dosahuje třemi hlavními metodami uchovávání vodíku:

- zkapalnění vodíku a následné uchování v tlakových nádobách,
- stlačení vysokým tlakem a následné uchování v zásobnicích, které jsou tepelně izolovány,
- uchovávání v pevném stavu.

Pro prototypy vozidel na vodíkový pohon se používají zejména první dvě metody. Nevýhodou je však vysoká energetická náročnost stlačení. Pro větší rozšíření vodíkového paliva je vhodné i z důvodu bezpečnosti používat nové metody jeho uchování. Perspektivním se jeví zejména uchování ve formě hydridů lehkých kovů, které jsou relativně stálé, a proto jsou bezpečnou alternativou uchování vodíku.

Hořčík tvoří s vodíkem hydrid hořečnatý MgH_2, který obsahuje 7,6 hm. % vodíku, což je, vzhledem k nízké měrné hmotnosti vodíku, poměrně vysoké množství. Některé složitější hydridy sice obsahují ještě více vodíku (např. $LiBH_4$), avšak hořčík je cenově dostupnější než jiné lehké kovy (mimo hliník).

Nevýhodou je, že k rozkladu MgH_2 na hořčík a vodík dochází při vysokých teplotách (za normálního tlaku asi 300 °C), což je nepříznivé pro praktické využití hydridu jednak z důvodu vysoké energetické náročnosti ohřevu, ale také kvůli nedostatečné rychlosti uvolňování vodíku. Proto se v současné době pracuje na rozvoji destabilizace hydridu hořečnatého, čímž by došlo ke snížení teploty rozkladu. Dosud vyzkoušené metody, vedoucí k destabilizaci jsou [37, 38]:

- příprava hydridu s nanokrystalickou strukturou (krystaly o velikosti menší než 100 nm),
- přidání přechodných kovů nebo kovů vzácných zemin (Ni, Fe, Cr a RE),
- přidání katalyzátorů rozkladu hydridu hořečnatého (V_2O, Fe_2O_3, Al_2O_3, ZrF4 aj.).

5 Závěr

Čistý hořčík se jako konstrukční materiál téměř vůbec nepoužívá z důvodu jeho špatných vlastností, které je však možné zlepšit legováním.

Slitinám hořčíku byla v posledních letech věnována značná pozornost. Dosáhlo se zlepšení mechanických i technologických vlastností a tím se rozšířila i oblast použitelnosti hořčíkových slitin jako konstrukčních materiálů. Vzhledem k výhodám, které slitiny hořčíku nabízejí, je oblast jejich využití v dnešní době již široká. Stále se však na slitiny spotřebuje pouze jedna třetina světové produkce hořčíku. Vývoje bylo v posledních letech dosaženo také v oblasti tvářených slitin hořčíku, a to například pro kované disky kol. Bezesporu hlavní výhodou hořčíkových slitin jako konstrukčních materiálů je jeho nízká měrná hmotnost. Avšak jako konstrukční materiál je využíván také z důvodu schopnosti tlumit vibrace a dobré obrobitelnosti, která snižuje celkové náklady ve srovnání se slitinami hliníku, které jsou v současnosti v některých odvětvích nahrazovány právě slitinami hořčíku. Nevýhodami těchto slitin je pak zejména špatná korozní odolnost, stále ještě vyšší cena ve srovnání se slitinami hliníku a špatná odolnost proti zvýšeným teplotám.

Průmyslové oblasti, kde hořčíkové slitiny nacházejí největší uplatnění, jsou automobilový a letecký průmysl, kde přispívají ke snížení celkové hmotnosti, což vede ke snížení spotřeby paliva. Snižování spotřeby paliva je v současnosti velkým trendem, jelikož má také nepřímý dopad na životní prostředí, což jsou problémy, které jsou velice aktuální. Dále se hořčíku často využívá pro součásti elektroniky, jako jsou fotoaparáty, mobilní telefony, notebooky nebo kamery a nejrůznějšího elektrického a ručního nářadí.

Naopak hlavní nevýhody hořčíkových slitin, a to sice špatné korozní odolnosti, lze využít v lékařství pro výrobu fixací zlomenin nebo na výrobu stentů. Pro tyto aplikace je důležitou vlastností netoxicita hořčíku a jeho snadné vylučování z lidského organismu. Další moderní aplikací hořčíku je pro skladování vodíku, což je oblast kde se v současnosti, vzhledem ke stále aktuálnější možnosti využití vodíku jako alternativního paliva, provádí intenzivní výzkum.

