



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

VLIV VÝROBY A LEGOVÁNÍ NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI HOŘČÍKOVÝCH SLITIN

INFLUENCE OF FABRICATION AND ALLOYING ON MAGNESIUM ALLOYS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Jakl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miroslava Horynová, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Student: **Tomáš Jakl**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Miroslava Horynová, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

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

Vliv výroby a legování na mechanické vlastnosti hořčíkových slitin

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem studenta bude sepsání literární rešerše na téma Vliv výroby a legování na mechanické vlastnosti hořčíkových slitin. Při sepisování práce se student seznámí s nejpoužívanějšími typy hořčíkových slitin z hlediska jejich chemického složení a vlivem výroby na výslednou mikrostrukturu a mechanické vlastnosti těchto slitin. Na závěr bude na základě literární rešerše provedeno srovnání jednotlivých materiálů a posouzení jejich vhodnosti pro konkrétní aplikace.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je vypracovat přehled nejpoužívanějších hořčíkových slitin na základě jejich chemického složení a posoudit vliv výroby na výslednou mikrostrukturu a mechanické vlastnosti. V závěru by měl student na základě získaných informací posoudit vhodnost jednotlivých materiálů (s ohledem na chemické složení a způsob výroby) pro konkrétní aplikace. Předpokládá se samostatné vyhledávání a zpracovávání dostupných informací studentem a následné zpracování přehledné rešerše na odpovídající úrovni.

Seznam doporučené literatury:

AVEDESIAN, M., BAKER, H. ASM Speciality Handbook – Magnesium and magnesium alloys. Ohio, USA: ASM International, 1999. 314s. ISBN 0871706571.

GHALI, E. Corrosion Resistance of Aluminium and Magnesium Alloys-Understanding, Performance and Testing. New Jersey: John Wiley and Sons, 2010. 719s. ISBN 9780471715764.

KAINER, K. Magnesium-Alloys and Technology, Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003. 285s. ISBN 9783527305704.

DRÁPAL, J., KUCHAR, L., TOMAŠEK, K., TROJANOVA, Z. Hořčík, jeho slitiny a binární systémy hořčík-příměs. Ostrava: VŠB Ostrava, 2004. 172 s. ISBN 80 248 0579-0.

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

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

V této bakalářské práci jsou porovnávány mechanické vlastnosti hořčíkových slitin v závislosti na výrobě a složení. První část se zabývá čistým hořčíkem a jeho vlastnostmi. Druhá část obsahuje popis jednotlivých legur a přehled metod výroby. Třetí část se zabývá vybranými slitinami. Práce obsahuje fotografie mikrostruktur slitin, údaje o mechanických vlastnostech a jejich vzájemné srovnání.

Klíčová slova

Hořčík, hořčíkové slitiny, mechanické vlastnosti, mikrostruktura

Abstract

This bachelor thesis compares mechanical properties of magnesium alloys in dependence on their composition and fabrication. The first part deals with a pure magnesium and its properties. The second part contains information about alloying elements and an overview of the fabrication methods. The third part consists of different magnesium alloys. The thesis contains photographs of microstructures, a review of mechanical properties and their comparison.

Key words

Magnesium, magnesium alloys, mechanical properties, microstructure

Bibliografická citace

JAKL, T. *Vliv výroby a legování na mechanické vlastnosti hořčíkových slitin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 35 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslava Horynová, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Vliv výroby a legování na mechanické vlastnosti hořčíkových slitin* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Brně dne 25.5.2018

.....

Tomáš Jakl

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucí mé bakalářské práce Ing. Miroslavě Horynové, Ph.D. za odborné rady, připomínky a trpělivost při vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během všech let mého studia.

Obsah

Úvod.....	1
1. Hořčík	2
1.1. Historie	2
1.2. Využití	2
1.3. Vlastnosti čistého hořčíku	3
2. Hořčíkové slitiny.....	5
2.1. Přísadové prvky hořčíkových slitin	5
2.2. Značení hořčíkových slitin	6
2.2.1. Dle ASTM	6
2.2.2. Dle ČSN	8
2.2.3. Dle ČSN EN	9
2.3. Způsoby výroby hořčíkových slitin	9
2.3.1. Metody odlévání.....	10
2.3.2. Metody tváření	13
3. Vybrané slitinové systémy	15
3.1. Mg-Al-Zn.....	15
3.2. Slitiny s obsahem PVZ	19
3.2.1. Mg-Al-PVZ	19
3.2.2. Mg-Zn-Al-PVZ	19
3.2.3. Mg-Zn-PVZ.....	22
3.3. Mg-Al-Si.....	23
3.4. Mg-Zn-Zr.....	24
3.5. Mg-Zn-Mn.....	26
4. Diskuze	29
5. Závěry	30
6. Seznam použité literatury	31

Úvod

Hořčíkové slitiny nás provázejí v každodenním životě a jsou velmi perspektivní. Hořčík má dobré slévárenské vlastnosti, a i proto se hořčíkové slitiny využívají při výrobě mobilních telefonů, notebooků nebo fotoaparátů. Díky tomu, že má hořčík nejnižší hustotu ze všech konstrukčních kovů, nalezne své uplatnění v aplikacích, kde je cílem nízká výsledná hmotnost. Čím dál více se využívají hořčíkové slitiny v automobilovém nebo leteckém průmyslu, protože nižší hmotnost znamená nižší spotřebu paliva a méně škodlivých emisí. Atraktivní vlastnosti hořčíku se využívají i ve sportovním odvětví – například pro výrobu rámu jízdních kol, kde se využije jeho dobrá měrná pevnost nebo schopnost tlumit nárazy a vibrace. Trend spotřeby hořčíkových slitin je stoupající, a protože jsou relativně dobře recyklovatelné, nemusíme se obávat výrazného ekologického zatížení. Nevýhodou je však jejich horší odolnost proti korozi a nákladná těžba hořčíku.

Tato práce se zabývá metodami výroby a vlivem legujících prvků na mechanické vlastnosti vybraných hořčíkových slitin. Nejpoužívanější metodou výroby je tlakové lití, které je ekonomické a efektivní. Perspektivní jsou také metody tváření, například metoda ECAP, kterou lze dosáhnout téměř dvojnásobných hodnot mechanických vlastností v porovnání s litím.

1. Hořčík

Hořčík (Mg) je nejlehčí ze všech konstrukčních kovů. Tvoří základ pro komerční slitiny, které našly využití v širokém spektru aplikací. Je to hojně zastoupený prvek v zemské kůře – až 2,7 %. Mg se na světě nevyskytuje ve své čisté podobě, avšak jeho sloučeniny se nachází po celé planetě. Zdroje Mg se dělí na oxidické a chloridové. Mezi nejvýznamnější oxidické zdroje patří Magnezit (MgCO_3) s obsahem Mg 28,8 %, jehož světově významná naleziště se nacházejí například na Slovensku, Dolomit ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) s obsahem Mg 13,2 %, Serpentin ($3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), který obsahuje 26,3 % Mg a je také považován za perspektivní zdroj. Mezi nejvýznamnější chloridové zdroje pak patří Karnalit ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) s obsahem Mg 8,8 %, Bischofit ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Velmi významným zdrojem je například mořská voda, ze které se Mg získává elektrolýzou a představuje téměř nevyčerpatelný zdroj. Například Mrtvé moře obsahuje 13 % MgCl_2 [1, 2].

1.1. Historie

První zmínky o hořčíku jako o kovu učinil sir Humphrey Davy a jsou z roku 1808, avšak byl známý pouze jako oxid. V roce 1828 se podařilo francouzskému vědci Bussyemu hořčík izolovat. Následně v roce 1833 provedl Michale Faraday první elektrolytickou redukci Mg z chloridu. V polovině 19. století se začal Mg vyrábět pro komerční účely a jeho produkce celosvětově rostla. Začátkem roku 1900 světová produkce dosáhla 10 tun za rok. To se však změnilo během První světové války, kdy jeho produkce rapidně stoupla na cca 3 000 tun ročně kvůli zvýšené poptávce ve zbrojním průmyslu. Po skončení války produkce lehce klesla, ale vzápětí s Druhou světovou válkou znovu vzrostla na cca 228 000 tun ročně. Pak však nastal dramatický pokles. Po zklidnění ekonomické a politické situace se produkce opět začala zvyšovat a roste dodnes. V roce 1998 byla spotřeba Mg 360 000 tun [1].

1.2. Využití

Hořčík má široké spektrum využití. Například v pyrotechnice, v chemickém a automobilovém průmyslu či v metalurgii [1].

V pyrotechnice se používá prášek ze slitiny Mg-Al, který obsahuje až 30 % Al. Tento prášek hoří zářivě bílým světlem, a proto bylo jeho první využití právě v pyrotechnice, v ohňostrojích, zápalných zařízeních nebo třeba při fotografování [1].

V oblasti metalurgie se Mg používá ve výrobě tvárné litiny, kde napomáhá k odstranění síry a k modifikaci tvaru grafitu na kuličkový, což výrazně zlepšuje tvárnost a pevnost. Rovněž se používá k odsíření ocelí. V kombinaci s vápníkem se podílí na procesu odstranění Bi z Pb (Betterton-Kroll proces). Zdaleka největší využití Mg je jako legující prvek ve slitinách Al, kam se přidává, aby zlepšil pevnost a korozivzdornost. Také se používá jako přísada do zinkových slitin vyrobených tlakovým litím pro zlepšení mechanických vlastností [1].

V chemickém průmyslu se Mg využívá k výrobě složitých a speciálních organických a organokovových sloučenin. Také se používá jako neutralizér v mazacích olejích. Z elektrochemických aplikací se hořčík a jeho slitiny využívají jako katodická ochrana nebo k výrobě baterií [1].

Při konstrukčním využití Mg se uplatňují jeho atraktivní vlastnosti a je využíván v mnoha konstrukčních odvětvích. Využívá se například u rychle pohybujících se součástí, protože má

nízkou hustotu, a tedy i setrvačnost. Díky nízké měrné hustotě a dobrým vlastnostem lze použít na výrobu součástí méně materiálu při zachování dostatečných mechanických vlastností. Tím pádem se ušetří materiál, do jisté míry se sníží výrobní časy, a především klesne hmotnost, která hraje velkou roli v automobilovém průmyslu, protože s nižší finální hmotností vozidla klesne spotřeba a produkované emise SO_x, CO₂ a NO_x. Hořčíkové slitiny se také využívají v letectví například na výrobu sedaček a výztuží. V automobilovém průmyslu se využívají například k výrobě kol, výztužných rámců nebo skříní motorů a skříní převodovek. Svě využití naleznou i ve sportovním odvětví například pro výrobu cyklistických komponentů a rámců [1, 3, 4].

1.3. Vlastnosti čistého hořčíku

Hořčík vykazuje nejnižší hustotu ze všech konstrukčních kovů, takže jednou z jeho hlavních výhod je nízká hmotnost. Mezi další výhody patří vysoká pevnost, dobrá svařitelnost a relativně dobrá korozivzdornost velmi čistého hořčíku. Má také dobrou slévateľnost, a je proto vhodný pro vysokotlaké lití. V porovnání s polymerními materiály má lepší mechanické vlastnosti, odolnost proti stárnutí, tepelnou a elektrickou vodivost a je recyklovatelný. Mezi jeho nevýhody se řadí nízká hodnota modulu pružnosti, nízká tvrdost, poměrně velká smršťivost při tuhnutí a vysoká chemická reaktivita [1, 3].

Hořčík má hexagonální těsně uspořádanou mřížku (HCP) a její parametry za pokojové teploty jsou $a = 0,32092$ nm a $c = 0,52105$ nm. Kdyby byly atomy jednotlivých vrstev dokonalými koulemi, byl by poměr $a/c = 1,633$, což je považováno za ideální poměr. V reálných podmínkách za pokojové teploty je poměr roven 1,6236 tedy téměř ideální. Dále jsou uvedeny základní fyzikální vlastnosti pro čistý hořčík [1, 2, 4].

Protonové číslo: 12

Atomový poloměr: 0,320 nm

Hustota: 1,738 g/cm³

Bod tání: 650±1 °C

Bod varu: 1090 °C

Modul pružnosti v tahu: 40 GPa

Modul pružnosti ve smyku: 17 GPa

V tabulce 1 jsou uvedeny základní mechanické vlastnosti čistého hořčíku v závislosti na způsobu výroby a použitém tepelném zpracování. Nejvyšší hodnoty pevnostních charakteristik a tvrdosti nalezneme u válcovaného plechu. U vyžíhaného válcovaného plechu tyto vlastnosti poklesnou, avšak vzroste tažnost. Nejnižší mechanické vlastnosti pak vykazuje hořčík lité do pískové formy. [1, 2]

Tab. 1 Mechanické vlastnosti čistého hořčíku při 20 °C [1, 2]

Typ výroby	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Mez kluzu – tah [MPa]	Mez kluzu – tlak [MPa]	Tažnost [%]	Tvrдость HB
lití do pískové formy	90	21	21	2–6	30
protlačování (extruze)	165-205	69-105	34-55	5–8	35
válcovaný plech	180-220	115-140	105-155	2–10	45-47
Válcovaný plech – žíhaný	160-195	90-105	69-83	3–15	40-41

2. Hořčíkové slitiny

2.1. Přísadové prvky hořčíkových slitin

Hořčík se v podstatě nevyužívá ve své čisté podobě, téměř vždy je aplikován ve formě slitiny. Nejčastěji se využívá ve spojení s hliníkem, zinkem, manganem, zirkoniem, stříbrem a thoriem. Dále jsou uvedeny nejčastěji používané legující prvky a jejich vlivy [1].

Hliník (Al): má nejpozitivnější účinek na Mg. Zlepšuje tvrdost a pevnost a rozšiřuje pásmo tuhnutí, což je výhodné při slévání. Optimální zastoupení Al je 6 %, což zajistí optimální kombinaci houževnatosti a pevnosti. Je to nejvíce využívaný legující prvek u hořčíkových slitin. Avšak tvoří nestabilní intermetalickou fázi $Mg_{17}Al_{12}$ [1, 2].

Zinek (Zn): je podobně jako Al velmi efektivní legura. Používá se v kombinaci s Al, aby zlepšil pevnost za pokojové teploty. Pokud je Zn více než 1 %, zvyšuje smrštivost a následný výskyt pórů ve slitinách, kde je Al zastoupeno 7-10 %. Zn se kombinuje například se Zr nebo Th, což umožní precipitační vytvrzování, a tedy zvýší celkovou tvrdost. Zn také pozitivně přispívá ke zvýšení korozivzdornosti a pomáhá překonávat škodlivé účinky Ni v Mg [1].

Mangan (Mn): jeho nejdůležitější funkce je zvyšování korozní odolnosti slitin Mg-Al a Mg-Al-Zn v prostředí slané vody tím, že vyváže Fe a další těžké kovy a vytvoří relativně neškodné intermetalické sloučeniny. Některé z těchto sloučenin se ve velké míře oddělí už při tavení. Množství Mn, které lze přidat, je limitováno nízkou rozpustností Mn v Mg. Mn příliš neovlivní mez pevnosti v tahu, ale lehce zvýší mez kluzu. Ve vyráběných slitinách výjimečně přesáhne obsah Mn 1,5 %, pokud je ve slitině přítomen i Al, pak obsah Mn většinou klesne na 0,3 % [1, 2].

