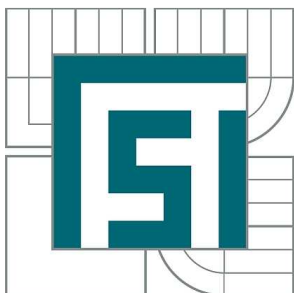


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TLAKOVĚ LITÉ ODLITKY Z MG SLITIN PRO AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL

MG-ALLOY DIE-CASTINGS FOR AUTOMOTIVE INDUSTRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

OLDŘICH HEJDUK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. JAROSLAV ČECH, CSc.

BRNO 2010

ABSTRAKT

Rešeršní práce zpracovaná v rámci bakalářského studia na téma Tlakově lité odlitky z Mg slitin pro automobilový průmysl. Cílem práce je popis vlastností hořčíkových slitin s důrazem na Mg slitiny určené pro tlakové lití. Experimentální část této práce je věnována ukázce možnosti měření a výpočtu zbytkových napětí na vzorku slitiny AZ91D odlitého pod tlakem.

Klíčová slova

Slitina hořčíku, tlakové lití, zbytková napjatost, AZ91

ABSTRACT

The thesis dealt in the degree of the bachelor study covers Mg-alloy die-castings for automotive industry. Major destination is description properties of Mg-alloy, special properties of Mg-alloy die-castings. Experimental part of this thesis deals possibility of mensuration and calculation residual tightness on the Mg-alloy die-casting AZ91D.

Key words

Mg-alloy, pressure die casting, residual tightness, AZ91

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HEJDUK, O. *Tlakově lité odlitky z Mg slitin pro automobilový průmysl*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 35s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Jaroslav Čech, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Tlakově lité odlitky z Mg slitin pro automobilový průmysl vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

28. května 2010

.....
Oldřich Hejduk

Poděkování

Děkuji tímto prof. Ing. Jaroslavu Čechovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

Abstrakt	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
OBSAH.....	7
1. Úvod	8
2. Teoretická část	9
2.1 Hořčík	9
2.1.1 Výskyt a výroba hořčíku	9
2.1.2 Využití hořčíku	10
2.2 Slitiny hořčíku	10
2.2.1 Mechanické vlastnosti slitin hořčíku	11
2.2.2 Technologické vlastnosti slitin hořčíku	12
2.2.3 Slévárenské slitiny hořčíku	13
2.2.4 Slitiny hořčíku pro tváření	16
2.2.5 Slitiny hořčíku pro tlakové lití	16
2.2.6 Tepelné zpracování hořčíkových slitin	21
2.3. Tlakové lití	22
2.3.1 Všeobecná charakteristika tlakového lití	22
2.3.2 Tlakové licí stroje	23
2.4 Zbytková pnutí	26
2.4.1 Rozdělení zbytkových pnutí	26
2.4.2 Metody zjišťování zbytkové napjatosti	28
3. Experimentální část	29
3.1 Cíl experimentu	29
3.2 Zjištění modulu pružnosti E [MPa]	30
3.2.1 Měření rychlostí průchodu podélných ultrazvukových vln	30
3.2.2 Vlastní výpočet modulu pružnosti E [MPa]	31
3.3 Zjišťování zbytkového napětí	32
3.3.1 Vlastní výpočet zbytkového napětí	33
4. Závěr	34
4. Literatura	35

1. ÚVOD

Slitiny hořčíku hrají důležitou roli při zvyšování podílu lehkých konstrukčních materiálů ve stavbě strojů v automobilovém či leteckém průmyslu, což přispívá také ke snižování zátěže životního prostředí. Snižování zátěže životního prostředí je jedním z nejdůležitějších požadavků současných trendů ve strojírenství. Toho lze dosáhnout mimo jiné úsporou paliva při snižování hmotnosti dopravních prostředků a tomu odpovídající úsporou energie při provozu. Znamená to zvýšit podíl lehkých konstrukčních materiálů například ve stavbě automobilů a letadel, tj. využívat slitiny lehkých kovů, kompozity, technické plasty apod. Kromě již tradičně používaných slitin hliníku, zde patří významné místo slitinám hořčíkovým, jejichž hustota je v porovnání se slitinami hliníku zhruba 1,5 krát menší (1740 kg.m^{-3}). Vedle nízké hustoty hořčíkových slitin je výhodná jejich výborná obrobitelnost, schopnost zlepšit kvalitu povrchu dalším zpracováním, relativně nízká cena a dobrá dostupnost. Nevýhodou je naopak zhoršená svařitelnost, špatná korozní odolnost, nízká odolnost za vyšších teplot a nedostatečná vrubová houževnatost. Dle statistiky IMA (International Magnesium Association) bylo v roce 2002 vyrobeno celkem 365 tisíc tun primárního Mg. Pro legování Al slitin bylo spotřebováno 145,6 tisíce tun, pro tlakové lití 127,8 tisíce tun (35 %), pro tvářené produkty bylo spotřebováno pouze 9 tisíc tun. V roce 2006 bylo podle IMA vyrobeno již 726 tisíc tun Mg, tedy přibližně dvakrát více než před čtyřmi lety, i z této statistiky se dá vyzorovat obrovský nárůst objemu výroby hořčíku. Těžišť využívání hořčíku je tedy především v oblasti legování a v přípravě slitin Mg v oblasti tlakového lití s malým podílem gravitačního lití. Slévárenské metody umožňují výrobu složitých součástí, a to jak v hromadné, tak i v malosériové výrobě. Jejich nevýhodou, ve srovnání s metodami tváření, je zbytková poréznost odlitků, ovlivňující zbytkovou napjatost a nižší mechanické vlastnosti, zejména tažnost a pevnost. V případě požadavku vyšších mechanických vlastností je vhodné přejít na tvářené výrobky. [1]

Využití hořčíkových slitin v různých odvětvích průmyslu v Evropě má stoupající tendenci, avšak je stále v odstupu za využitím těchto slitin ve Spojených státech amerických. V České republice prozatím neexistuje žádná slévárna pro tlakové lití hořčíkových slitin. Největším výrobcem odlitků ze slitin hořčíku je ČKD Hradec Králové a.s., nejedná se ovšem o tlakově lité odlitky, ale o gravitační lití do pískových forem.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Hořčík