6 Seznam použitých zdrojů a literatury

[1] KAINER, K.U. *Magnesium alloys and technologies*. Weinheim: Wiley-VCH, 2003. 285 s. ISBN 3-527-30570-X

[2] SEDLÁČEK, V. *Neželezné kovy a slitiny*. 1. vyd., Praha: SNTL, 1979. 398 s.

[3] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd., Brno: CERM, 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3

[4] VOJTĚCH, D. *Kovové materiály*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 2006. 136 s. ISBN 80-7080-600-1

[5] DRÁPALA, J. *Hořčík, jeho slitiny a binární systémy hořčík - příměs: Magnesium, its alloys and Mg - admixture binary systems*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2004, 172 s. ISBN 80-248-0579-0.

[6] Současné trendy ve zpracování hořčíkových slitin tvářením. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 12.10.2005 [cit. 2015-02-05]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/soucasne-trendy-ve-zpracovani-horcikovych-slitin-tvarenim.html

[7] Chemistry in Its Element - Magnesium. *The Royal Society of Chemistry* [online]. © 2015 [cit. 2015-02-07]. Dostupné z: http://www.rsc.org/chemistryworld/podcast/Interactive_Periodic_Table_Transcripts/Magnesium.asp

[8] Magnesium - Element information, properties and uses. *The Royal Society of Chemistry* [online]. © 2012 [cit. 2015-02-07]. Dostupné z: http://www.rsc.org/periodic-table/element/12/magnesium

[9] RIZLEY, J. H. Magnesium processing. *Encyclopedia Britannica* [online]. 22.8.2013 [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: http://www.britannica.com/EBchecked/topic/356969/magnesium-processing

[10] Výskyt prvků v zemské kůře. *Periodická soustava prvků* [online]. © 2009-2015 [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: http://www.prvky.com/zemska-kura.html

[11] Hořčík, chemický prvek Mg, popis a vlastnosti. *Periodická soustava prvků* [online]. © 2009-2015 [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: http://www.prvky.com/12.html

[12] DORAZIL, E. *Nauka o materiálu II. část*. 2. vyd. Brno: VUT Brno, 1976, 265 s. ISBN 80-214-1028-0.

[13] Fyzikální základy vědy o materiálu. *Pedagogická fakulta MU* [online]. © 1998 - 2013 [cit. 2015-02-11]. Dostupné z: http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/

[14] Magnesium Metal Market Overview. *MMTA* [online]. 2013 [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: http://www.mmta.co.uk/magnesium-market-overview

[15] KUTINOVÁ, B. *Technický naučný slovník E-I. II. díl*. 2. dopln. vyd. Praha: SNTL, 1982, 436 s.

[16] RIZLEY, J. H. Magnesium processing: Electrolysis. *Encyclopedia Britannica* [online]. 6.8.2009 [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: http://www.britannica.com/EBchecked/topic/356969/magnesium-processing/82155/Electrolysis

[17] KURSA, M. a I. SZURMAN. *Materiály pro jadernou techniku* [online]. 2013 [cit. 2015-03-01]. ISBN 978-80-248-3377-4. Dostupné z: http://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-3-materialove-izenyrstvi/materialy-pro-jadernou-techniku/Szurman_Kursa_Materialy-pro-jadernou-techniku.pdf

[18] GREGER, M., V. KARAS, M. VLČEK a B. KUŘETOVÁ. Výkovky z hořčíkových slitin a jejich využití v automobilovém průmyslu. *Hutnické listy* [online]. 2008, č. 2 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: http://www.hutnickelisty.cz/userdata/articles/15/hl2_2008-9_vykovky-z-horcikovych-slitin-a-jejich-vyuziti-v-automobilovem-prumyslu.pdf

[19] MACEK, K. a P. ZUNA. *Nauka o materiálu*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999, 209 s. ISBN 80-01-01507-6.

[20] PTÁČEK, L. Slitiny hořčíku – současný stav vývoje a použití. In: *METAL 2001* [online]. Ostrava, 2001 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: http://metal2013.tanger.cz/files/proceedings/metal_01/papers/204.pdf

[21] VELIČKOVÁ, E. *Stroje a zařízení* [online]. [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: http://www.fbi.vsb.cz/export/sites/fbi/040/.content/sys-cs/resource/PDF/NaukaMatSkripta.pdf

[22] ČSN 42 0055. *Neželezné kovy. Číselné označování těžkých a lehkých neželezných kovů*. 1.4.1978. Dostupné z: http://csnonline.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=3559

[23] ČSN EN 1754. *Hořčík a slitiny hořčíku - Anody, ingoty a odlitky z hořčíku a slitin hořčíku - Označování*. 1.1.2000. Dostupné z: https://csnonline.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=56103

[24] NĚMEC, M. a J. PROVAZNÍK. *Slévárenské slitiny neželezných kovů*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2008, 137 s. ISBN 978-80-01-04116-1.