Zirkonium (Zr): má velký účinek na zjemňování zrna a to proto, že Zr má podobnou krystalickou mřížku jako Mg. Pevné částice bohaté na Zr, které se vytvoří brzy po ochlazení taveniny, mohou poskytnout místa pro heterogenní nukleaci hořčíkových zrn během tuhnutí. Zr se přidává do slitin se Zn, Th, prvky vzácných zemin (PVZ) nebo jejich kombinací, kde zlepšuje tvar a velikost zrna. Avšak není vhodné použití v kombinaci s Al nebo Mn, protože s nimi vytvoří stabilní sloučeniny. Rovněž tvoří sloučeniny s Fe, C, Si, N a H [1, 2].

Železo (Fe): je nežádoucí prvek v hořčíkových slitinách. I v malém množství výrazně snižuje odolnost proti korozi. V běžných slitinách se Fe vyskytuje od 0,01 % do 0,03 %. U hořčíkových slitin s požadavkem na vysokou korozní odolnost nesmí přesáhnout množství Fe 0,005 % [1, 2].

Nikl (Ni): stejně jako Fe výrazně snižuje korozivzdornost. Pro maximální odolnost proti korozi je množství Ni omezeno na 0,005 %. V běžných hořčíkových slitinách se vyskytuje v rozsahu 0,01 % až 0,03 % [1, 2].

Křemík (Si): v roztaveném stavu příznivě ovlivňuje tekutost slitiny, nicméně snižuje korozivzdornost, pokud je přítomno i Fe. Používá se jen u některých slitin, například AS21 nebo AS41 [1, 2].

Stříbro (Ag): zlepšuje mechanické vlastnosti u slitin, které obsahují Th nebo PVZ [1, 2].

Lithium (Li): díky své nízké hustotě je přidáváno do hořčíkových slitin, aby snížilo celkovou hustotu. Pouze 11 % přítomného Li stačí, aby se vytvořila kubická-prostorově středěná mřížka (BCC), což zlepší tvarovatelnost tvářených výrobků. Li sníží pevnost, ale zvýší tvárnost.

Mg-Li slitiny jsou náchylné ke stárnutí, přičemž tento děj se výrazně urychlí i za mírně zvýšené teploty (60 °C) a slitiny tedy nemají příliš velké uplatnění v praxi [1, 2].

Beryllium (Be): jen částečně se rozpouští v Mg, proto se používá jen v tisícinách procent. Přidání 0,001 % Be způsobí, že povrch slitiny během tavení, odlévání nebo svařování nebude tolik oxidovat. Úspěšně se využívá u odlévaných nebo kovaných slitin, avšak při odlévání do pískových forem se množství Be musí volit rozvážně, protože ovlivňuje hrubnutí zrna [1, 2].

Vápník (Ca): je speciální legující prvek, který se přidává jen ve velmi malém množství. Pokud se Ca přidá těsně před odlitím, zmírňuje oxidaci v tekutém stavu, stejně tak i v pozdějším tepelném zpracování. Pokud jeho množství nepřesáhne 0,3 %, tak zlepšuje válcovatelnost hořčíkových plechů. Pokud je množství Ca větší, pak jsou hořčíkové plechy náchylné k tvorbě prasklin během svařování. Používá se k výrobě levných slitin odolných proti creepu, ve kterých nahradí za vyšších teplot nestabilní fázi $Mg_{17}Al_{12}$ fází Al_2Ca [1, 2].

Měď (Cu): nepříznivě ovlivňuje korozivzdornost hořčíkových slitin, pokud její množství přesáhne 0,05 %. Avšak zlepšuje pevnost za vysokých teplot [1, 2].

Prvky vzácných zemin (PVZ): jedná se o směs Sc, Y a prvků s atomovým číslem 57 až 71. PVZ zvyšují pevnost, snižují tvorbu prasklin během svařování a porozitu během odlévání, protože zužují pásmo tuhnutí hořčíkových slitin. Nejčastěji jsou přidávány v podobě směsi mischmetal (tj. 50 % Ce a dalších vzácných zemin) nebo didymium (tj. 85 % Nd a 15 % Pr) [1, 2].

Thorium (Th): přidáním Th se zvýší mez pevnosti při tečení do teploty 370 °C. Běžné hořčíkové slitiny obsahují 2-3 % Th. Zlepšuje svařitelnost a slévatelnost slitin. Postupně se však od jeho použití upouští, protože je radioaktivní [1, 2].

Cín (Sn): je užitečný v hořčíkových slitinách s malým obsahem hliníku, kde zvyšuje plasticitu slitiny a snižuje riziko vzniku trhlin při volném kování [1].

Yttrium (Y): má poměrně vysokou rozpustnost v tuhém stavu v Mg (až 12,4 %) a přidává se spolu s PVZ pro zvýšení odolnosti proti tečení do teplot okolo 300°C [1, 2].

Stroncium (Sr): zlepšuje odolnost proti creepu. Přidáním Sr se dosáhne skvělé kombinace mezi slévatelností a creepovými vlastnostmi [2].

2.2. Značení hořčíkových slitin

2.2.1. Dle ASTM

Sjednocené mezinárodní značení pro hořčíkové slitiny neexistuje, přesto se nejvíce používá značící metoda podle American Society for Testing and Materials (ASTM). Tato metoda obsahuje 3 části: písmeno-číslo-písmeno. První část se skládá z kódu písmen, které představují dva základní legující prvky (nejvíce zastoupený prvek je první). Značení jednotlivých prvků je uvedeno v tabulce 2. Druhá část představuje váhová procenta zastoupených prvků (zaokrouhleno k nejbližšímu celému číslu a seřazeno podle první části). Třetí část obsahuje přiřazovací písmeno (začínající „A“), které rozlišuje slitiny stejného označení.

Například AZ91 znamená, že hořčíková slitina obsahuje asi 9 % Al a 1 % Zn.

ASTM metoda také obsahuje kódový systém pro tepelné zpracování hořčíkových slitin, jehož značení nalezneme v tabulkách 3, 4 a 5. Tato metoda se skládá z písmene a jedné nebo více číslic [1, 2].

Tab. 2 Smluvená písmena pro značící systém hořčíkových slitin [1, 2]

Písmeno	Prvek
A	Hliník
C	Měď
E	PVZ
H	Thorium
K	Zirkonium
L	Lithium
M	Mangan
Q	Stříbro
S	Křemík
W	Yttrium
Z	Zinek
X	Vápník
J	Stroncium

Tab. 3 Značení tepelného zpracování hořčíkových slitin [1, 2]

Hlavní dělení	
F	Bez tepelného zpracování
O	Rekrystalizační žihání (pouze u kovaných výrobků)
H	Deformační zpevnění
T	Tepelné zpracování
W	Rozpouštěcí žihání

Tab. 4 Značení tepelného zpracování hořčíkových slitin [1, 2]

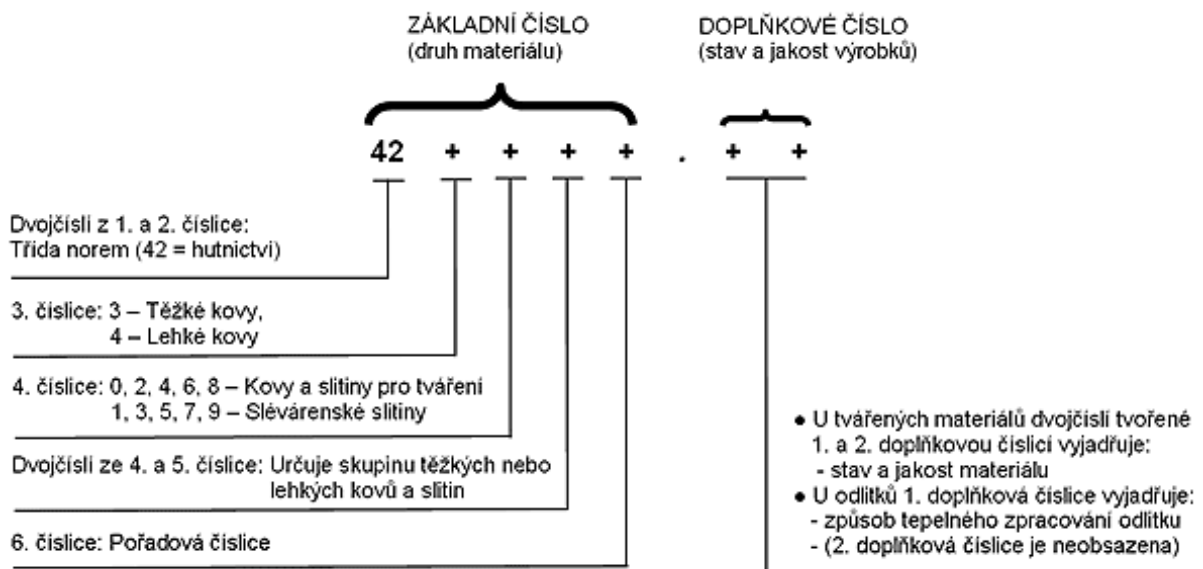
Podskupina H	
H1, plus jedna nebo více číslic	Deformační zpevnění
H2, plus jedna nebo více číslic	Deformační zpevnění a částečné žihání
H3, plus jedna nebo více číslic	Deformační zpevnění a stabilizování

Tab. 5 Značení tepelného zpracování hořčíkových slitin [1, 2]

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

2.2.2. Dle ČSN

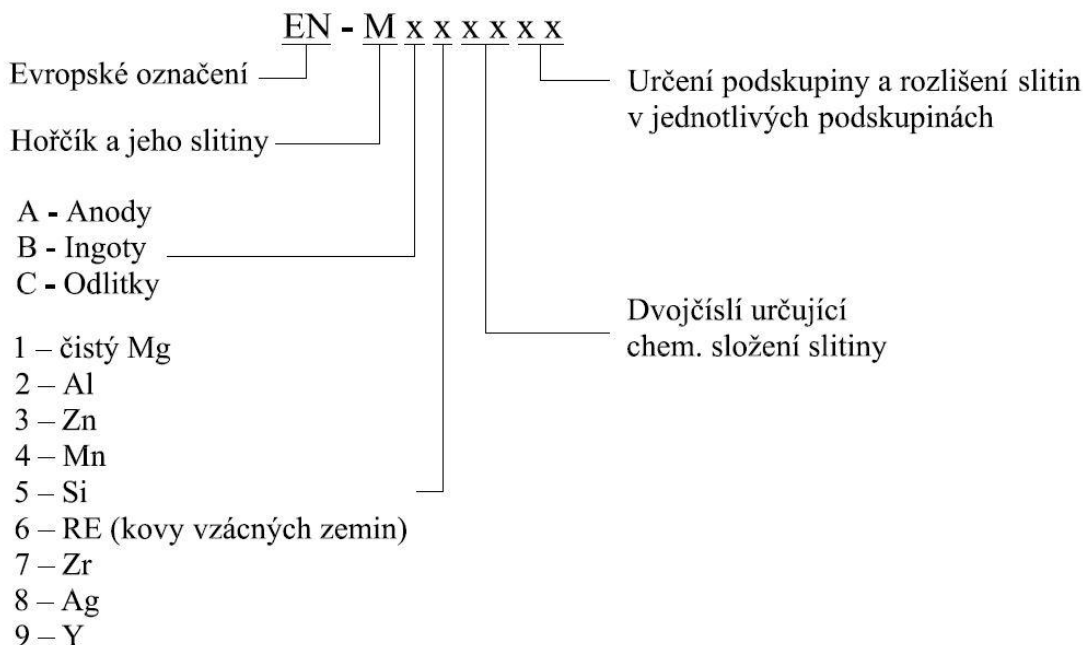
Hořčíkové slitiny se mohou označovat dle české normy *ČSN 42 0055 Neželezné kovy. Číselné označování těžkých a lehkých neželezných kovů*. Význam jednotlivých čísel je popsán na obrázku číslo 1 [5].



Obr. 1 Označení dle normy ČSN [5]

2.2.3. Dle ČSN EN

Další možný způsob označování hořčíkových slitin je dle evropské normy ČSN EN 1754 *Hořčík a slitiny hořčíku – Anody, ingoty a odlitky z hořčíku a slitin hořčíku – Označování* a je popsán na obrázku 2 [6].



Obr.2 Značení dle ČSN EN [6]

2.3. Způsoby výroby hořčíkových slitin

Hořčíkové slitiny se mohou vyrábět slévárenskými metodami nebo tvářením. Slévání je nejběžnější metodou výroby hořčíkových komponentů, je ekonomicky výhodné, ale při výrobě mohou v materiálu vznikat slévárenské vady, jako jsou vměstky v mikrostruktúře nebo pórovitost, které ovlivňují mechanické vlastnosti. Na druhou stranu tvářením nabízí vysokou pevnost a dobrou obrobiteľnosť. Tvářené slitiny mají skvělou únavovou pevnost, vyšší celkovou pevnost a dobrou houževnatost, což je projevem lepší mikrostruktúry s menším množstvím defektů [7].

Odlévané hořčíkové slitiny jsou vhodné spíše na tvarově složité výrobky, což je možné díky dobrým slévárenským vlastnostem a tekutosti hořčíku v roztaveném stavu. Aby se zkombinovala ekonomičnosť odlévání a dobré mechanické vlastnosti tvářením, je snaha tyto metody v rámci možností spojit. Vznikají tak progresivní způsoby odlévání jako třeba squeeze casting.

Hořčíkové slitiny lité

Nejvíce odlévaných hořčíkových slitin se vyrábí tlakovým litím. Odlévání za vysokého tlaku je běžný, dobře zaběhnutý, ekonomicky výhodný slévárenský proces, kterým lze vyrábět i tenkostěnné výrobky. Hlavní problém při výrobě tenkostěnných výrobků je vznik pórů a také smršťování odlitků během tuhnutí. Při výrobě se využívá rychlého ochlazení, které zajistí přijatelnou mikrostruktúru a malé zrno. Rychlé ochlazení však způsobí vysokou porozitu

materiálu. Tyto odlitky nejsou vhodné ke svařování nebo tepelnému zpracování. V důsledku přítomnosti pórů se zhoršují jejich mechanické vlastnosti. Proto se vyvíjejí nové slévárenské metody jako třeba squeeze casting, rheocasting a thixocasting, které jsou vhodnější pro výrobu tenkostěnných produktů, jako jsou kryty notebooků nebo mobilních telefonů. Tlakové lití hořčíkových slitin je i přes zmíněné nedostatky produktivnější a úspornější než odlévání hliníku. Díky kombinaci nízké hustoty, vysoké měrné pevnosti, tuhosti a skvělé slévatelnosti, jsou hořčíkové slitiny ideální pro lehké konstrukce [2, 8, 9].

Hořčíkové slitiny tvářené

Jak již bylo řečeno, hořčíkové slitiny mají převážně hexagonální těsně uspořádanou mřížku, a proto musí být technologické procesy jako válcování, protlačování a kování prováděny za vyšších teplot. Nejprve se zpracovává horký odlitek, poté následuje mechanické zpracování, čímž se naruší litá struktura a dále mohou probíhat další technologické procesy jako třeba homogenizace, žíhání a podobně.