Značkou hořčíku je Mg (Magnesium, atomové číslo 12), je to lehký, středně tvrdý stříbrolesklý kov, druhý nejlehčí z kovů alkalických zemin. Teplota tání dosahuje u hořčíku hodnoty 650 °C, teplota varu 1107 °C. Vede h ůře elektrický proud a teplo. Hořčík není tolik reaktivní jako další kovy alkalických zemin, a proto se neuchovává pod petrolejem nebo naftou, ale stačí v nádobě se suchým vzduchem. Hořčík se velmi dobře slévá s jinými kovy, ale jen málo z nich můžeme využít v praxi, protože většina snadno oxiduje. Hořčík reaguje za normální teploty s kyslíkem a s vodou. Na suchém vzduchu se postupně pokryje vrstvou oxidu, která jej chrání před další oxidací, a lze jej takto uchovávat i poměrně dlouhou dobu. Při hoření hořčíku na vzduchu vzniká velmi intenzivní bílé světlo. Při vyšší teplotě se hořčík slučuje velmi ochotně téměř se všemi prvky a i s některými sloučeninami - např. při hoření hořčíku v dusíkaté atmosféře vznikne nitrid hořečnatý. Hořčík se velmi dobře rozpouští ve všech běžných kyselinách za vzniku hořečnatých solí. S alkalickými hydroxidy hořčík nereaguje. Hořčík byl objeven v roce 1774 a pojmenován po dávném městě Magnesia. Poprvé byl hořčík v elementární formě elektrolýzou taveniny chloridu hořečnatého $MgCl_2$ připraven roku 1808. Chemickou cestou tomu bylo poprvé působením par kovového draslíku na bezvodý chlorid hořečnatý v roce 1830. [2]

2.1.1 Výskyt a výroba hořčíku

Hořčík je silně zastoupen jak v zemské kůře, tak ve vesmíru. Podle posledních dostupných údajů tvoří hořčík 1,9 – 2,5 % zemské kůry, čímž se řadí na 6. místo, za vápník a před sodík a draslík podle výskytu prvků. V mořské vodě se koncentrace hořčíkových iontů udává jako 1,35 g/l a jsou tak po sodíku druhým nejvíce zastoupeným kationtem, mořská voda obsahuje zejména chlorid hořečnatý $MgCl_2$, bromid hořečnatý $MgBr_2$ a síran hořečnatý $MgSO_4$. [2] Hořčík je tedy obsažen prakticky v nevyčerpatelném množství v mořské vodě, dolomitu, magnezitu, karnaulitu a v řadě dalších nerostů. Hořčík je vyráběn termickou redukcí nebo elektrolyticky, přičemž pro velkovýrobu je vhodný zejména způsob elektrolytický. [8] Termický způsob, spočívá v redukcí oxidu hořečnatého karbidem vápenatým nebo uhlíkem. Elektrolytický způsob výroby hořčíku spočívá v elektrolýze roztavené směsi chloridu hořečnatého a chloridu draselného. Chlorid draselný slouží jako přísada ke snížení teploty tání chloridu hořečnatého. Chlorid hořečnatý se získává z mořské vody nebo z koncentrovaných roztoků mořské soli nebo tavením karnalitu. [2]

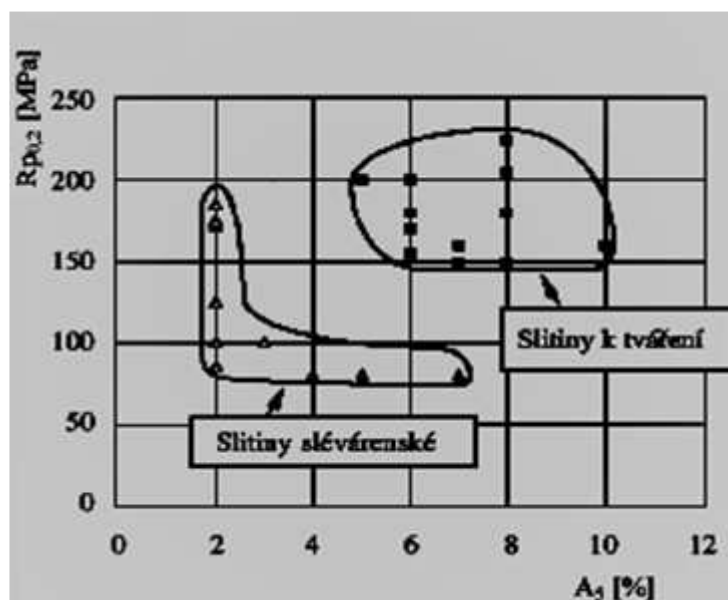
2.1.2 Využití hořčíku

Použití hořčíku je značně široké a různorodé. Hlavní oblasti použití tohoto kovu jsou například:

- Jako legovací přísada ve slitinách hliníku
- Vlastní slitiny
- Odsiřování železa a oceli a výroba litiny s kuličkovým grafitem
- Redukční látka při výrobě titanu, berylia, zirkonu a uranu
- Ochrana proti elektrochemické korozi
- Slože pro pyrotechniku [8]

2.2 Slitiny hořčíku

Slitiny hořčíku jsou v současné době materiálovou skupinou s nejrychlejším nárůstem objemu výroby. Důvodem je především nízká hustota, kombinovaná s výbornými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi, dobrou obrobiteľností a v neposlední řadě také dobrými slévárenskými vlastnostmi, ke kterým přispívá nízká tavící teplota. Historie používání hořčíkových slitin je poměrně krátká a je spojena s rozvojem automobilového průmyslu a letectví. Nejznámějším příkladem je sériové nasazení hořčíkových odlitků při výrobě auta VW-brouk ve 30 letech minulého století. Velký rozvoj výroby byl zaznamenán zejména po začátku 2. světové války v roce 1939. Po válce výroba poměrně dlouho stagnovala a prudký nárůst je zaznamenán až asi od 80.let 20.století. V současné době jsou hořčíkové odlitky standardně používány v konstrukci osobních aut, náradí, přístrojů a všech výrobků, v nichž se uplatní nízká hmotnost.[3] Podle vžitých zvyklostí rozdělujeme slitiny hořčíku na slitiny slévárenské a slitiny pro tváření viz obr. 1.



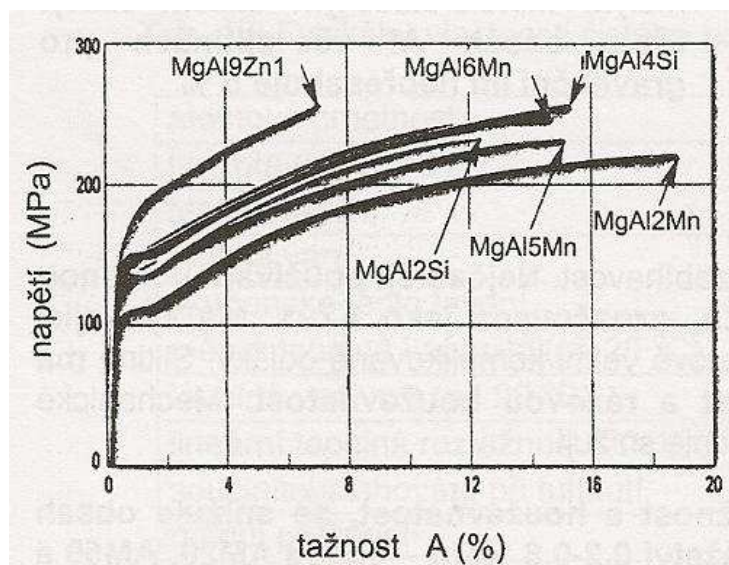
Obr. 1 :Porovnání meze kluzu a tahové pevnosti slévárenských slitin Mg a slitin Mg pro tváření [7]