[25] ČSN 42 1331. *Odpady neželezných kovů a jejich slitin*. 1.5.1991. Dostupné z: https://csnonline.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=27892

[26] KRAUS, V. *Teorie tepelného zpracování a slinování* [online]. [cit. 2015-03-12]. Dostupné z: http://tzs.kmm.zcu.cz/TZSprcelk.pdf

[27] KAŠPAROVÁ, E. Jediná slévárna hořčíkových slitin v ČR. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 12.02.2014 [cit. 2015-03-12]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/jedina-slevarna-horcikovych-slitin-v-cr.html

[28] ČÍŽEK, L., R. KOŘENÝ, A. HERNAS, I. JUŘIČKA a S. LASEK. Možnosti využití odlitků z hořčíkových slitin v automobilovém průmyslu. In: *METAL 2002* [online]. Hradec nad Moravicí, 2002 [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: http://konsys-t.tanger.cz/files/proceedings/metal_02/papers/142.pdf

[29] ČECH, J., I. JUŘIČKA a P. BOUCNÍK. Použití hořčíkových slitin ve slévárenství. In: *CO-MAT-TECH* [online]. Trnava, 1997 [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: http://www.explat.cz/files/pouziti_mg_slitin_ve_slevarenstvi.pdf

[30] BLAWERT, C., N. HORT a K.U. KAINER. Automative applications of magnesium and its alloys. In: *Trans. Indian Inst. Met.* [online]. 2004 [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: http://www.igcar.ernet.in/transiim/2004/vol57-4overview2.pdf

[31] KAINER, K. U. *Magnesium alloys and their applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2000, 798 s. ISBN 3-527-30282-4.

[32] JEAL, N. High-Performance Magnesium. *Advanced Materials & Processes* [online]. 2005, č. 9 [cit. 2015-04-02]. Dostupné z: http://www.asminternational.org/documents/10192/1882931/amp16309p065.pdf/2eea78b4-8417-4e95-bf5b-98041cc3209f

[33] Military. *Magnesium Elektron* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: http://www.magnesium-elektron.com/markets/aerospace/military

[34] DONG, Edited by Hanshan. *Surface engineering of light alloys aluminium, magnesium and titanium alloys*. Boca Raton: CRC Press, 2010, 680 s. ISBN 978-184-5699-451.

[35] GUPTA, M. a M. L. S. NAI. *Magnesium, magnesium alloys, and magnesium composites*. New York: John Wiley, c2011, xvii, 257 p. ISBN 978-047-0494-172.

[36] Bicycle frame. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2013 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Bicycle_frame

[37] VOJTĚCH, D., H. ČÍŽOVÁ, I. POSPÍŠILOVÁ a K. VOLENEC. Struktura a vlastnosti slitin hořčíku pro medicínské aplikace. In: *METAL 2005* [online]. Hradec nad Moravicí, 2005 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: http://konference.tanger.cz/data/metal2005/sbornik/papers/102.pdf

[38] VOJTĚCH, D., V. KNOTEK, J. ČAPEK a J. KUBÁSEK. Hořčík - kov pro medicínu i pro skladování vodíku. In: *Chem. listy* [online]. 2011 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2011_09_678-683.pdf

[39] Angioplastiky koronárních cév a implantace stentů. *IKEM Klinika kardiologie* [online]. © 2009 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: http://www.ikem-kardiologie.cz/cs/pro-pacienty/vysetreni-a-zakroky/angioplastiky-koronarnich-cev-a-implantace-stentu/

7 Seznam použitých zkratek a symbolů

A	Tažnost	[%]
ASTM	American Society for Testing and Materials	
EFV	Expeditionary Fighting Vehicle	
EMI	Electromagnetic interference	
KU	Nárazová práce pro zkušební tyč s U-vrubem	[J]
m	Schmidtův faktor	[-]
NŽK	Neželezné kovy	
RE	Rare Earths	
R_m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu v tahu	[MPa]
TIG	Tungsten Inert Gas	
Z	Kontrakce	[%]
ρ	Měrná hmotnost	[$kg \cdot m^{-3}$]
σ_k	Mez kluzu v tahu	[MPa]
τ_{kr}	Krtitické skluzové napětí	[MPa]