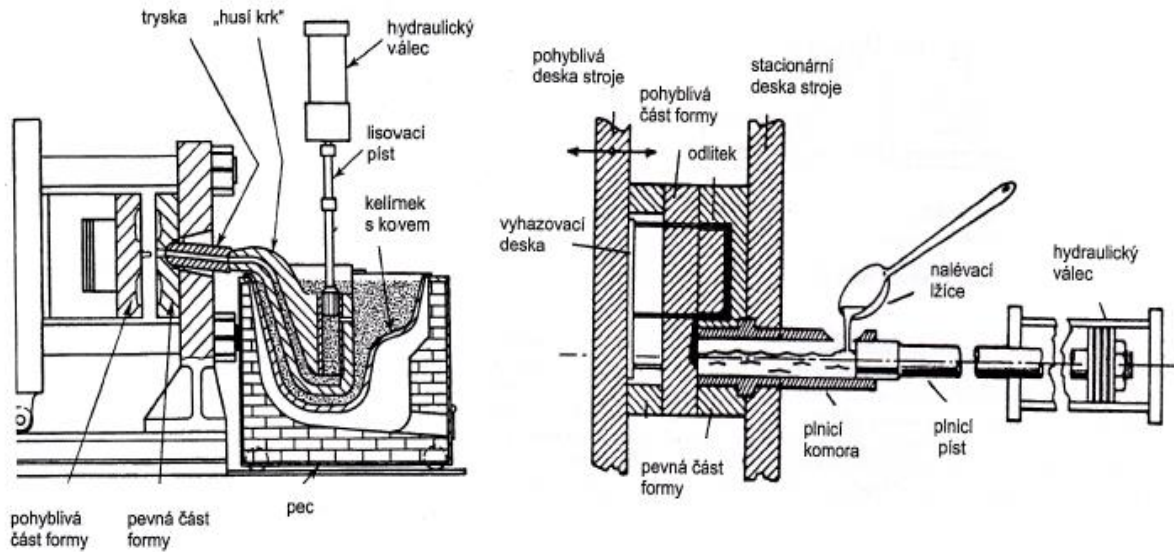
Pro kování a protlačování se používají poměrně vysoké teploty. Během válcování dochází ke styku válců a válcovaného plechu na relativně krátkou dobu, proto jsou deformační rychlosti vysoké a dosahuje se teplot 400 až 450 °C. Typickými slitinami pro válcování jsou AZ31, ZE10, ZK30 a ZM21 a všeobecně slitiny s nízkým obsahem příměsí [2].

2.3.1. Metody odlévání

Tlakové lití se využívá pro odlévání neželezných kovů jako třeba hliník, měď a hořčík. U hořčíkových slitin je tlakové lití nejpoužívanější. Při odlévání do trvalých forem mají výsledné slitiny kvalitní povrch, vysokou rozměrovou přesnost, navíc lze tímto způsobem vyrábět tenkostěnné výrobky [3, 10, 11].

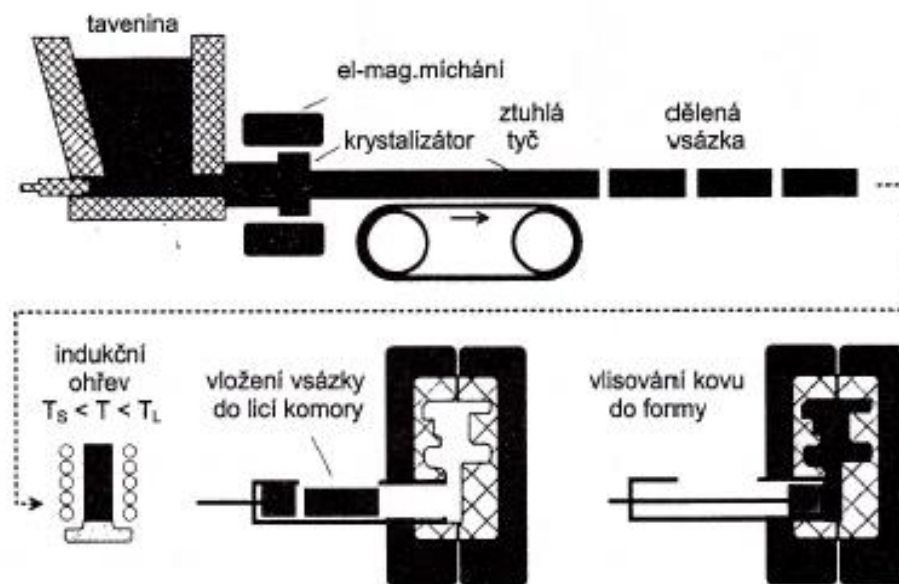
Nevýhodou tlakového lití je vznik turbulencí, které urychlují oxidaci kovu během odlévání. Řešením může být odlévání do vakuových forem, kde se dutina kovové formy evakuuje na tlak okolo 8 kPa a oxidace prakticky neprobíhá. Tento způsob je však nákladnější [10].

Ke tlakovému lití se využívají stroje s teplou nebo studenou komorou (obr. 3). Nevýhodou stroje se studenou komorou je, že roztavený kov z pece musí být dopraven a vstříknut do formy před každým odlitím. U stroje s teplou komorou je zabudovaná udržovací pec, která v ochranné atmosféře udržuje kov na požadované teplotě. Ten je poté vstříkovan nahřátou tryskou do lící formy. Stroje s teplou komorou mohou vyrobit odlitek s tenčími stěnami (až 1 mm) a jsou produktivnější než stroje se studenou komorou [10, 11].



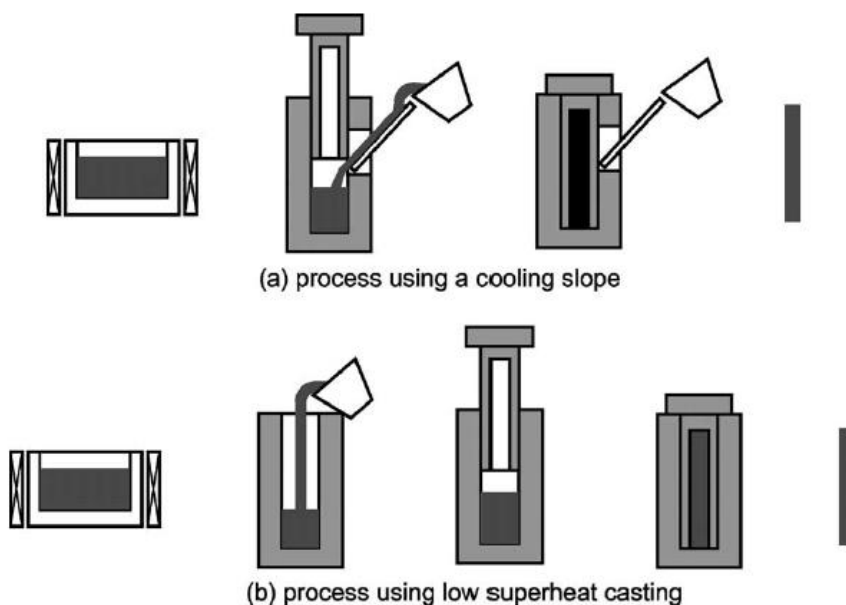
Obr. 3 Konstrukce strojů s teplou a studenou komorou [10]

Thixocasting je nová a progresivní metoda, která nabízí řadu výhod, jako třeba zlepšení mechanických vlastností a dobrou kvalitu povrchu. Kombinuje výhody metod odlévání a lisování. Thixocasting využívá poměrně drahé speciální ingoty, které se zahřejí do polotekutého stavu (optimální množství tekuté fáze je kolem 35 %) a následně vtlačí do formy, kde ztuhnou. Schéma thixocastingu je znázorněno na obrázku 4. Hlavní nevýhodou je poměrně vysoká cena celého procesu [10, 12].



Obr. 4 Schematické znázornění metody thixocasting [10]

Rheocasting nevyžaduje použití speciálních ingotů, tudíž je levnější než thixocasting. V počátcích se při odlévání polotekutých slitin využívalo mechanického míchání, aby se dosáhlo správné mikrostruktury. Dnes se využívá elektrického míchání. Existují dva typy rheocastingu. První typ využívá chladicí tyč (obr. 5a), po které kov v polotekutém stavu stéká do formy. Procento pevných částic se nejčastěji pohybuje okolo 50 %. Výhoda tohoto typu je, že provozní i pořizovací náklady jsou relativně nízké. U druhého typu (obr. 5b) se zárodky krystalů tvoří na povrchu formy. Odlévání se provádí dříve, než se zárodky krystalů stihnou přetavit. Tím pádem mohou růst a stanou se primárními globulárními krystaly. Tento typ je jednodušší než předcházející [10, 13].

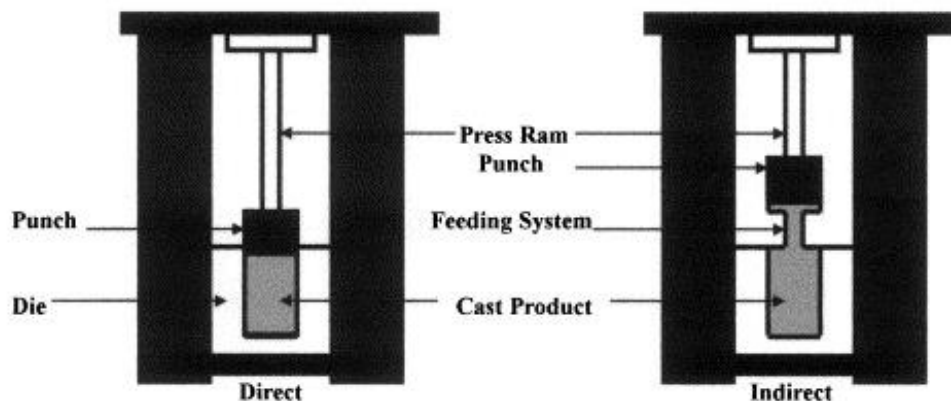


Obr. 5 Schéma odlévání metodou rheocasting [13]

Squeeze casting je technologie odlévání, při které tuhnutí probíhá za vysokého tlaku. Jedná se tedy o kombinaci odlévání a tváření. Výsledkem metody squeeze casting jsou slitiny s nejvyššími dosažitelnými mechanickými vlastnostmi ze všech slévárenských procesů. Při tomto procesu se na dno předehřáté formy hydraulického lisu nalije přesné množství roztaveného kovu. Poté se aktivuje lis a dojde ke tvarování odlitku za vysokého tlaku (od 55MPa do 300MPa). Tento tlak se udržuje do úplného ztuhnutí kovu. Díky tomu se eliminuje vznik řediny a pórovitost [14, 15].

Existují dva typy squeeze castingu: přímý a nepřímý. Oba jsou znázorněny na obrázku 6. U přímé metody se přesně odměřená dávka nalije do formy, která se následně uzavře a za stálého tlaku odlitek tuhne. Přímá metoda je levnější a jednodušší než metoda nepřímá. Ta využívá plnicí systém, který dávkuje materiál přes drážky ve formě nízkou rychlostí (pod 0,5 m/s) a materiál následně za vysokého tlaku tuhne. Po ztuhnutí se z odlitku musí odstranit nálitky, což je nevýhoda nepřímé metody [10, 14, 15].

Squeeze casting je ekonomicky výhodný, efektivní a produktivní, proto se využívá například v automobilovém průmyslu [14, 15].



Obr. 6 Přímá a nepřímá metoda squeeze casting [14]

2.3.2. Metody tváření

Extruze neboli protlačování, je metoda vhodná k vyrábění finálních produktů nebo polotovarů (např. tyče, profily, trubky). Je to poměrně efektivní a přesná metoda výroby s minimem odpadu. Extruze se u hořčkových slitin provádí nejčastěji v rozmezí teplot od 300-400 °C a dělí se na dva způsoby – dopředná a zpětná extruze. Při dopředné extruzi se materiál pohybuje ve stejném směru jako průtláčník a je to často využívaný způsob. U zpětné extruze se materiál pohybuje v opačném směru. Zpětná extruze se může využívat na začátku dopředného protlačování, aby se eliminoval vliv počátečního tření [1].

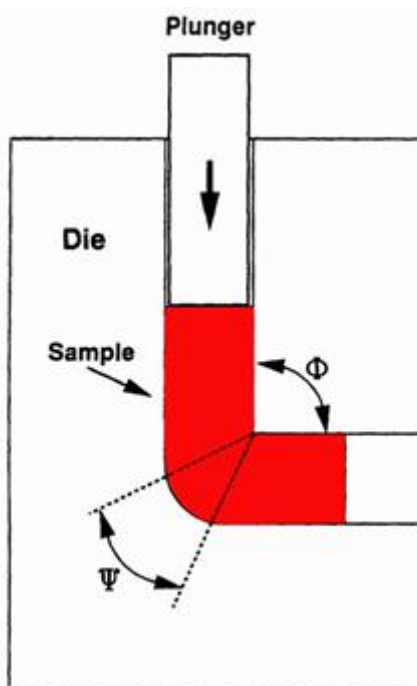
Válcování je technologický proces, při němž se tvářený materiál deformuje mezi dvěma válci za vysokého tlaku. Válcovat se může za tepla nebo za studena, častější metoda je však válcování za tepla. Vstupním materiálem pro výrobu plechů a plátů z hořčkových slitin jsou ingoty, které jsou odlity do obdélníkových plochých tvarů. Každý ingot se nejprve důkladně zahřeje a poté proběhne válcování, při kterém se naruší původní litá struktura [1, 16].

Jak již bylo zmíněno, hořčkové slitiny jsou velmi atraktivní, ale poměrně drahé. Řešením by mohlo být využití technologie twin roll casting. To je poměrně ekonomická metoda a její výhodou je, že si plechy hořčkových slitin udrží vysokou kvalitu. Avšak největší výhodou je ušetření několika výrobních kroků v porovnání s klasickým způsobem válcování. U twin roll castingu se tekutá slitina hořčíku nepřetržitě odlévá a následně válcuje, takže není potřeba předeřevu před válcováním. Ušetření několika kroků má pozitivní vliv na mikrostrukturu, která je jemnější, což zlepšuje například tažnost za pokojové teploty [17].

Equal Channler Angular Pressing (ECAP) je proces tváření, při kterém se zjemňuje zrno. Je to relativně nová metoda s velkým potenciálem vyvinuta v 70. a 80. letech 20. století. Při této metodě se polotovary ve tvaru hranolu nebo tyče protlačují přes protlačovací kanál, který je zakřivený do určitého úhlu (na obr. 7 úhel Φ), nejčastěji pak do 90° , ale může být i několikanásobně zakřivený. Většinou se ECAP provádí za studena, ale u tvrdších materiálů i za vyšších teplot. Princip metody ECAP je znázorněn na obrázku 7. Opracovaný vzorek materiálu se razníkem protlačí přes formu s kanálem, díky zakřivení se materiál smykově převáří a vznikají tak deformace bez změny průřezu a platí, že čím více zakřivení, tím je větší celkové přetvoření a zjemnění zrna. Výhodou metody ECAP je, že se stejný vzorek může opakovaně tvářet, a tím dosáhnout výjimečně jemného zrna [18, 19].

Tato metoda se používá například u slitin typu AZ právě pro zjemnění zrna, což je velmi žádoucí. Tradičními metodami výroby jako jsou kování, extruze a válcování se tak jemného zrna dosáhnout nedá. ECAP naruší strukturu sekundární fáze, která se u slitin s vyšším obsahem Al (např. AZ80 a AZ91) tvoří více. Tím umožňuje optimalizovat rozdělení a velikost precipitátů a získat tím lepší mechanické vlastnosti. Dále se například snižuje riziko vzniku trhlin při deformaci, čímž dojde ke zlepšení plasticity [20].