2.2.1 Mechanické vlastnosti slitin hořčíku

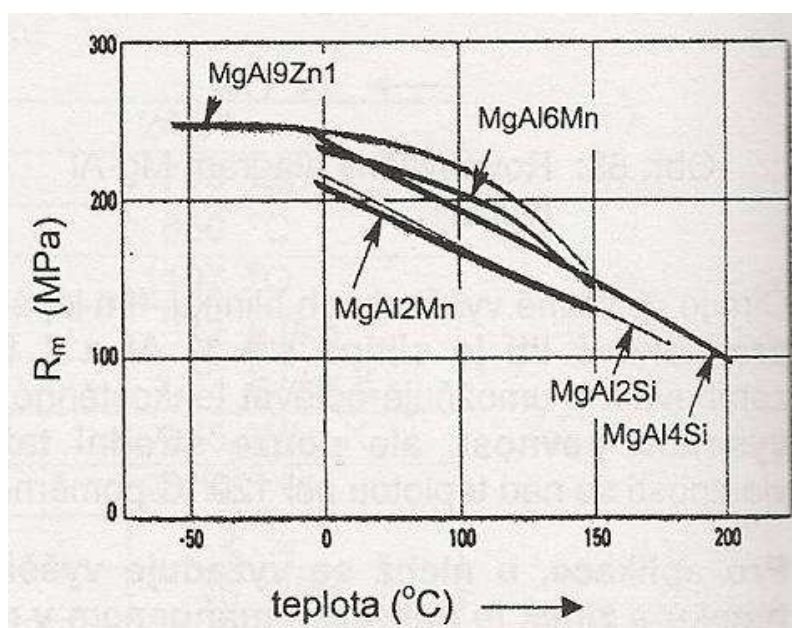
Za studena je hořčík málo pevný a špatně tvárný. Tvárným se stává až od teplot 225°C . Pro zvýšení vlastností se přidávají další prvky, zejména Al, Mn, Zn a Si. Hliník podstatně zvyšuje pevnost a tvrdost, zlepšuje slévárenské vlastnosti a zmenšuje smrštivost při tuhnutí. Některé mechanické vlastnosti vybraných slitin hořčíku uvádí tabulka 1. Většina přísad tvoří s Mg soustavu s eutektickým bodem, s omezenou klesající rozpustností na straně Mg a s tvorbou intermediární fáze. Rozpustnost přísad v Mg se v závislosti na teplotě značně mění. Tvary rovnovážných diagramů binárních slitin umožňují jeho vytvrzení. Toto však nepřináší takové zlepšení vlastností jak u slitin hliníku. Slitina Mg-Al tvoří rovnovážný diagram se změnou rozpustnosti v tuhém stavu. Nevýhodou slitin Mg je prudký pokles pevnosti za zvýšených teplot, jak ukazuje obrázek 3. Toto chování omezuje jejich použití na max. 120°C . Další nevýhodou je jejich nízká odolnost proti creepu, která je zapříčiněna stoupajícím objemovým množstvím Al. Data o chování Mg slitin při cyklickém namáhání jsou ještě dnes velmi sporadická. Výzkum se musí také zaměřit na problematiku vměstků a nečistot, které výrazným způsobem snižují mechanické vlastnosti. [5]

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

Tab. 1 : Mechanické vlastnosti vybraných slitin hořčíku při normální teplotě [3]



Obr. 2 : Tahový diagram vybraných slitin Mg [3]



Obr. 3 : Pevnost za vyšších teplot [3]

2.2.2 Technologické vlastnosti slitin hořčíku

Technologie tváření vybraných hořčíkových slitin je dána specifikem hexagonální krystalické mřížky základního tuhého roztoku a stavem mikrostruktury. V současné době pracuje řada výzkumných pracovišť na ověření podmínek jejich superplasticity. Spojování slitin hořčíku je možno provádět téměř všemi běžnými postupy. Při obloukovém svařování pod inertním plynem je třeba brát v úvahu specifika materiálu, přídavného kovu a tvaru svařovaných dílů. Jako přídavný materiál se bere s dostatečným výsledkem slitina, která se svařuje. Výborné výsledky byly získány při použití přídavného materiálu ze slitin typu HM21 a HM31 (s thoriem a manganem). Bodové a švové svařování vykazuje velmi dobré pevnosti spojů při aplikaci statického namáhání. Není však vhodné pro namáhání únavové nebo tam, kde svařenec bude podroben vibracím. Významná a perspektivní je technologie spojování hořčíkových slitin lepením. Únavové charakteristiky lepených spojů jsou lepší než u jiných postupů spojování. Při lepení nedochází ke vzniku koncentrátorů napětí (strukturním a mechanickým vrubům). Technologie se osvědčuje zejména u výrobků s malou tloušťkou stěn a je tedy přínosná zejména v leteckém průmyslu. Nýtování je u slitin hořčíku rovněž běžná technologie spojování. U plechů je však třeba dbát na kvalitu povrchu otvorů. Jemné praskliny vzniklé při prostřihování otvorů výrazně snižují nosnost spoje. Dalším problémem je volba materiálu nýtů. Nýty a základní materiál nesmí tvořit elektrické mikročlánky. Řezné obrábění je technologie tvarování pro hořčíkové slitiny velmi výhodná. Důvodem je vynikající obrobiteľnost při použití velké škály rezných rychlostí. Obráběním za mokra v emulzích se dosahuje výborných kvalit obráběného povrchu. Pro obrábění se nejčastěji používají nástroje ze slinutých karbidů, rychlořezné oceli a nástroje keramické. Při použití olejovodných emulzí pro obrábění za mokra je třeba brát v úvahu možnost vývoje plynného vodíku, který je v koncentracích 4 až 74 % vznětlivý. [7]

Z hlediska technologie slévání slitin Mg se dnes nejvíce používají následující postupy lití:

- lití do pískových forem
- gravitační lití do kovových forem
- lití pod nízkým tlakem
- lití pod tlakem s teplou komorou
- lití pod tlakem se studenou komorou

Při lití pod vysokým tlakem se ocelová dutina formy plní v krátké době tekutým kovem a umožňuje kombinovat výrobu vysoce přesných odlitků s tenkými stěnami a vysokými rychlostmi tuhnutí. Je možné vyrábět vysoce přesné součásti ze slitin hořčíku o hmotnosti od několika gramů až do 25 kg s maximální plochou 1 m² a minimální tloušťkou stěny kolem 1 – 3 mm. Rychlost taveniny ve vtokovém zářezu se pohybuje v hodnotách 20 m/s až 100 m/s. Tavenina tuhne pod tlakem v rozsahu od 20 MPa do 100 MPa. Doba trvání cyklu závisí na velikosti odlitku a tlaku tlakového licího stroje a pohybuje se od 20 s do 120 s. [8]

2.2.3 Slévárenské slitiny hořčíku

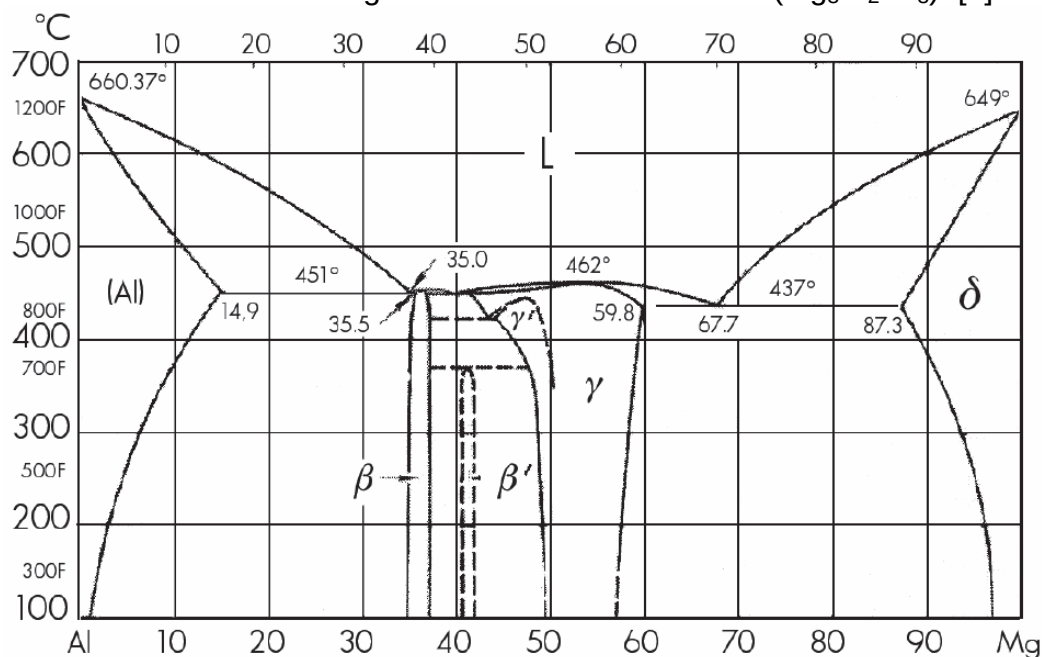
Z hlediska chemického složení se většina slévárenských slitin významně neliší od tvářených slitin. Podobně jako u jiných materiálových skupin mají odlitky ze slitin hořčíku horší mechanické vlastnosti než součásti zhotovené tvářením. Teplotní rozmezí, ve kterém slitiny hořčíku mají konstrukčně využitelné vlastnosti (196 až 250 °C při době funkce delší než 100 hodin), bylo rozšířeno přísadou thoria až do 350°C.[8]

Základem slévárenských slitin hořčíku jsou binární slitiny rozšířené o další legury za účelem zlepšení technologických vlastností, mechanických vlastností nebo zvýšení odolnosti proti korozi. Takové základní systémy jsou Mg-Al, Mg-Zn a Mg-Mn, popřípadě Mg-Li. Další doplňkové kovy jsou Th, Zr, Si, Ag, Ti a kovy vzácných zemin (La, Ce, Nd, Pr, Sc, Gd, Y). Specifickým slévárenským problémem je vysoká hořlavost hořčíkových slitin v roztaveném stavu. Tavenina musí být chráněna vhodnou struskou nebo atmosférou, která se vyvíjí při hoření sirného květu na hladině taveniny. Plynné atmosféry jsou v současné době většinou směsí vzduchu, oxidu uhličitého a hexafluoritu síry. Pro snížení vznětlivosti doporučují někteří metalurgové přísadu berylia 0,005 až 0,2 % nebo přísadu 0,2 % vápníku. Vyšší obsah vápníku však zhoršuje odolnost proti korozi. [7]

Slitiny hořčíku s hliníkem

Slitiny typu Mg-Al-(Zn, Mn) jsou nejrozšířenější slitiny pro slévárenské účely. Mohou obsahovat ještě další legury (Zr, Th, Ag a Ce). Jsou nejstarší skupinou slévárenských slitin hořčíku. Jejich užité vlastnosti jsou dány existencí relativně široké oblasti tuhého roztoku δ v rovnovážném diagramu Mg-Al a možností změnit chemické složení přidáním dalších prvků. Nejrozšířenější z těchto slitin (s komerčním názvem elektron) jsou slitiny s obsahem 7 až 10 % Al. Slitiny s vyšším obsahem hliníku než 7 % jsou vytvrditelné, dochází k tvorbě diskontinuálního precipitátu fáze Mg₁₇Al₁₂ a bývají doplněny malým množstvím zinku a manganu. Slitiny jsou tvořeny tuhým roztokem δ , případně eutektikem ($\gamma + \delta$). Tepelné

zpracování je založeno na precipitačním vytvrzování za tvorby precipitátu fáze γ ($\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$) nebo se slitiny žíhají rozpouštěcím žíháním. Na rozpustnosti hliníku v tuhém roztoku δ a na polohu eutektického bodu má vliv modifikace, rychlost ochlazování a tlak při lití. Tyto parametry lze v širokých mezích ovlivňovat použitou slévárenskou technologií a je možno jich využít pro výrobu odlitků různých vlastností. Zinek ve slitinách Mg-Al se převážně rozpouští v hořčíku a rovněž se stává složkou precipitující fáze. Při určitém koncentračním poměru s hliníkem $\text{Zn/Al} = 1/3$ vzniká ve slitině Mg-Al-Zn intermetalická fáze T ($\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Zn}_3$). [7]



Obr. 4 : Rovnovážný diagram hliník – hořčík [7]

Soustava Mg-Al-Zn

Jedná se o nejpoužívanější slitiny hořčíku známé jako elektrony. Hlavním zpevňujícím prvkem je hliník, zinek nemá na zpevnění takový vliv jako hliník. Tyto slitiny mají sklon ke korozi pod napětím, tím větší, čím je vyšší obsah hliníku. Malá přísada manganu tuto odolnost zlepšuje. Ve srovnání s hliníkovými slitinami mají elektrony velký interval krystalizace (70 až 210 °C), proto je jejich zabíhavost nižší a objemové smrštění (1,1 až 1,9 %) se projevuje převážně jako pórovitost. Široký interval teplot krystalizace je také příčinou vzniku trhlin za tepla. Tyto nedostatky lze odstranit nebo alespoň potlačit přísadou prvků vzácných zemin a zirkonu zjemňujícího zrna. Maximální teplota pro dlouhodobou funkci elektronů je kolem 150 °C. Některé slitiny této soustavy obsahují jako další přísadový prvek křemík. [8]

Slitiny hořčíku se zinkem

Hořčíkové slitiny se zinkem se z hlediska strukturních složek podobají slitinám s hliníkem. Obsah zinku ve slévárenských slitinách bývá v rozsahu 0,3 až 0,5 %. Slitiny se zpracovávají žíháním precipitačním vytvrzováním, tj. rozpouštěcím žíháním 380 °C/10 h s ochlazením ve vodě. Technické slitiny hořčíku se zinkem obsahují také mangan (z důvodů zvýšení odolnosti proti korozi) nebo zirkon, popřípadě ještě kovy vzácných zemin. Tyto přísady výrazně ovlivňují mechanické vlastnosti a zvětšují oblast použitelnosti slitin zejména k vyšším teplotám. [7]