Aby se zamezilo praskání hořčkových slitin během procesu, provádí se za relativně vysoké teploty (více než 300°C). Tím se zlepšuje tvárnost a tažnost, ale příliš se nezvyšuje pevnost, proto je snaha teplotu při procesu snižovat [21].



Obr. 7 Schéma metody ECAP [19]

3. Vybrané slitinové systémy

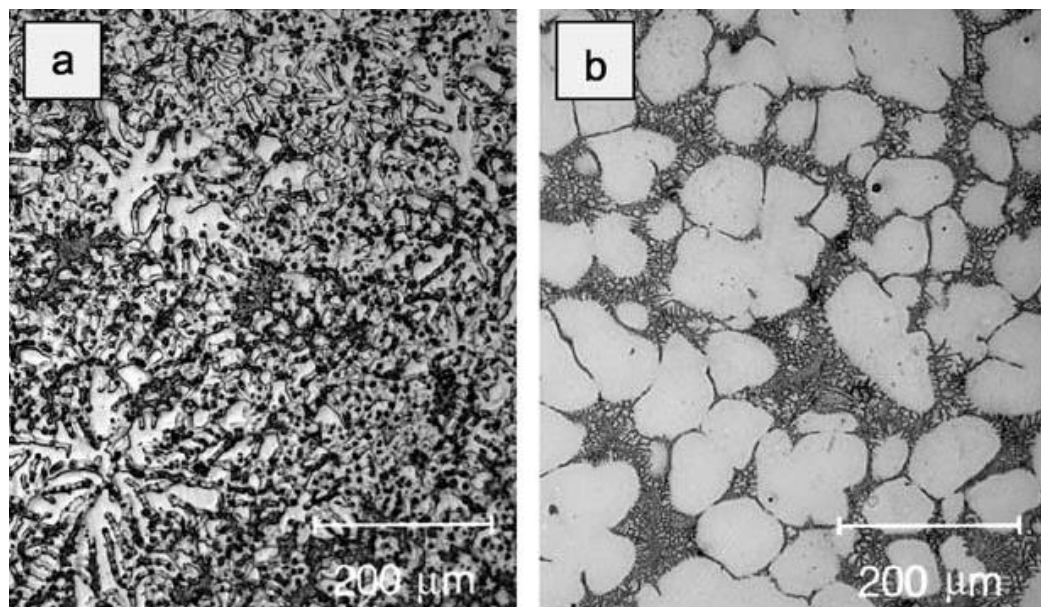
3.1. Mg-Al-Zn

Slitiny typu AZ nalézají velké uplatnění v automobilovém a leteckém průmyslu nebo jako součásti počítačů a elektroniky, především díky svým atraktivním mechanickým vlastnostem (nízká hustota, vysoká tvrdost a pevnost, dobrá obrobitelnost). Například firma Boeing využívá slitiny typu AZ do součástí motorů, konkrétně slitina AZ92 se využívá jako součást konstrukce k vytvoření reverzního tahu u motoru [35].

Většina běžných slévárenských hořčkových slitin obsahuje 2-9 % Al, maximální rozpustnost Al v Mg je 12 hm% při eutektické teplotě. Mg-Al slitiny tuhnou jako jednofázový tuhý roztok α (substituční tuhý roztok Al v Mg) a následné ochlazování vede ke tvorbě precipitátu $Mg_{17}Al_{12}$ (β -fáze) mezi α -zrny. Eutektická přeměna probíhá při 437°C a tvoří se při ní směs α a β fáze. Přítomnost β fáze zhoršuje plasticitu, protože při deformaci je jednou z příčin vzniku trhlin a po odlití má tendenci se shlukovat na hranicích zrn. Také urychluje korozi tuhého roztoku, protože se chová jako katodická fáze. Na druhou stranu však výrazně zvyšuje pevnost [2, 8, 20].

Mikrostruktura

Obrázek 8 zobrazuje typickou mikrostrukturu slitiny AZ91 vyrobené metodou squeeze casting a rheocasting. Proces odlévání určuje tvar a rozdělení přítomných fází. Pomocí squeeze castingu získáme hlavně dendrity tuhého roztoku α s eutektikem, které se skládá z β -fáze a přesyceného tuhého roztoku α nacházejícím se v mezidendritických prostorech. Poměrně velká zrna tuhého roztoku α jsou typická pro metodu rheocasting. Eutektická fáze je nashromážděna v prostoru mezi těmito zrny [8].



Obr. 8 Mikrostruktura slitiny AZ91 vyrobené metodou a) squeeze casting b) rheocasting [8]

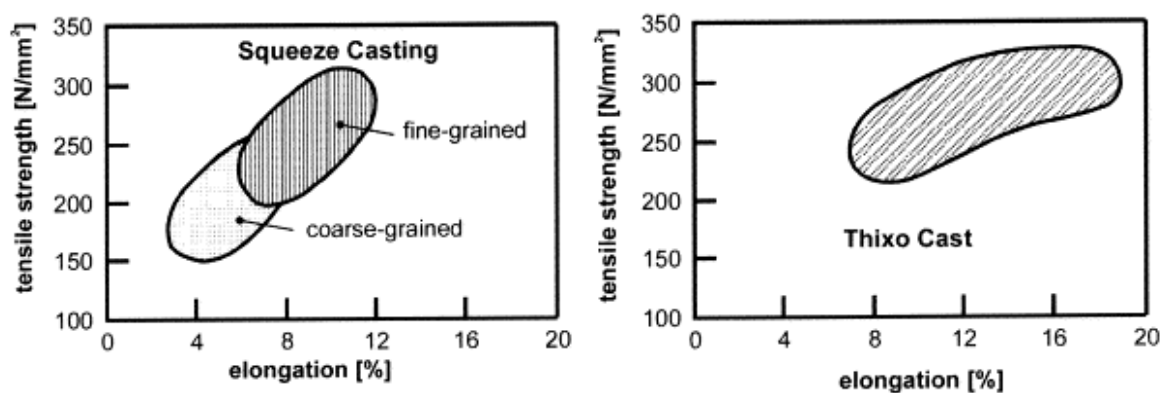
Mechanické vlastnosti

Množství, tvar a distribuce křehké intermetalické sloučeniny $Mg_{17}Al_{12}$ ovlivňuje mechanické vlastnosti Mg-Al slitin, jak je patrné z tabulky 6. Také si můžeme povšimnout, že stejná slitina může mít různé mechanické vlastnosti v závislosti na způsobu výroby. Rozpouštěcí žíhání rozpustí křehkou fázi $Mg_{17}Al_{12}$ do tuhého roztoku, čímž se výrazně zlepši lomová houževnatost, pevnost v tahu a tažnost, avšak mírně poklesne mez kluzu. Na slitině AZ80 můžeme srovnat vliv metody thixocasting a ECAP. U ECAP je dosahováno zdatelně lepších mechanických vlastností díky jemnosti struktury a promísené fáze $Mg_{17}Al_{12}$ [8, 20].

Tab. 6 Vliv výroby na mechanické vlastnosti slitiny AZ91 [8, 20]

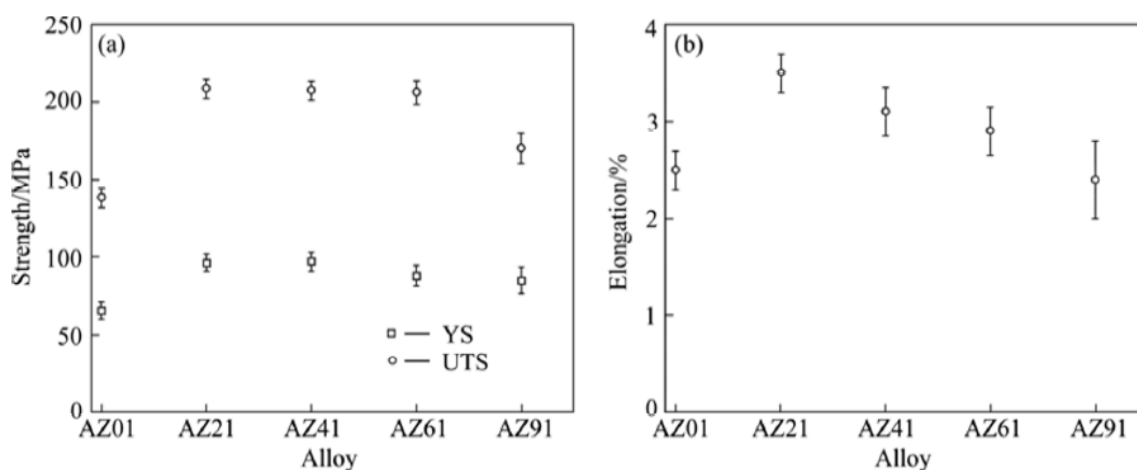
Výrobní proces	Materiál	Mez kluzu [MPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]	Lomová houževnatost K_{Ic} [$MPa\sqrt{m}$]
Squeeze casting [8]	AZ91 (F)	104±4	183±12	4,5±1,2	22,6
Rheocasting [8]	AZ91 (F)	105±6	171±10	3,4±1,0	15,1
Thixocasting [8]	AZ91 (T4)	94±5	241±19	8,3±1,6	31,0
	AZ80 (F)	102±4	185±14	3,5±1,0	16,7
	AZ80 (T4)	92±5	224±24	7,7±2,3	36,8
ECAP [20]	AZ80	200	315	14	N/A

Vliv výroby na mechanické vlastnosti slitiny AZ91-T4 je dobře patrný z obrázku 9. Při využití metody thixocasting se dosahuje vyšších hodnot tažnosti. U metody squeeze casting byly pro jemnozrnnou strukturu pozorovány vyšší hodnoty tažnosti, srovnatelné se středními hodnotami získanými u thixocastingu. U hrubozrnné struktury byly hodnoty tažnosti poloviční oproti struktuře jemnozrnné. Hodnoty pevnosti jsou u jemnozrnné slitiny vyrobené metodou squeeze casting srovnatelné se slitinami vyrobené metodou thixocasting [3].

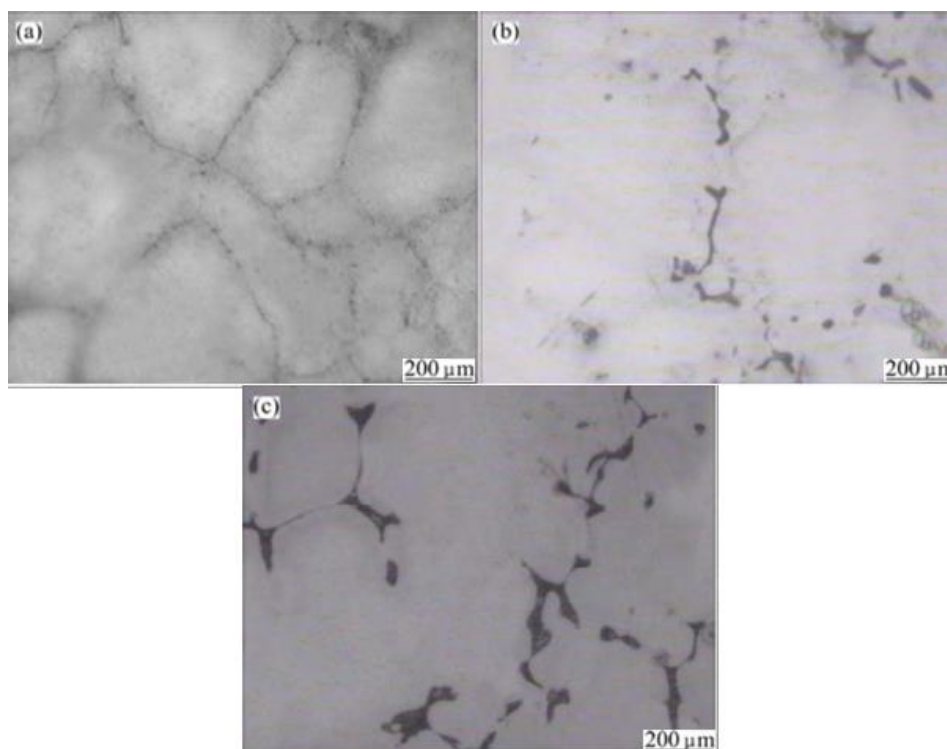


Obr.9 Vztah mezi pevností v tahu a tažností pro slitinu AZ91-T4 vyrobenou metodami squeeze casting a thixocasting [3]

U slitin typu AZ je dále důležitý vliv obsahu legujících prvků, hlavně pak Al. Na obr. 10 jsou znázorněny mechanické vlastnosti slitin typu AZ v závislosti na rostoucím obsahu Al. Z obrázku je patrný nárůst a následný pokles meze pevnosti (UTS), meze kluzu (YT) a tažnosti (elongation) s maximem tažnosti pro 2 % Al. Pro hodnoty meze pevnosti a mez kluzu byl pozorován významný nárůst pro 2 % Al bez výrazné změny vlastností až do 9 % Al, kdy dochází k poklesu hodnot. Tyto změny mechanických vlastností jsou dány zvyšujícím se obsahem β fáze ve slitině, jak je patrné ze snímků mikrostruktury na obrázku 11. Na tomto jsou obrázku jsou zdokumentovány mikrostruktury slévarenských slitin AZ21, AZ41 a AZ91. Můžeme si všimnout, že β fáze má tendenci se vylučovat na hranici zrn tuhého roztoku α a její množství roste s množstvím hliníku ve slitině [4].

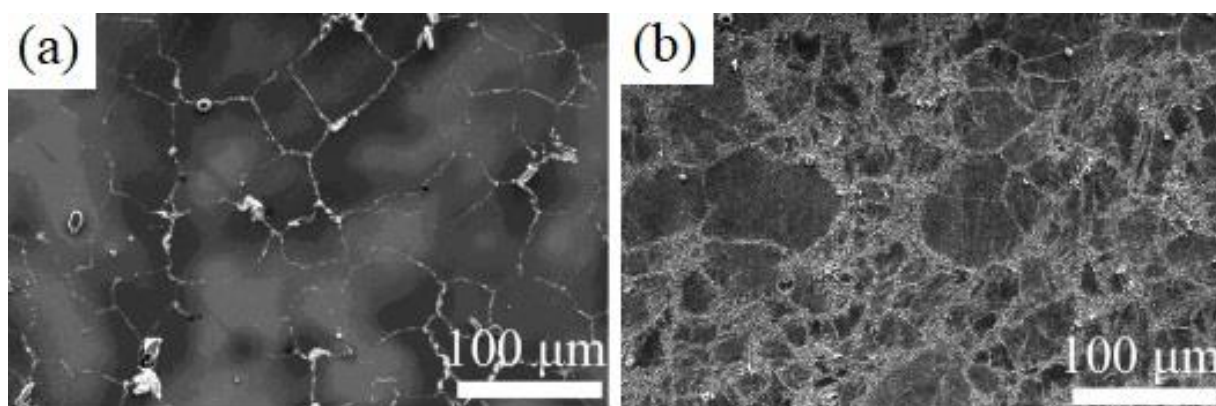


Obr. 10 Mez kluzu, mez pevnosti a tažnost slitin AZ [4]



Obr. 11 Mikrostruktura slitin (a) AZ21 (b) AZ41 (c) AZ91 [4]

Pro výrobu slitin typu AZ se využívá také metoda ECAP, která s sebou nese výrazné zjemnění zrna, což je velmi žádoucí. Na snímku mikrostruktury slitiny AZ80 (obr. 12) a v tabulce 7 jsou jasně patrné rozdíly mezi ECAP a sléváním. Slitina AZ80 byla po odlití ještě homogenizačně žíhána. Výsledky pro slévání byly naměřeny po odlití a homogenizačním žíhání a v druhém případě ještě po následném ECAP. Na základě této tabulky můžeme říct, že ECAP výrazně ovlivňuje mez kluzu a mez pevnosti a má prokazatelně pozitivní účinky na mechanické vlastnosti. Tento fakt potvrzuje i mikrostruktura slitiny AZ80. Na snímku (a) je zachycena mikrostruktura odlévané slitiny, která je tvořena velkými zrny tuhého roztoku hořčíku a β fáze vyloučené na hranicích zrn. Na druhém snímku (b) je mikrostruktura získaná metodou ECAP, která má jemnější primární zrna. β fáze se lépe promísila a celkově tak tvoří jemnější strukturu, což má za následek výrazné zvýšení meze kluzu a pevnosti. Rozdíl v tažnosti na tomto příkladu není tak zásadní, ale v porovnání s metodou thixocasting (tab.6) už znatelný je (thixocasting nabízí přibližně poloviční tažnost) [20].