Soustava Mg-Zn-Zr

Tyto slitiny mají vyšší hodnoty meze kluzu a meze pevnosti v důsledku zpevňujícího vlivu zinku, hlavního přísadového prvku, a také zirkonu zjemňujícího zrna, menší citlivost mechanických vlastností na tloušťku stěny odlitků a menší sklon k mikroporovitosti. Zirkon zlepšuje odolnost proti korozi. Legování zirkonem je však spojeno s technologickými obtížemi pro jeho nízkou rozpustnost v roztaveném hořčíku. Případná přísada kadmia zlepšuje pevnost a tvárnost. Slitiny této soustavy jsou konstrukčně použitelné při dlouhodobé funkci v silově zatíženém stavu do 200 °C. [8]

Slitiny hořčíku s lithiem

Slitiny hořčíku s lithiem patří mezi nejjednodušší a perspektivní konstrukční materiály. Tyto slitiny lze rozdělit na slitiny binární a slitiny vícekomponentní. Slitiny hořčíku a lithia dosahují velmi nízkých hustot 1300 kg/m³ až 1500 kg/m³. Binární slitiny mohou být podle obsahu lithia tvořeny fází α (do 5,7 hm. % Li), směsí $\alpha + \beta$ (5,7 až 10,4 hm. % Li) a fází β (nad 10,4 hm. % Li). Fáze α má hexagonální těsně uspořádanou mřížku, fáze β je kubická, prostorově centrovaná. Krystalická stavba mění ve značném rozsahu mechanické vlastnosti jednotlivých slitin i vlastnosti technologické (zejména tvařitelnost). S růstem obsahu lithia se pevnost slitin Mg-Li snižuje, avšak modul pružnosti a mez kluzu v tlaku je vyšší než u většiny hořčíkových slitin. Nedostatkem hořčíkových slitin s lithiem je velká reaktivita komponent v roztaveném stavu, malá odolnost proti tečení a nestabilita mechanických vlastností za pokojových teplot. Výroba slitin hořčíku s lithiem je provázena řadou metalurgických problémů spočívajících zejména v rozdílu teplot tání obou kovů, rozdílu měrných hmotností a rozdílu tenze par. [7]

Soustava Mg-Li-Me

Pevnost v tahu binárních slitin Mg-Li je pro technické použití většinou příliš nízká. Proto bylo vyvíjeno mnoho kombinací slitin Mg-Li s dalšími přísadovými prvky, vyvolávajícími substituční zpevnění nebo precipitační vytvrzení. Tyto slitiny však obvykle vykazují nedostatečnou stabilitu mechanických vlastností ve vytvrzeném stavu. Nedostatkem je též nízká odolnost proti korozi základních slitin Mg-Li, zejména slitin s vyšším obsahem lithia. Dle starších výzkumů je tato nestabilita binárních slitin způsobena vysokou difusibilitou lithia a tvorbou oblastí obohacených lithiem, což vede k odpevnění slitin již za pokojové teploty. Tento nežádoucí pochod lze potlačit přísadou prvků s vysokou afinitou k lithiu, např. vodíkem. Takové materiály se připravují roztavením základní slitiny v atmosféře argonu, jejím zpracováním v plazmatu, následujícím rozprášením v inertním plynu a kompaktizováním. [7]

2.2.4 Slitiny hořčíku pro tváření

Slitiny hořčíku krystalizují v hexagonální, těsně uspořádané soustavě a vykazují za normální teploty pouze jeden skluzový systém. Tvárnost těchto materiálů se zlepšuje nad teplotou 220 °C, kdy vstupují do funkce další skluzové systémy a kdy se projevují rekrytalizační procesy. Plastická deformace by měla být podle typu slitiny volena tak, aby teplota tváření ležela nad teplotou solvu. Nejčastějšími technologiemi tváření je protlačování profilů, válcování plechů, popřípadě volné nebo zápustkové kování. Tvářecí teploty tedy leží v intervalech: kování 200 až 300 °C, protlačování 300 až 400 °C a válcování 400 až 500 °C. Slitiny můžeme podle legujících prvků rozdělit na:

- slitiny hořčíku s hliníkem a zinkem
- slitiny hořčíku s manganem
- slitiny hořčíku se zinkem a zirkonem

Strukturně typy slitin pro tváření odpovídají slitinám slévarenským. Tvářená struktura však má svoje specifika. Pro tvářené slitiny se nepoužívají jako legury kovy vzácných zemin. Slitiny tvoří výrazné textury a s nimi spojenou anizotropii mechanických vlastností. Deformační zpevnění lze u slitin hořčíku využít pouze v omezeném rozsahu. Slitiny s hliníkem mají obvykle přísadu zinku (do 1,5 %) a některé ještě přísadu manganu (zvyšuje odolnost proti korozi). Slitiny s manganem mají nízké mechanické vlastnosti, dobrou korozní odolnost a jsou výrobně i zpracovatelsky jednoduché. Mají dobrou tvárnost i svařitelnost. Vyrábí se z nich výlisky a válcují plechy. Slitiny se zinkem a zirkonem mají vhodnou kombinaci legur. Zinek zvyšuje mechanické vlastnosti, zirkon zjemňuje zrna. Nejvyšší mechanické vlastnosti mají slitiny po precipitačním vytvrzení. Poněkud specifické slitiny jsou slitiny s thoriem vyvinuté v Rusku. Tyto slitiny jsou vhodné pro vysoké teploty. Mechanické vlastnosti těchto slitin zůstávají stabilní až do teplot 350 °C.[7]

2.2.5 Slitiny hořčíku pro tlakové lití

Slitiny hořčíku lze odlévat různými metodami – gravitačním litím do trvalých či netrvalých forem, tlakovým litím nebo speciálními způsoby. Vlastnosti hotových odlitků jsou ovlivněny použitou metodou odlévání. Pro daný způsob odlévání jsou obvykle doporučovány vybrané slitiny. Moderním způsobem velkosériové výroby odlitků ze slitin hořčíku je tlakové lití na strojích se studenou nebo teplou komorou používané zejména k odlévání součástí pro automobily. K tlakovému lití jsou používány vybrané slitiny, jejichž vhodnost byla ověřena mnohaletou praxí. Nejčastěji používanou slitinou je AZ91. Porovnání mechanických a fyzikálních vlastností je uvedeno v tab.2. Pro odlitky vyžadující lepší lomovou houževnatost jsou určeny slitiny řady AM. Pro odlitky dlouhodobě zatížené za vyšších teplot jsou voleny slitiny řady AS a AE. Legující přísadou v těchto slitinách je křemík (slitiny AS) nebo prvky vzácných zemin (slitiny AE). [8]

Vlastnost	Mg slitina AZ91D	Al slitina A380	Zn slitina AG40A
Mez 0,2 kluzu v tahu [Mpa]	160	165	-
Mez pevnosti v tahu [Mpa]	240	331	283
Tažnost [%]	3	3	10
Rázová houževnatost [J] tyč Charpy bez vrubu	6	-	58
Modul pružnosti v tahu [Mpa]	45000	71000	85000
Pevnost ve střihu [Mpa]	138	186	214
Tvrdost podle Brinella	70	80	82
Mez únavy [Mpa] R. R. Moore 5×10^8 cyklů	97	145	48
Mez tečení pro 0,5 %, 100 h [Mpa]			
20 °C	138	165	76
90 °C	90	159	24
Měrná hmotnost při 20 °C [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	1810	2680	6600
Tepelná vodivost [$\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$] při 20 °C	51	96	113
Koeficient délkové teplotní roztažnosti [$\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] při 20 ÷ 100 °C	26,0	22,0	27,4

Tab. 2: Porovnání mechanických a fyzikálních vlastností tlakově odlévaných hořčíkových, hliníkových a zinkových slitin [8]

V tlakovém lití odlitků ze slitin hořčíku převládá vysokotlaké lití. Slitina tuhne vysokou ochlazovací rychlostí (100 – 1000 °C/s) a výsledná struktura je jemnozrnná. Významnou předností tlakového lití slitin hořčíku je možnost zhotovovat tenkostěnné odlitky s požadovanými přesnými rozměry a tvarem, vysoká rychlost odlévání a zvýšená životnost forem. Vlastnosti slitin hořčíku pro tlakové lití jsou však odlišné od vlastností tlakově odlévaných slitin hliníku a vyžadují tedy určité změny v parametrech vstřikování i v samotném tvaru formy.[8]

2.2.5.1 Tlakově lité hořčíkové slitiny pro automobilový průmysl

Slitiny hořčíku se po řadu let uplatňovaly převážně při výrobě draků letadel a vrtulníků, leteckých motorů a v raketové technice. Dnes se ze slitin hořčíku odlévají součásti nejen s velmi malou tloušťkou stěn, ale současně také mimořádně tvarově složité. Použití slitin hořčíku je dnes velmi významné i v dalších oblastech strojírenské výroby, a to zejména tam, kde snížení hmotnosti výrobku současně znamená snížení spotřeby látek zhoršujících životní prostředí. Typickým příkladem jsou motorová vozidla, ve kterých náhrada součástí tradičně vyráběných z ocelí nebo hliníkových slitin náhrada součástmi ze slitin hořčíku vede ke snížení celkové hmotnosti vozidla, zlepšení jeho jízdních vlastností, snížení spotřeby pohonných hmot, zlepšení měrných provozních parametrů a současně k respektování stále náročnějších ekologických požadavků. V motorových vozidlech jsou stále častěji používány odlitky ze slitin hořčíku, jako například přístrojové desky, kryty ventilů a hlav válců, skříň spojky a převodovky, brzdové a spojkové pedály, volanty, disky kol, díly sedadel, tělesa olejových pump, dveřní rámy, nosníky, příčníky a panely v karoseriích a další viz. tab 3.

Automobilový průmysl je a bude i nadále nejvýznamnějším spotřebitelem slitin hořčíku. Automobilové odlitky lité pod tlakem tvoří 85 % až 90 % z celkové hmotnosti odlitků litých pod tlakem vyrobených za rok a očekává se, že tento podíl zůstane zachován i v dohledné době. [8]

Interiér	Exteriér
Součásti sedadel	Kryt motoru
Palubní desky	Střešní panely
Lomené podpěrky	Zadní víko
Součásti sloupů řízení	Vozová kola
Volantová kola	Držák chladiče
Ramena pedálů	Držák masky chladiče
Schránky pro airbag	Řízení
Rámeček pro odvod tepla z rádia	Skříň ruční převodovky
Kryty rádia	Rozdělovací převodovka
Součásti posuvné střechy	Skříň automatické převodovky
Ramena zrcátek	Motor
Schránky pro dálková světla	Kryty hlav válců
Vnitřní rámy dveří	Sací potrubí
Výztužné sloupky	Držáky příslušenství pohonu
	Elektrické konektory
	Blok motoru
	Olejová vana
	Skříň startéru a alternátoru

Tab. 3 : Použití odlitků ze slitin hořčíku litých pod tlakem v motorových vozidlech [8]

Slitina AZ91D

je nejpoužívanější slitina hořčíku s výbornou slévateľností a dobrou pevností pro tlakově lité odlitky. Její typické použití je pro součásti automobilů a počítačů, mobilní telefony, sportovní nářadí, motorové skříně a kryty, brzdy, součásti řetězových pil, ruční nářadí, předměty pro domácnost apod. [8]

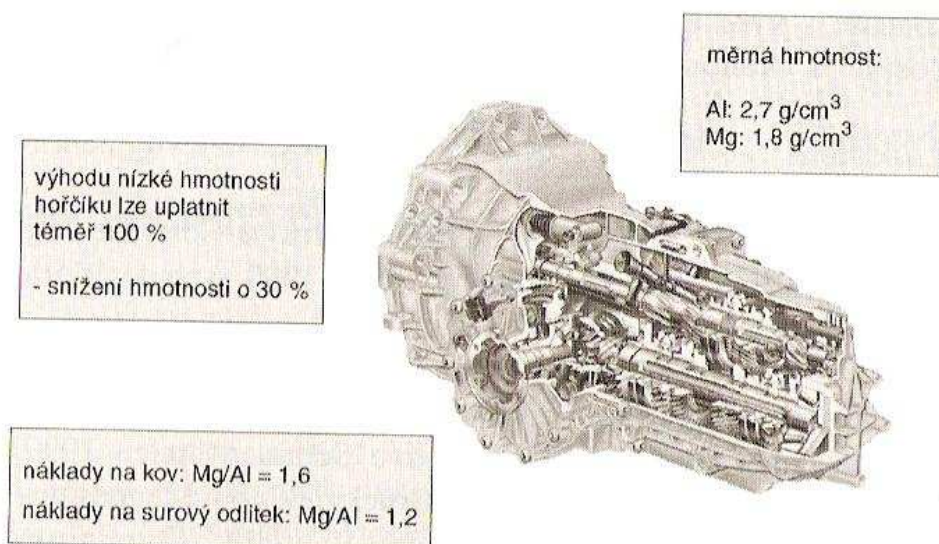
Příklady použití slitiny AZ91 v automobilovém průmyslu je znázorněno na obrázcích 5 – 7. Porovnání typických mechanických a fyzikálních vlastností nejužívanějších slitin hořčíku je uvedeno v tabulce 4.