Obr.12 Mikrostruktura slitiny AZ80 vyrobena a) odléváním b) metodou ECAP [20]

Tab. 7 Vliv výroby na mechanické vlastnosti slitiny AZ80 [20]

Výrobní proces	Materiál	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [Mpa]	Tažnost [%]
Slévání	AZ80	100	255	12
ECAP	AZ80	200	315	14

Mezi další možnosti, jak zlepšit mechanické vlastnosti slitin typu AZ, patří relativně nová metoda legování nanočásticemi Al_2O_3 a Ca, jak je v literatuře popsáno na příkladu slitin AZ41 a AZ51. Mikrostruktura hořčíkových slitin AZ41 a AZ51 se skládá z tuhého roztoku α a intermetalické fáze $\beta - \text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$. Přidání Ca částic vede ke snížení počtu ostrých útvarů β fáze a vytvoření nové fáze $(\text{Mg}, \text{Al})_2\text{Ca}$, která má tupé hrany. Nahrazení ostrých útvarů vede ke snížení vnitřního napětí, protože tyto nové fáze nepůsobí jako výrazný koncentrátor napětí. Přidáním Al_2O_3 a Ca částic se také docílí jemnějšího zrna. V tabulce 8 je porovnání mezi jednotlivými slitinami. Hodnoty byly změřeny za pokojové teploty na slitinách vyrobených extruzí. Z naměřených hodnot vyplývá, že nanočástice Al_2O_3 a Ca poměrně výrazně zvyšují mez kluzu a mez pevnosti v tahu v porovnání s čistými slitinami AZ41 a AZ51 [22].

Tab. 8 Mez kluzu a mez pevnosti v tahu za pokojové teploty [22]

Materiál	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]
AZ41	218	287
AZ41– Al_2O_3 –1Ca	221	313
AZ41– Al_2O_3 –2Ca	243	314
AZ51	222	302
AZ51– Al_2O_3 –1Ca	225	317
AZ51– Al_2O_3 –2Ca	248	338

3.2. Slitiny s obsahem PVZ

Slitiny s obsahem PVZ našly využití v leteckém a automobilovém průmyslu. Například firma Sikorsky, která vyrábí známé vrtulníky Blackhawk, využívá slitinu ZE41 v převodovce vrtulníku. Společnost General Motors, která vlastní mimo jiné značku Chevrolet, využila slitinu AE44 pro výrobu ráfků kol pro model Corvette Z06 [35].

3.2.1. Mg-Al-PVZ

Hořčíkové slitiny s příměsí PVZ (převážně se jedná o směs mischmetal) jsou odolné vůči creepu, protože se při výrobě netvoří křehká β fáze, ale místo ní se vytváří intermetalická fáze Al-PVZ. Zvyšující se obsah Al a PVZ zlepšuje maximální napětí. Mez kluzu závisí více na množství PVZ. Při nízkých rychlostech tuhnutí se tvoří hrubé částice Al_2PVZ , které přestože hrubnou, tak zabraňují skluzu na hranicích zrn během creepu spolu s částicemi Mg_{12}Ce , které se nacházejí na hranicích zrn. Tyto sloučeniny jsou vhodné pouze pro tlakové lití [2].

3.2.2. Mg-Zn-Al-PVZ

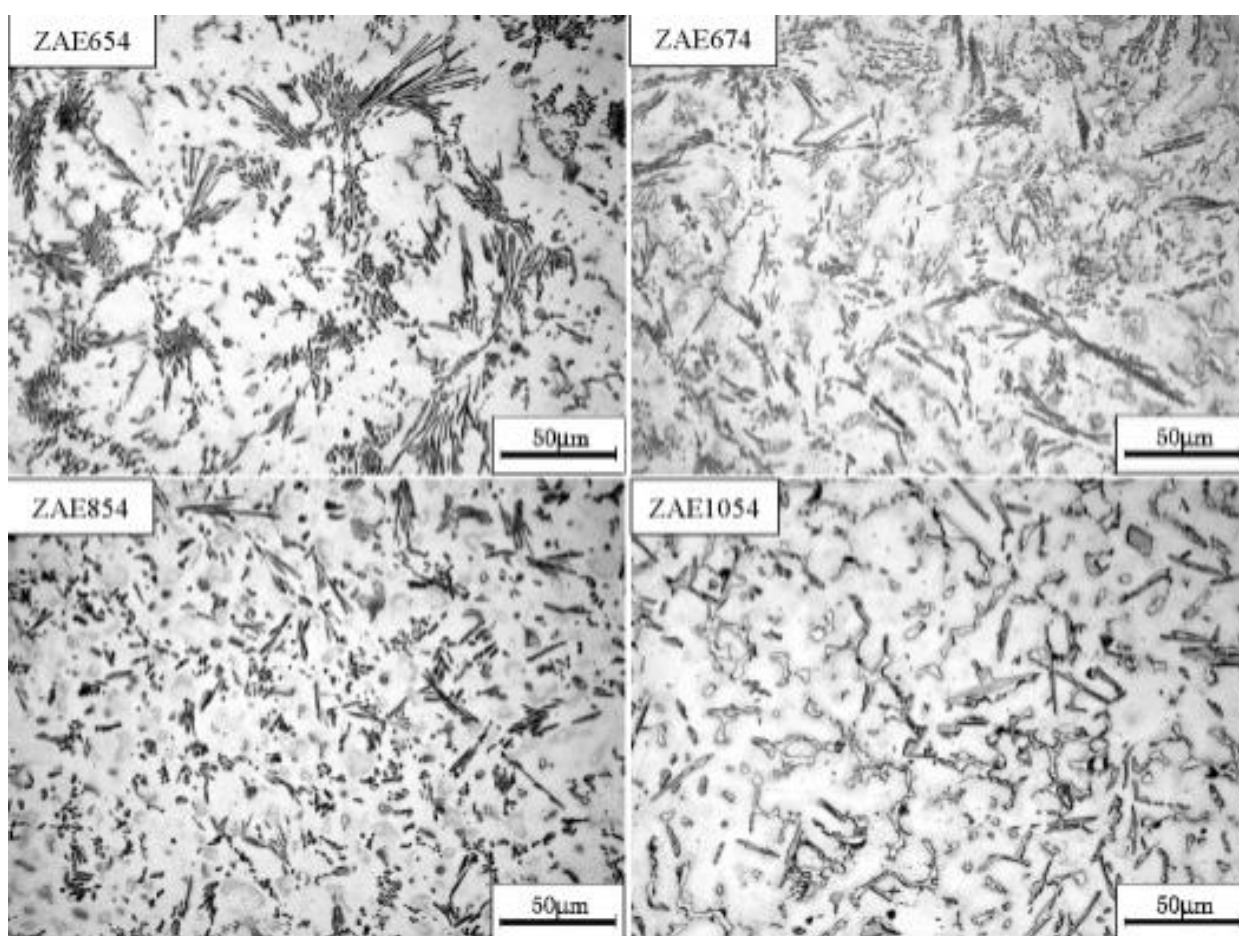
Mn-Zn-Al slitiny s vyšším obsahem Zn než Al jsou poměrně drahé, avšak mají skvělou tepelnou odolnost a slévatelnost bez tvorby mikropórů a trhlin. S rostoucím obsahem Zn se nevytvoří β fáze. Na druhou stranu, tyto slitiny mají nízkou tažnost kvůli husté síti eutektických fází, které se vytvářejí na hranicích zrn. Prvky vzácných zemin zjemňují tuto eutektickou fázi nebo mohou potlačit její vznik, čímž zlepšují mechanické vlastnosti [9, 23].

Pro zvýšení odolnosti vůči vysoké teplotě u slitin typu ZA se přidává další prvek (např. Si, PVZ, prvky alkalických zemin) s cílem snížit obsah Al. Cílem je potlačit vytvoření nestabilní

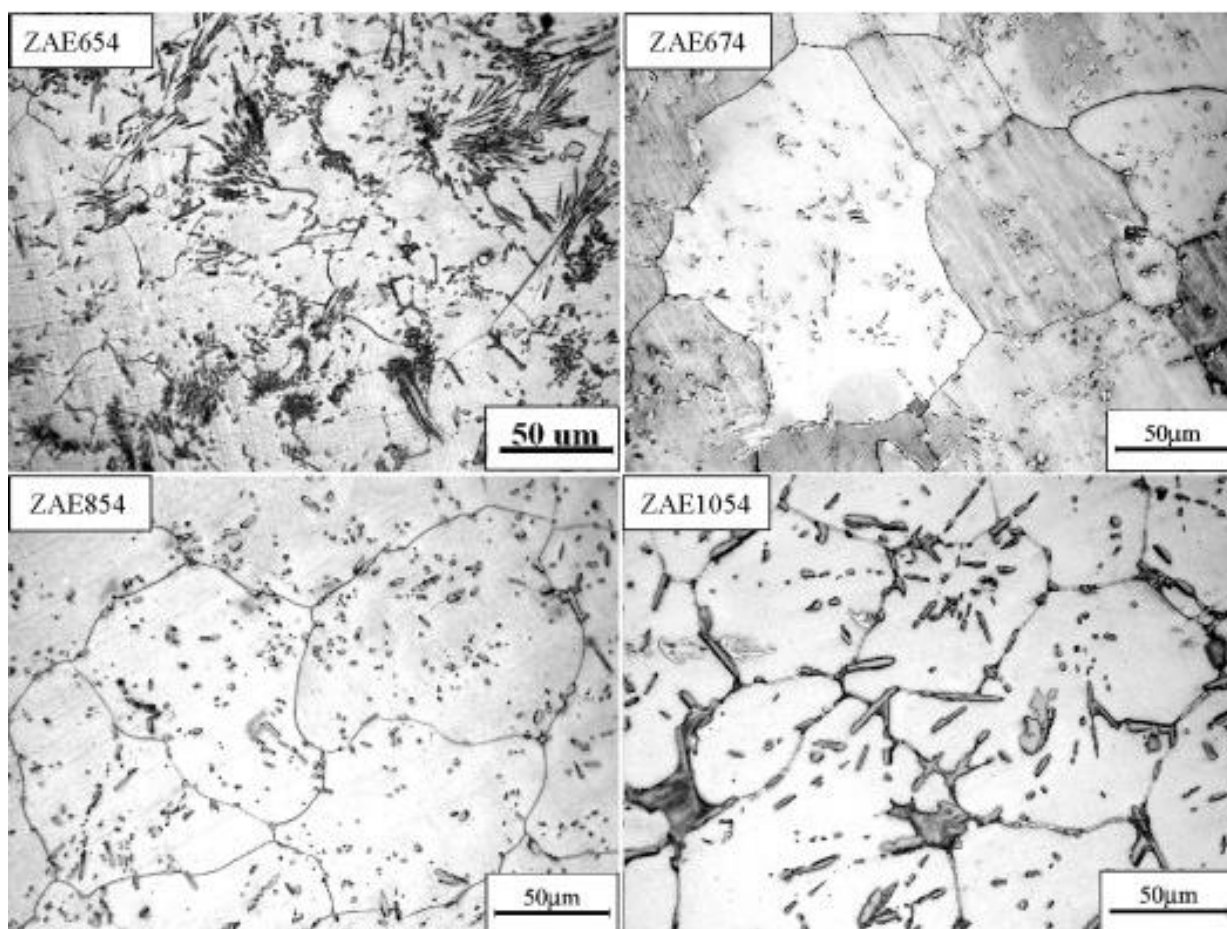
β fáze a její nahrazení stabilní fází (třeba Mg-PVZ) i za vysokých teplot, čímž se zlepší celková tepelná odolnost. Zredukováním obsahu Al se sníží pevnost a zhorší slévatelnost [9, 23].

Typ, tvar a množství přítomných fází je možné upravit pomocí tepelného zpracování. Na obrázku 13 jsou zobrazeny mikrostruktury vybraných slitin, které byly hodnoceny ve stavu po odlití. Můžeme pozorovat, že mikrostruktura se mění s různými obsahy Al a Zn. S rostoucím obsahem zinku fáze Al_2PVZZn_2 hrubne a přestává tvořit shluky, jak můžeme vidět na mikrostruktuře slitiny ZAE1054 [9].

Obrázek 14 zobrazuje mikrostrukturu stejných slitin, avšak tepelně zpracovaných homogenizačním žíháním po dobu 24 hodin při teplotě 400 °C. Jak je ze snímků mikrostruktur patrné, tyčinkovité fáze se nerozpouští díky vysoké teplotní stabilitě, čímž tvoří bariéru a zabraňují tak skluzu po hranici zrn za zvýšených teplot [9].



Obr.13 Mikrostruktura tepelně nepracovaných slitin [9]



Obr. 14 Mikrostruktura homogenizovaných slitin [9]

Mechanické vlastnosti slitin v základním stavu jsou uvedeny v tabulce 9. Slitina ZAE654 vykazuje optimální hodnoty za pokojové teploty i při 150 °C. Slitina ZAE854 vykazuje vyšší teplotní stabilitu než slitina ZAE674, která obsahuje méně Zn, z čehož je jasně patrné, že Zn má pozitivní vliv na teplotní stabilitu [9].