Slitina AM50A a AM60B

jsou slitiny s mimořádnou tvárností a schopností tlumit vibrace, spolu s dobrou pevností a slévateľností. Typické použití je pro rámy automobilových sedadel, volanty, přístrojové desky, brzdy apod. [8]

Slitina AM20

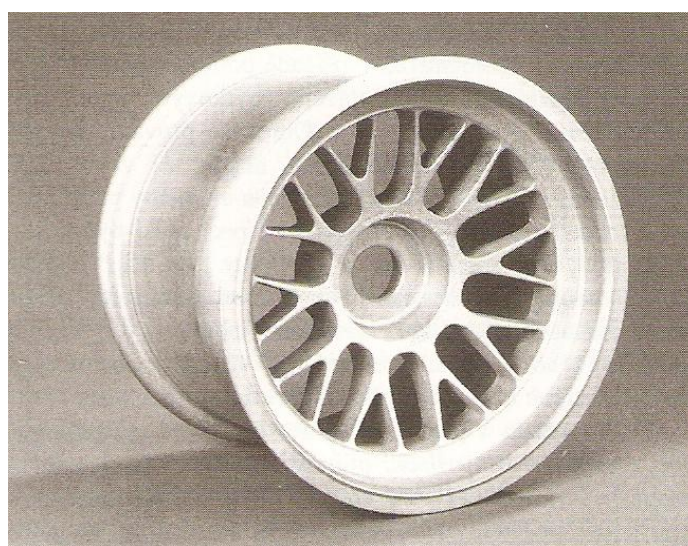
je slitina s vysokou tvárností a pevností při rázovém zatížení. Typické je použití pro součásti automobilů určené k absorbování energie případného nárazu. [8]



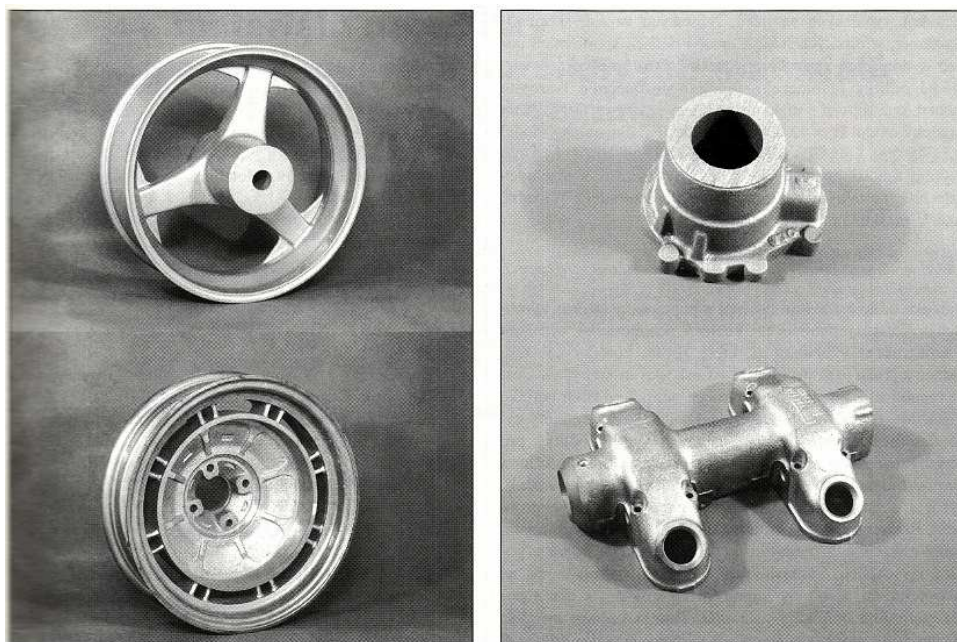
Obr. 5: Převodovka ze slitiny hořčíku AZ91/AS41 [8]

Vlastnost	AZ91D	AM60B	AM50A	AM20	AS41B	AS21	AE42
Mez kluzu v tahu [Mpa]							
20 °C	160	130	125	90	140	110	140
150 °C	100	85	75	65	87	80	95
Pevnost v tahu [Mpa]							
20 °C	240	235	230	210	240	220	230
150 °C	120	115	110	100	125	105	125
Mez kluzu v tlaku [Mpa]	160	130	125	90	140	110	140
Tažnost na 60 mm [%]	5	13	15	18	12	14	11
Rázová houževnatost [J]	4	14	15	18	12	11	12
Modul pružnosti v tahu [Gpa]	45	45	45	45	45	45	45
Tvrdost podle Brinella	70	65	60	45	60	55	60
Mez únavy [Mpa]	95	90	90	85	90	90	90
Mez tečení pro 0,1%, 100 h a 150 °C [Mpa]	20				22	45	50
Měrná hmotnost při 20 °C [kg.m ³]	1810	1800	1770	1750	1770	1760	1790
Tepelná vodivost [W.K ⁻¹ .m ⁻¹] při 20 °C	51	61	55	94	68	84	84
Koeficient délkové teplotní roztažnosti [μm.m ⁻¹ .K ⁻¹] při 20 – 100 °C	26,0	26,0	26,0	26,0	26,1	26,1	26,1

Tab. 4: Typické mechanické a fyzikální vlastnosti slitin hořčíku pro tlakově lité odlitky [8]



Obr. 6 : Disk automobilového kola, slitina AZ91 [8]



Obr. 7 : Příklad užití slitiny AZ91 pro různé účely [8]

2.2.6 Tepelné zpracování hořčíkových slitin

Odlitky z některých slitin hořčíku se tepelně nezpracovávají a používají se v litém stavu. V případě potřeby se volí homogenizační žíhání, žíhání ke snížení zbytkových pnutí, rozpouštěcí žíhání a umělé stárnutí. Ohřev se provádí většinou v elektrických komorových pecích, někdy též vakuových. Topné elementy a vnitřní stěny pece jsou chráněny pláštěm ze žáruvzdorné oceli. Rozdělení teploty v peci musí být rovnoměrné, obvyklé přípustné místní odchylky jsou $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, proto jsou nejvhodnější pece s nuceným oběhem atmosféry. Odlitky musí být před založením do pece zbaveny ostřin, třísek, pilin, kovového prachu a oleje. Nesmějí se vkládat do pece vlhké. Ohřev velkých odlitků se doporučuje provádět jako dvojstupňový, aby se zamezilo jejich možnému otavení při pomalém přestupu tepla. První ohřev se provádí do $330 - 340\text{ }^{\circ}\text{C}$ s výdrží 2 – 4 hodiny, druhý ohřev pak na teplotu konečnou, kterou obvykle bývá teplota $405 - 435\text{ }^{\circ}\text{C}$ (u slitin s prvky vzácných zemí až $570\text{ }^{\circ}\text{C}$). Doby výdrží na teplotách jsou značně delší než pro odlitky ze slitin hliníku, protože difuzní pochody ve slitinách hořčíku probíhají mnohem pomaleji. Tak například v případě homogenizačního žíhání doby výdrže bývají 8 – 32 hodin. Stárnutí slitin hořčíku je možné jen umělé, obvyklé teploty stárnutí bývají $170 - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, doba výdrže 4 – 16 hodin. [8]

Způsob tepelného zpracování závisí na složení slitiny a na požadovaných konečných vlastnostech součástí.