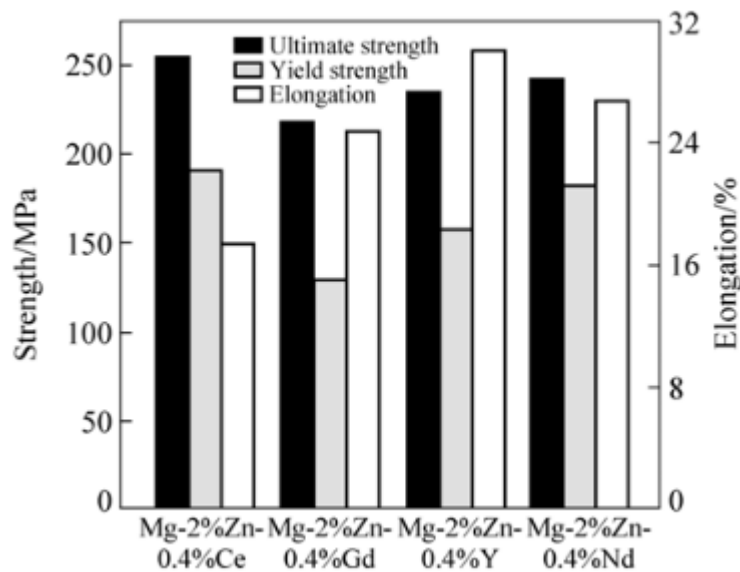
Tab. 9 Mechanické vlastnosti ZAE slitin testovaných za různých teplot [9]

Slitina	Mez pevnosti [MPa]		Mez kluzu [MPa]		Tažnost [%]	
	pokojová teplota	150°C	pokojová teplota	150°C	pokojová teplota	150°C
ZAE654	242	125	140	89	6,4	9,1
ZAE674	168	112	93	70	3,2	5,4
ZAE854	174	120	95	86	3,1	4,3
ZAE1054	159	127	93	86	1,8	3,1

3.2.3. Mg-Zn-PVZ

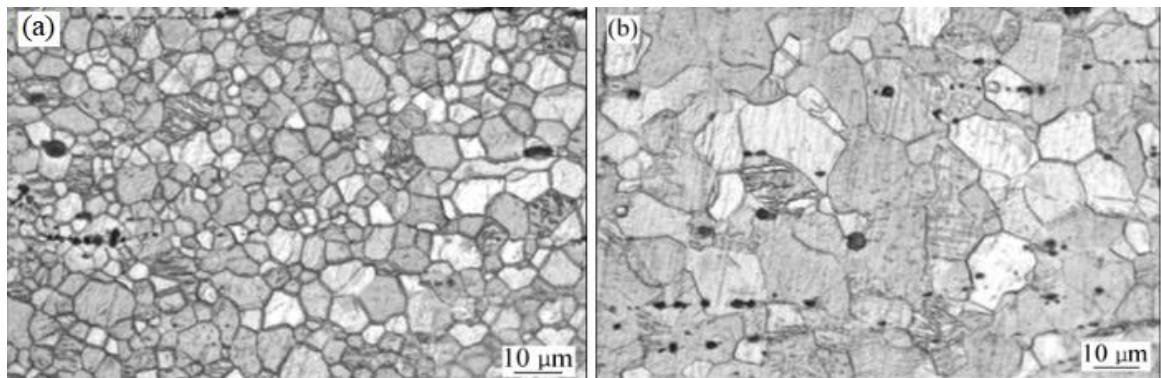
Binární slitina Mg-Zn bez přidání dalšího legujícího prvku je křehká, hrubozrnná. Za zvýšených teplot ztrácí své mechanické vlastnosti, proto se vždy leguje dalšími prvky, jako jsou například PVZ (Ce, Y, Nd, Gd). To však zvyšuje celkovou cenu slitiny [24, 25].

Každý PVZ ovlivňuje mechanické vlastnosti a strukturu trochu odlišně, což lze vidět na příkladu čtyř slitin ZE20, které obsahují vždy 0,4 % Ce, Gd, Y nebo Nd. Všechny slitiny byly vyrobeny stejnou metodou. Nejprve byly odlity v ochranné atmosféře za teploty 690 °C a pak extrudovány při 310 °C. Výsledky zkoušek na obrázku 15 zobrazují, jak jednotlivé PVZ ovlivňují mez pevnosti, mez kluzu a tažnost. Můžeme si všimnout, že mez kluzu a mez pevnosti u slitiny Mg-2%Zn-0.4%Nd dosahují skoro stejných hodnot jako u slitiny Mg-2%Zn-0.4%Ce, avšak hodnota tažnosti je výrazně vyšší [24].



Obr.15 Vybrané mechanické vlastnosti slitin ZE20 [24]

Při porovnání mikrostruktury slitin s Ce a Nd (obrázek 16), je zřejmé, že slitina s Nd má mnohem jemnější strukturu než slitina z Ce, což pozitivně ovlivňuje již zmiňovanou tažnost. Průměrná velikost zrna slitiny s Ce je 30-35 μm , slitina obsahující Nd vykazuje průměrnou velikost zrna 6 μm [24].

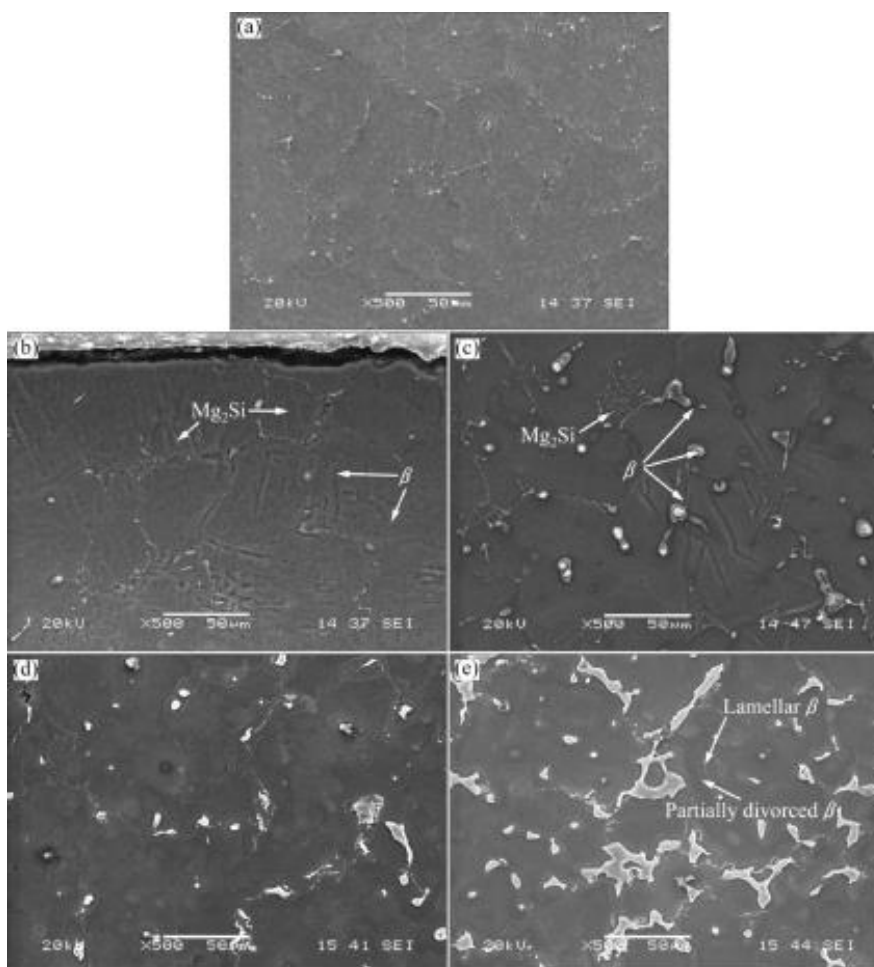


Obr. 16 Mikrostruktura slitin a) Mg+2.0%Zn+0.4%Nd b) Mg+2.0%Zn+0.4%Ce [24]

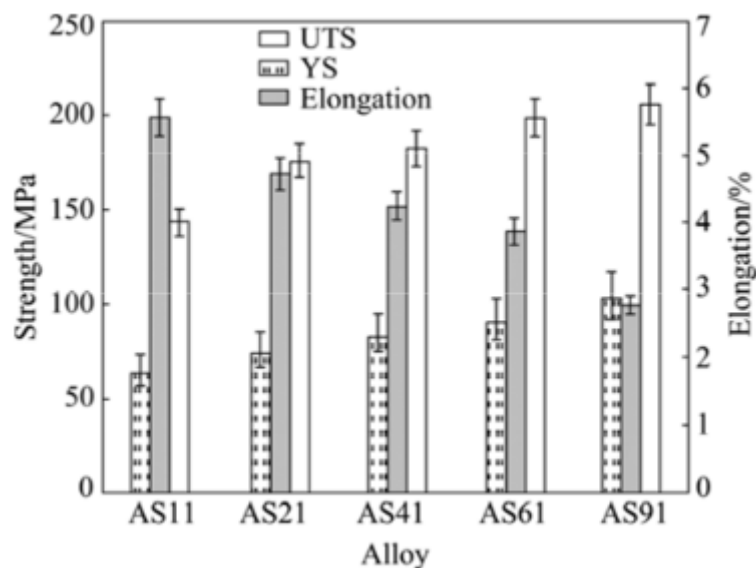
3.3. Mg-Al-Si

Slitiny typu AS mají nízkou hustotu, vysokou tvrdost a nízký koeficient teplotní roztažnosti, kvůli tvorbě precipitátů Mg_2Si s vysokou teplotou tání ($1085^\circ C$). Fáze Mg_2Si vzniká velice snadno a Si je tedy vhodným prvkem pro zlepšení mechanických vlastností hořčkových slitin. Navíc je Si považován za nízkonákladový prvek, takže je jeho použití výhodné i finančně. Poprvé byly tyto slitiny komerčně využity automobilovou společností Volkswagen v 70. letech pro výrobu slavného modelu Brouk, právě díky výše zmíněným vlastnostem. Jelikož Si na sebe nedokáže vázat Al, tvoří se dva typy sekundárních fází – $Mg_{17}Al_{12}$ a Mg_2Si . Tyto fáze zachycují dislokace, blokují hranice zrn a zlepšují odolnost proti creepu, čehož se využívá v automobilovém průmyslu. Například součásti vyrobené ze slitin AS21 a AS41 se využívají v motorech automobilů. Použitelnost standardních slitin AS21 a AS41 je do 130 až 150 $^\circ C$. Si dále zlepšuje tekutost slitin, ale jen pokud je přítomen Al alespoň ve 4 %. Z toho vyplývá, že dobře slévatelná bude slitina AS41 a další slitiny z této řady s vyšším obsahem Al [2, 26, 27].

Na obrázku 17 jsou zobrazeny mikrostruktury slitin typu AS s různým obsahem Al. Na obrázku 18 pak meze pevnosti (UTS), meze kluzu (YS) a tažnosti (elongation) těchto slitin v závislosti na obsahu Al. Mez pevnosti a mez kluzu mají rostoucí tendenci s rostoucím obsahem Al, zatímco tažnost má trend klesající. Nejvyšší hodnoty meze kluzu a meze pevnosti byly dosaženy u slitiny AS91, ta však vykazuje nejnižší tažnost [27, 28].



Obr. 17 Mikrostruktury (a) AS11 (b) AS21 (c) AS41 (d) AS61 (e) AS91 [27]



Obr. 18 Mez pevnosti (UTS), mez kluzu(YS) a tažnost (elongation) AS slitin [28]

Hodnoty meze pevnosti, meze kluzu a tažnosti mohou být přisouzeny intermetalickým fázím $Mg_{17}Al_{12}$ and Mg_2Si , které se nacházejí ve struktuře a svou přítomností mohou zabraňovat skluzu. Množství těchto fází se zvyšuje s rostoucím obsahem Al. Tažnost u slitiny AS91 je značně nižší než u slitiny AS11, což se dá také přisuzovat přítomnosti křehkých intermetalických fází [28].

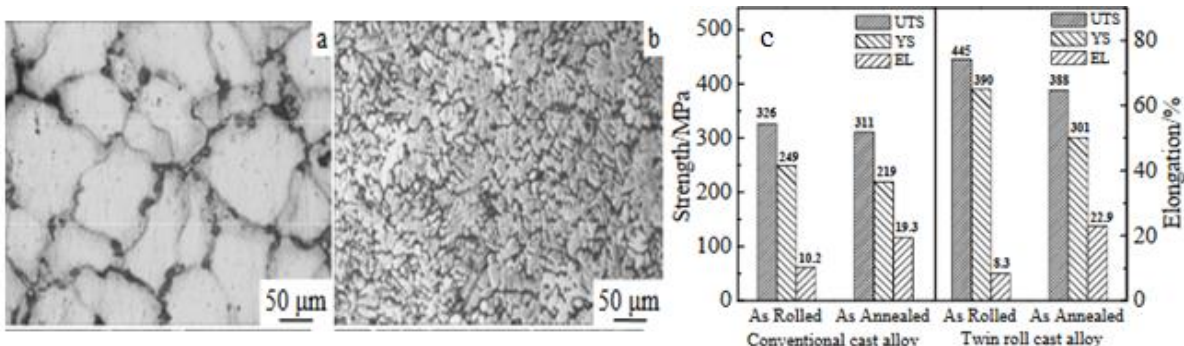
3.4. Mg-Zn-Zr

Zirkonium je běžně používaný legující prvek pro hořčikové slitiny. Má poměrně nízkou rozpustnost v tuhém stavu v Mg (0,73 %) a netvoří s Mg žádné intermetalické fáze. Přidává se do hořčikových slitin kvůli zjemnění zrna, díky čemuž se výrazně zlepši kvalita slévaných slitin a také jejich mechanické vlastnosti. I proto našlo Zr uplatnění v komerčních slitinách, např. slitina ZK60 se využívá v letectví (brzdové kryty či přistávací podvozky). Nynější studie testují hořčikové slitiny s obsahem Zr pro použití v biomedicině [29].

Zinek se podílí na precipitačním vytvrzování slitiny Mg-Zn-Zr a vytváří také intermetalické sloučeniny Zn_2Zr , které zmírňují lámání precipitátů vytvořených precipitačním vytvrzováním. Jak je již výše zmíněno, Zr je účinným prvkem při zjemňování zrna hořčikových slitin. Přidáním malého množství Zr do roztaveného hořčíku se téměř dvojnásobně sníží velikost zrna odlévaných slitin a dosáhne se téměř rovnoosé a jednodušší mikrostruktury. Zr se používá ve většině komerčních slitin pro zjemnění zrna, avšak nelze použít u slitin s Al, jelikož by došlo ke vzniku stabilní sloučeniny Al-Zr a nedosáhlo by se tak požadovaného efektu. Proto se Zr pro zjemnění zrna využívá přednostně u slitin, ve kterých je jako hlavní legující prvek přítomen Zn. Slitiny o základu Mg-Zn navíc vykazují dobrou odezvu na precipitační vytvrzování, dokonce jednu z nejlepších mezi hořčikovými slitinami [30].

Na obrázku 19 je zdokumentována mikrostruktura slitiny ZK60, která byla vyrobena klasickým válcováním a metodou twin roll casting. Slitina vyrobená metodou twin roll casting má výrazně jemnější strukturu a lepší mechanické vlastnosti než slitina, která byla vyrobena klasickým válcováním. Eutektické a mezidendritické sloučeniny jsou tvořeny hlavně prvky Mg a Zn. Mikrostruktura dosažená metodou twin roll casting je tvořena dendritickou strukturou

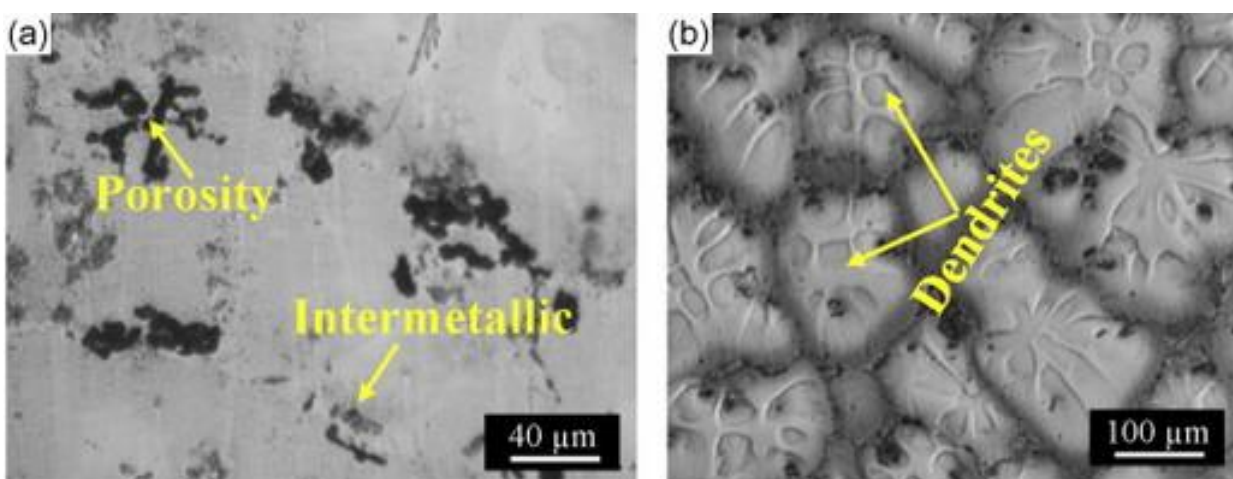
a eutektickými a intermetalickými sloučeninami, které se nachází v mezidendritických prostorech. Z příloženého grafu na obrázku 19c je pak patrné, že při použití metody twin roll casting dosáhneme u stejné slitiny značně lepších mechanických vlastností. Žiháním se pak navíc dosáhne určité rovnováhy mezi pevnostními vlastnostmi a tažností [17].



Obr. 19 Mikrostruktura slitiny ZK60 a) vyrobená klasickým válcováním b) vyrobená metodou twin roll casting a c) jejich mechanické vlastnosti [17]

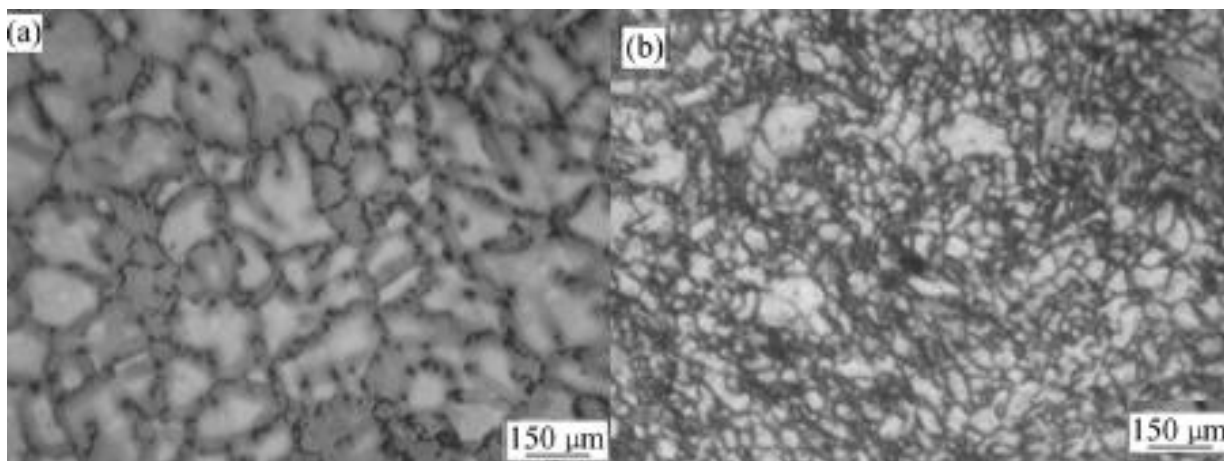
Jak již bylo řečeno, odlévání je nejběžnější a ekonomicky výhodný způsob výroby. Jeho nevýhodou je však tvorba defektů (např. pórovitost nebo vměstky), jak je patrné z obr. 20. Tváření naopak nabízí výslednou vyšší pevnost, dobrou houževnatost a lepší mikrostrukturu v porovnání se odlévanou slitinou.

Na obr. 20 jsou zdokumentovány mikrostruktury odlévané (a) a tvářené (b) slitiny ZK60. U odlévané slitiny se v mikrostruktuře nachází póry a intermetalika ($MgZn_2$ and Zn_2Zr). Tvářená slitina vykazuje jemnozrnější strukturu a výrazně nižší pórovitost v porovnání s odlévanou slitinou. Intermetalika se v tvářené mikrostruktuře nevyskytují v takovém množství, protože během tváření se část sekundárních fází rozpustí. Tím se zlepšuje únavová odolnost, protože intermetalické částice jsou považovány za koncentrátoři napětí a iniciátory únavových trhlin. Menší pórovitost také napomáhá zlepšení únavové odolnosti [7].



Obr.20 (a) mikrostruktura odlévané slitiny ZK60, (b) mikrostruktura tvářené slitiny ZK60 [7]

Jednou z metod tváření využívaných u hořčíkových slitin je extruze. Vliv tváření na mikrostrukturu je patrný z obr. 21, na kterém jsou zdokumentovány mikrostruktury slitiny ZK60 po odlití (a) a po extruzi (b). Pro strukturu odlitého vzorku jsou typická větší zrna s eutetikem (Mg-Zn) vyloučeným po hranicích zrn. U extrudovaného vzorku je struktura mnohem jemnější a jednodušší [31].



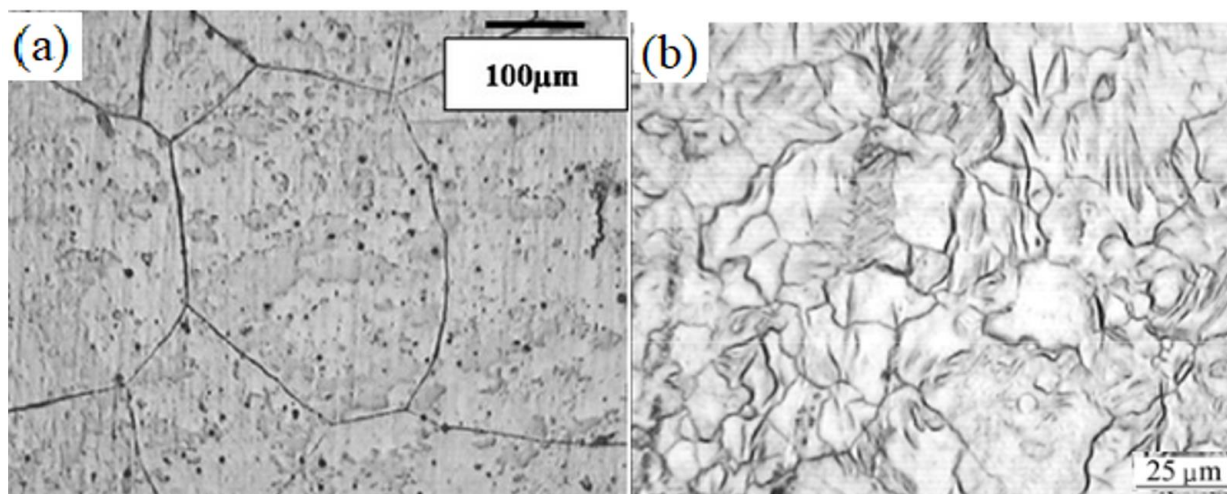
Obr. 21 Mikrostruktura slitiny ZK60 vyrobená a) odléváním b) extruzí [31]

3.5. Mg-Zn-Mn

V automobilovém a leteckém průmyslu se díky vysoké měrné pevnosti a výslednému šetření energie upřednostňují lehké metalické slitiny. Přestože je hořčík nejllehčí konstrukční kov, jeho použití je limitováno některými aspekty, například nedostačujícími mechanickými vlastnostmi nebo nedostatečnou korozivzdorností. Slitinový systém Mg-Zn nabízí slitiny s relativně dobrou mezí pevnosti, dobrou kujností a tlumícími schopnostmi. Tyto slitiny mají dobrou korozivzdornost, protože se vytváří metastabilní fáze jako $MgZn$, $MgZn_2$ a Mg_2Zn_3 , které zabraňují postupu koroze. Mn se do slitin Mg-Zn přidává hlavně kvůli dalšímu zlepšení korozní odolnosti. Jeho účinek spočívá ve vyvázání škodlivých prvků (např. Fe) a vytváření relativně neškodných sloučenin. Mechanické vlastnosti se přidáním Mn příliš neovlivňují a jen výjimečně se přidává více než 1 % [1, 2, 32].

Slitiny typu ZM našly využití například ve Formuli 1, kde byly ze slitiny ZM21 vyrobeny závodní ráfky kol. Slévárenská slitina ZM21 je poměrně levná a vhodná pro následné tváření. Mikrostruktura odlité slitiny, zdokumentována na obrázku 22a, je poměrně hrubozrnná, přítomny jsou také mikropóry, proto je nezbytné provést další zpracování pro zjemnění zrna a zlepšené mechanických vlastností.

Jeden z možných způsobů zpracování pro zlepšení mechanických vlastností odlévané slitiny ZM21 je extruze. Mikrostruktura slitiny po extruzi při 250 °C s extruzním poměrem 9:1 je zdokumentována na obr. 22b. V porovnání s mikrostrukturou odlévané slitiny má menší zrna a eliminovala se pórovitost, což se projevilo na výsledných mechanických vlastnostech. Rozdíly v mechanických vlastnostech jsou patrné z tabulky 10. Mez pevnosti slitiny po extruzi vzrostla téměř dvojnásobně. U tažnosti došlo pouze k mírnému zvýšení [32, 33].



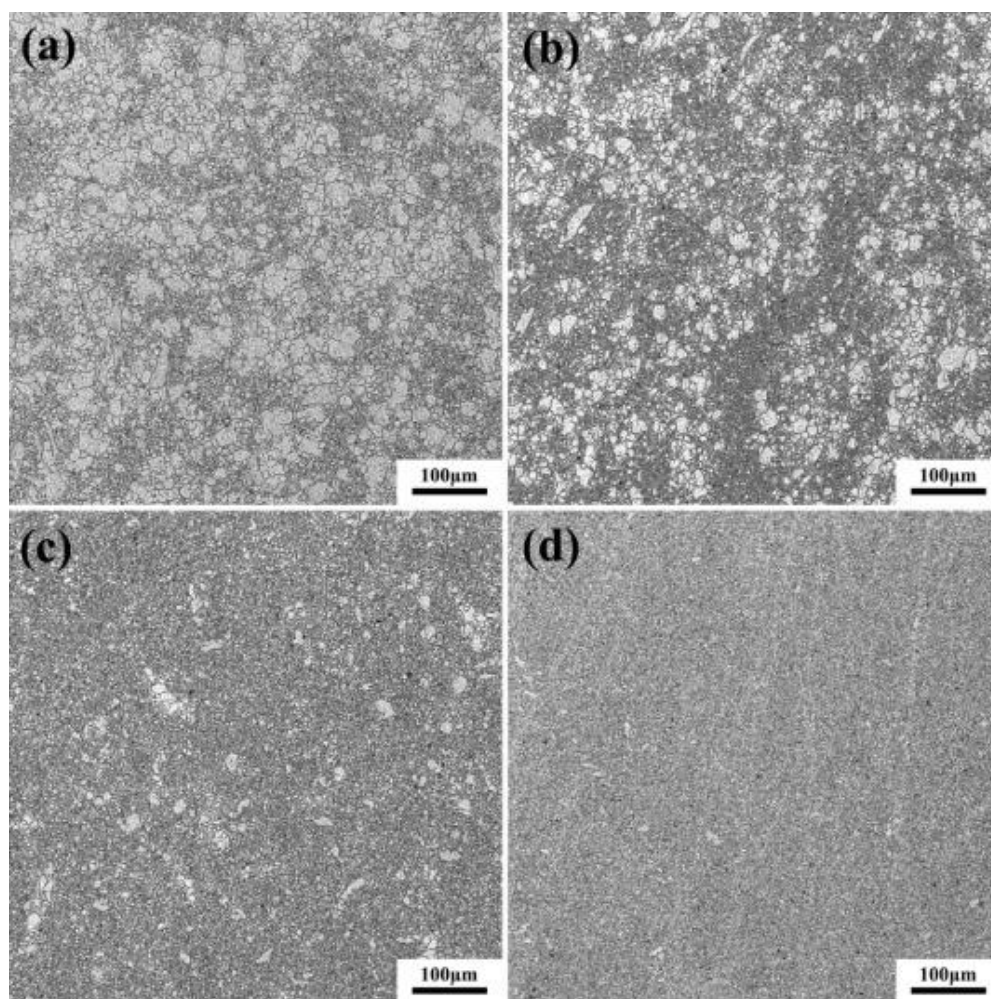
Obr. 22 Mikrostruktura slitiny ZM21 a) po odlití b) po extruzi [33]

Tab. 10 Mechanické vlastnosti slitiny ZM21 [32]

způsob výroby	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]
odlívání	160	9
extruze	316	10

Dalším způsobem, jak dále zlepšit mechanické vlastnosti, je provést precipitační vytvrzování ve spojení s extruzí. Extruze zajistí zjemnění a zrovnomnění struktury a díky precipitačnímu vytvrzení se ještě dále zvýší pevnostní charakteristiky. Příkladem slitiny vhodné pro precipitační vytvrzování je slitina ZM61. Je to poměrně levná slitina s dobrou pevností, kterou lze díky vysokému obsahu Zn (6 %) precipitačně vytvrzovat. Mez pevnosti u vytvrzené slitiny ZM61 může dosahovat až 366 MPa a mez kluzu až 336 MPa, výrazně však poklesne tažnost. Jedna z možností, jak předejít rapidnímu poklesu tažnosti, je provedení následné extruze, která zjemní výslednou strukturu [34].

Na obrázku 23a je znázorněna mikrostruktura slitiny ZM61 po extruzi bez předchozího tepelného zpracování. Mikrostruktury precipitačně vytvrzených slitin (230 °C/6, 24 a 48 hod) s následnou extruzí za teploty 300 °C v extruzním poměru 1:25 jsou zdokumentovány na obrázku 23b-d. Rozdíl mezi mikrostrukturami je poměrně značný. Mikrostruktura slitiny bez precipitačního vytvrzení je ve srovnání s ostatními poměrně hrubozrnná, velikost zrna se pohybuje v rozsahu od 3 do 50 μm. U slitiny, kde byla zvolena doba stárnutí 48 hodin, je struktura nejjemnější s velikostí zrna pohybující se okolo 1 μm. Všechny fáze jsou téměř dokonale promíseny [34].



Obr. 23 Mikrostruktura slitin ZM61 po a) odlítí a extruzi, po precipitačním vytvrzování s dobou: b) 6 hodin c) 24 hodin d) 48 hodin a následné extruzi [34]

Typické mechanické vlastnosti těchto slitin jsou zaznamenány v tabulce 11. Mez pevnosti, mez kluzu a tažnost se zvyšují s rostoucí dobou stárnutí. Mechanické vlastnosti slitin s dobou stárnutí 24 a 48 hodin se výrazně zlepšily v porovnání se slitinou bez stárnutí [34].

Tab. 11 Vliv stárnutí na slitinu ZM61 [34]

Doba stárnutí [hod]	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]
0	211	310	14,4
6	227	328	16,6
24	275	367	18,7
48	281	378	19,3

4. Diskuze

V této práci byl hodnocen vliv výroby a legujících prvků na mechanické vlastnosti různých hořčíkových slitin.

Klasické tlakové lití je nejlevnější a nejpoužívanější metodou výroby. Jeho výhodou je možnost vyrábět tvarově složité tenkostěnné výrobky (kryty mobilních telefonů nebo notebooků). Nevýhodou jsou však horší mechanické vlastnosti, takže pro výrobky přenášející vysoké zatížení se příliš nehodí. Alternativou může být metoda squeeze casting, která nabízí jedny z nejlepších mechanických vlastností výsledných výrobků ze všech používaných slévárenských technologií. Metoda je efektivní, lze ji využít k výrobě tvarově složitých součástí, je ekonomicky výhodná a využívá se proto například v automobilovém průmyslu. Tváření je naopak energeticky náročnější, ale výsledné mechanické vlastnosti jsou lepší než při odlévání. Metodou ECAP se dosahuje výjimečně jemného zrna a dobrých mechanických vlastností.

Metodou ECAP u slitiny AZ80 bylo dosaženo o 49 % vyšší meze kluzu, o 41 % vyšší meze pevnosti a téměř dvojnásobné tažnosti než při použití metody thixocasting. Extruzí u slitiny ZM21 se dosáhlo 49% nárůstu meze pevnosti a 10% nárůstu tažnosti oproti klasickému odlévání. Kombinací umělého stárnutí ve spojení s extruzí se výrazně zlepšují mechanické vlastnosti, jak bylo dokázáno na slitině ZM61. U precipitačně vytvrzené slitiny s dobu stárnutí 48 hodin bylo dosaženo nejlepších mechanických vlastností. Mez kluzu narostla o 15 %, mez pevnosti o 18 % a tažnost o 25 % oproti slitině pouze po extruzi [8, 20, 22].

Dalším progresivním způsobem tváření hořčíkových slitin je relativně nový způsob válcování twin roll casting, který je energeticky úspornější a efektivnější než klasický způsob válcování. Tímto způsobem tváření se dosahuje lepších mechanických vlastností, což je patrné z výsledků publikovaných pro slitinu ZK60, u které se oproti klasickému válcování zvýšily hodnoty meze pevnosti o 20 %, meze kluzu o 27 % a tažnosti o 16 % [17].

Na základě těchto informací se odlévané slitiny hodí spíše na výrobu komponentů, které jsou tvarově složité a je u nich požadována nízká váha. Naopak výroba tvářených slitin je sice o něco nákladnější, ale výsledné mechanické vlastnosti jsou lepší a mohou být použity pro součásti s větším mechanickým zatížením.

Nejrozšířenějším legujícím prvkem u hořčíkových litin je bezpochyby Al, který se Zn tvoří efektivní legující dvojici (slitiny typu AZ). Obecně platí, že s přibývajícím množstvím Al ve slitině roste množství intermetalické fáze $Mg_{17}Al_{12}$, která zvyšuje pevnost, ale snižuje tažnost. Aby se dosáhlo požadovaných vlastností, je třeba vhodně zvolit obsah Al při výrobě. Al se také využívá v kombinaci s Si (slitiny typu AS). Si tvoří s Mg intermetalickou fázi a také zlepšuje mechanické vlastnosti výsledné slitiny. AS slitiny jsou relativně ekonomické, ale mají poměrně nízkou tažnost.

Legováním PVZ vzrůstá celková cena slitiny, proto se využívají například u drahých sportovních nebo závodních aut a v letectví. Každý z PVZ ovlivňuje mechanické vlastnosti odlišně, jak bylo dokázáno na příkladu slitiny ZE20 legované Ce, Gd, Y, Nd. Pro maximální pevnost je vhodným legujícím prvkem Ce, zároveň však vykazuje nízkou tažnost. Poměrně vysoké tažnosti a jen o něco nižší meze pevnosti bylo dosaženo u slitiny s Nd. Nevyšší tažnosti z testovaných ZE slitin pak dosáhla slitina s přidáním Y [24].

5. Závěry

- Metoda ECAP je velmi účinná při zjemňování zrna a u hořčíkových slitin se využívá k dosažení nejlepších hodnot mechanických vlastností.
- Při legování Al se vytváří intermetalická sloučenina $Mg_{17}Al_{12}$, která se přednostně vylučuje se na hranicích zrn a výrazně ovlivňuje celkové mechanické vlastnosti slitiny.
- U slitin obsahující Zn se vyskytují póry. Jejich množství je možné redukovat tvářením (např. extruzí).
- U tvářených slitin se dosahuje jemnější mikrostruktury než u slévárenských slitin.

6. Seznam použité literatury

- [1] AVEDESIAN, M. M. a Hugh. BAKER. *Magnesium and magnesium alloys*. Materials Park, OH: ASM International, 1999. ISBN 08-717-0657-1.
- [2] DRÁPALA, Jaromír. *Hořčík, jeho slitiny a binární systémy hořčík - příměs: Magnesium, its alloys and Mg-admixture binary systems*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0579-0.
- [3] MORDIKE, B.L, T EBERT, Yingxin WANG, Xiaoqin ZENG a Wenjiang DING. Magnesium. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2001, **302**(1), 37-45 [cit. 2018-03-23]. DOI: 10.1016/S0921-5093(00)01351-4. ISSN 09215093. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509300013514>
- [4] AKYUZ, Birol, O BEFFORT, A WAHLEN a P.J UGGOWITZER. Influence of Al content on machinability of AZ series Mg alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2013, **23**(8), 2243-2249. DOI: 10.1016/S1003-6326(13)62724-7. ISSN 10036326. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1003632613627247>
- [5] https://www.ferona.cz/cze/katalog/nezelezne_kovy.php [online]. [cit. 2017-11-07].
- [6] 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>
- [7] KARPVARFARD, S.M.H., Yu S.K.SHAHA, S.B. BEHRAVESH, H. JAHED a B.W. WILLIAMS. Fatigue Characteristics and modeling of Cast and Cast-Forged ZK60 Magnesium Alloy. *International Journal of Fatigue* [online]. 2018, **40**(10), - [cit. 2018-03-28]. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.03.019. ISSN 01421123. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142112318301117>
- [8] KLEINER, S, O BEFFORT, A WAHLEN a P.J UGGOWITZER. Microstructure and mechanical properties of squeeze cast and semi-solid cast Mg–Al alloys. *Journal of Light Metals*. 2002, **2**(4), 277-280. DOI: 10.1016/S1471-5317(03)00012-9. ISSN 14715317. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1471531703000129>
- [9] XIAO, Wenlong, Shusheng JIA, Lidong WANG, Yaoming WU a Limin WANG. The microstructures and mechanical properties of cast Mg–Zn–Al–RE alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009, **480**(2), L33-L36. DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.02.087. ISSN 09258388. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092583880900317X>
- [10] ROUČKA, J. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: CERM, 2004. 148s. ISBN 8021427906

- [11] LUO, Alan A. Magnesium casting technology for structural applications. *Journal of Magnesium and Alloys* [online]. 2013, **1**(1), 2-22 [cit. 2018-04-29]. DOI: 10.1016/j.jma.2013.02.002. ISBN 10.1016/j.jma.2013.02.002. ISSN 22139567. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2213956713000030>
- [12] MIDSON, Stephen P. Industrial Applications for Aluminum Semi-Solid Castings. *Solid State Phenomena* [online]. 2014, **217-218**(1), 487-495 [cit. 2018-04-29]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.217-218.487. ISSN 1662-9779. Dostupné z: <http://www.scientific.net/SSP.217-218.487>
- [13] HAGA, Toshio a P KAPRANOS. Simple rheocasting processes. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2002, **130-131**, 594-598 [cit. 2018-04-29]. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00819-1. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013602008191>
- [14] GHOMASHCHI, M.R a A VIKHROV. Squeeze casting: an overview. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2000, **101**(1-3), 1-9 [cit. 2018-04-29]. DOI: 10.1016/S0924-0136(99)00291-5. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013699002915>
- [15] [online]. [cit. 2018-01-24]. Dostupné z: <http://www.themetalcasting.com/squeeze-casting.html>
- [16] [online]. [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/02.htm
- [17] HONGMEI, Chen, Yu HUASHUN, Kang Suk BONG, Min GUANGHUI a Jin YUNXUE. Effect of Forming Process on Microstructure and Mechanical Properties of ZK60 Alloy Sheet. *Rare Metal Materials and Engineering* [online]. 2011, **40**(10), 1708-1712 [cit. 2018-03-28]. DOI: 10.1016/S1875-5372(12)60004-6. ISSN 18755372. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875537212600046>
- [18] DAYAL, Atul, K. Hans RAJ a Rahul Swarup SHARMA. *Investigation of ECAP process for enhancing process efficiency* [online]. [cit. 2018-03-19]. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.160. ISBN 10.1016/j.matpr.2017.11.160. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214785317324069>
- [19] SKLENICKA, Vaclav, Jiri DVORAK, Milan SVOBODA, Petr KRAL a Marie KVAPILOV. Equal-Channel Angular Pressing and Creep in Ultrafine-Grained Aluminium and Its Alloys. *Aluminium Alloys - New Trends in Fabrication and Applications* [online]. InTech, 2012, 2012-12-05 [cit. 2018-03-19]. DOI: 10.5772/51242. ISBN 978-953-51-0861-0. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/aluminium-alloys-new-trends-in-fabrication-and-applications/equal-channel-angular-pressing-and-creep-in-ultrafine-grained-aluminium-and-its-alloys>

- [20] TANG, Lingling, Yonghao ZHAO, R.K. ISLAMGALIEV, Chi Y.A. TSAO, R.Z. VALIEV, E.J. LAVERNIA a Y.T. ZHU. Enhanced strength and ductility of AZ80 Mg alloys by spray forming and ECAP. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2016, **670**, 280-291 [cit. 2018-03-21]. DOI: 10.1016/j.msea.2016.06.031. ISSN 09215093. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509316306876>
- [21] YUAN, Yuchun, Aibin MA, Xiaofan GOU, Jinghua JIANG, Godfred ARHIN, Dan SONG a Huan LIU. Effect of heat treatment and deformation temperature on the mechanical properties of ECAP processed ZK60 magnesium alloy. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2016, **677**(7), 125-132 [cit. 2018-04-04]. DOI: 10.1016/j.msea.2016.09.037. ISSN 09215093. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509316311029>
- [22] ALAM, Md Ershadul, Abdel Magid Salem HAMOUDA, Quy Bau NGUYEN a Manoj GUPTA. Improving microstructural and mechanical response of new AZ41 and AZ51 magnesium alloys through simultaneous addition of nano-sized Al₂O₃ particulates and Ca. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2013, **574**, 565-572 [cit. 2018-03-25]. DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.04.207. ISSN 09258388. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838813011390>
- [23] LUO, A.A., Shusheng JIA, Lidong WANG, Yaoming WU a Limin WANG. Recent magnesium alloy development for elevated temperature applications. *International Materials Reviews*. 2013, **49**(1), 13-30. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(98\)00122-5](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(98)00122-5). ISSN 0950-6608. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/095066004225010497>
- [24] LE, Qi-chi, Zhi-qiang ZHANG, Zhi-wen SHAO, Jian-zhong CUI a Yi XIE. Microstructures and mechanical properties of Mg-2%Zn-0.4%RE alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* [online]. 2010, **20**, s352-s356 [cit. 2018-03-23]. DOI: 10.1016/S1003-6326(10)60496-7. ISSN 10036326. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1003632610604967>
- [25] LI, Qiang, Qudong WANG, Yingxin WANG, Xiaoqin ZENG a Wenjiang DING. Effect of Nd and Y addition on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg–Zn–Zr alloy. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2007, **427**(1-2), 115-123 [cit. 2018-03-23]. DOI: 10.1016/j.jallcom.2006.02.054. ISSN 09258388. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838806002659>
- [26] ZHENG, Liuwei, Huihui NIE, Wanggang ZHANG, Wei LIANG a Yide WANG. Microstructural refinement and improvement of mechanical properties of hot-rolled Mg–3Al–Zn alloy sheets subjected to pre-extrusion and Al–Si alloying. *Materials Science and Engineering: A*. 2017, **49**(1), -. DOI: 10.1016/j.msea.2017.12.048. ISSN 09215093. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509317316453>

- [27] CANDAN, Sennur, Ercan CANDAN, Wanggang ZHANG, Wei LIANG a Yide WANG. A comparative study on corrosion of Mg–Al–Si alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2017, **27**(8), 1725-1734. DOI: 10.1016/S1003-6326(17)60195-X. ISSN 10036326. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S100363261760195X>
- [28] AKYÜZ, Birol. Influence of aluminum content on machinability of AS series cast magnesium alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* [online]. 2014, **24**(11), 3452-3458 [cit. 2018-04-07]. DOI: 10.1016/S1003-6326(14)63488-9. ISSN 10036326. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1003632614634889>
- [29] GANDEL, D.S., M.A. EASTON, M.A. GIBSON, T. ABBOTT a N. BIRBILIS. The influence of zirconium additions on the corrosion of magnesium. *Corrosion Science* [online]. 2014, **81**, 27-35 [cit. 2018-03-26]. DOI: 10.1016/j.corsci.2013.11.051. ISSN 0010938X. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010938X13005337>
- [30] ROBSON, J.D. a C. PAA-RAI. The interaction of grain refinement and ageing in magnesium–zinc–zirconium (ZK) alloys. *Acta Materialia* [online]. 2015, **95**(1), 10-19 [cit. 2018-04-29]. DOI: 10.1016/j.actamat.2015.05.012. ISBN 10.1016/j.jma.2013.02.002. ISSN 13596454. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S135964541500333X>
- [31] PAN, Fu-sheng, Jian-jun MAO, Xian-hua CHEN, Jian PENG a Jing-feng WANG. Influence of impurities on microstructure and mechanical properties of ZK60 magnesium alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* [online]. 2010, **20**(7), 1299-1304 [cit. 2018-04-04]. DOI: 10.1016/S1003-6326(09)60294-6. ISSN 10036326. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1003632609602946>
- [32] THIRUMURUGAN, M., G.M. THIRUGNASAMBANDAM, S. KUMARAN a T. SRINIVASA RAO. Microstructural refinement and mechanical properties of direct extruded ZM21 magnesium alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* [online]. 2011, **21**(10), 2154-2159 [cit. 2018-04-08]. DOI: 10.1016/S1003-6326(11)60988-6. ISSN 10036326. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1003632611609886>
- [33] THIRUMURUGAN, M., S. KUMARAN, Satyam SUWAS a T. Srinivasa RAO. Effect of rolling temperature and reduction in thickness on microstructure and mechanical properties of ZM21 magnesium alloy and its subsequent annealing treatment. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2011, **528**(29-30), 8460-8468 [cit. 2018-04-08]. DOI: 10.1016/j.msea.2011.07.047. ISSN 09215093. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509311008264>
- [34] YU, Daliang, Dingfei ZHANG, Jing SUN, Yuanxin LUO, Junyao XU, Hongju ZHANG a Fusheng PAN. Improving mechanical properties of ZM61 magnesium alloy by aging before extrusion. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2017, **690**, 553-560 [cit. 2018-04-10]. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.08.128. ISSN 09258388. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838816325063>

- [35] LUO, Alan A. Magnesium casting technology for structural applications. *Journal of Magnesium and Alloys* [online]. 2013, **1**(1), 2-22 [cit. 2018-05-15]. DOI: 10.1016/j.jma.2013.02.002. ISSN 22139567. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2213956713000030>