Homogenizační žíhání slouží k odstranění nerovnovážného rozdělení přísadových prvků v objemu slitiny po krystalizaci a tím ke zlepšení pevnostních a tvárnostních charakteristik odlitků. Po ochlazení odlitků z teploty homogenizačního žíhání je struktura tvořena homogenním tuhým roztokem a nevelkým množstvím nerozpuštěných minoritních fází, zejména částic manganu, který bývá přítomen jako příměs. [4]

Rekrystalizační žíhání má menší význam, protože většinu slitin hořčíku lze tvářet pouze za tepla. Provádí se jako mezi operace při tváření slitin hořčíku za studena. Obvykle se používá teploty 250 – 350 °C. Za vyšších teplot dochází k zhrubnutí zrna a zhoršují se mechanické vlastnosti. [4]

Vytvrzování je použitelné jen u slitin soustav, kde nárůst pevnosti je dostatečně velký. Vytvrzování sestává z rozpouštěcího ohřevu a následujícího umělého stárnutí. Zvláštností je možnost ochlazování slitin hořčíku z teploty rozpouštěcího ohřevu volně na vzduchu nebo ve vřelé vodě. U některých slitin se doporučuje provádět umělé stárnutí bez předchozího rozpouštěcího ohřevu. [4]

Žíhání na snížení vnitřního pnutí – vnitřní pnutí u odlitků vzniká následkem nestejně rychlého ochlazování různých průřezů nebo vlivem brzděného smršťování v nepoddajné formě nebo tuhou konstrukcí odlitku. Žíhání se provádí při teplotách 235 – 290 °C s následným pomalým ochlazením. [3]

2.3. Tlakové lití

2.3.1 Všeobecná charakteristika tlakového lití

Tlakové lití je nejdůležitější technologií výroby hliníkových a hořčíkových odlitků. Principem výroby je vstřikování roztavené slitiny do dutiny kovové formy pod vysokým tlakem (až 250 MPa). Za těchto podmínek je možné vyrábět tvarově velmi komplikované odlitky s tloušťkou stěn od přibližně 1-2 mm, za určitých podmínek a u některých slitin i méně než 1 mm. Rozměry odlitků jsou velmi přesné, u menších rozměrů lze dosáhnout přesnosti až 0,3-0,5 %. [3] Výroba odlitků litých do kovových forem pod tlakem je dnes rozšířena pro řadu technických výhod, například možnost výroby odlitků složitých tvarů, s předlitými otvory, s vysokou rozměrovou přesností a hladkostí povrchu s minimálními přídávky na obrábění, jemnozrnnou strukturou a tím i vyššími mechanickými vlastnostmi. Zapomenout nelze ovšem ani na ekonomické výhody, jako jsou menší hmotnost odlitku, vyšší využitelnost kovu a nižší pracnost dokončovacích operací. Z hlediska užitných vlastností je mimo jiné důležitá jemnozrnná krystalická struktura tlakově litých odlitků. Ta úzce souvisí s rychlostí krystalizace, resp. tuhnutím odlitku. K té přispívají dva důležité faktory: vysoká akumulární schopnost kovové formy a vysoký tlak působící na taveninu, který způsobuje její tzv. atermické podchlazení. I když lze při tlakovém lití odlévat slitiny s maximální tavicí teplotou zhruba do 1000 °C, mají značné uplatnění především slitiny s nižší tavicí teplotou. Současně je snaha překonávat nebo omezovat jeden z velkých nedostatků tlakově litých odlitků - porozitu, která se může objevit až po obrábění a bývá příčinou netěsnosti odlitků. I přes možnost výskytu této nepříznivé vlastnosti je největší uplatnění tlakově odlévaných odlitků v automobilovém a leteckém průmyslu. [6]

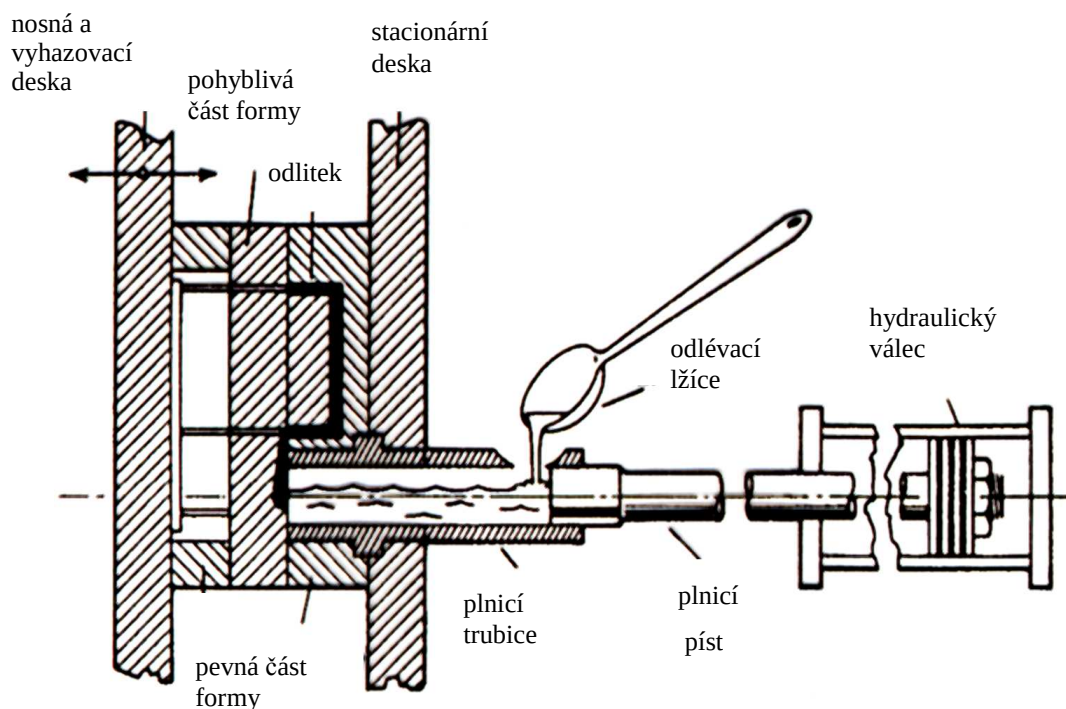
Ve formách lze používat výhradně kovová jádra. Tvar odlitku musí respektovat možnosti rozebrání formy a vytažení volných částí a jader. Velká část otvorů se předlévá. Do forem je před litím možno vkládat kovové zálitky. Některé formy jsou konstrukčně velmi složité. Formy jsou vyrobeny nástrojařským způsobem. Obvykle se skládají z rámu a vložek, které tvoří funkční část formy, která je přímo ve styku s kovem. Vzhledem k mimořádným mechanickým a tepelným nárokům se funkční části vyrábí z vysoce legovaných Cr-Mo ocelí a

tepelně zpracují. Méně namáhané části, jako rám a další díly se vyrábí z méně ušlechťených ocelí. Vzhledem k mimořádně vysokým výrobním nákladům (řádově statisíce až miliony korun) se vyžaduje i vysoká životnost forem. Životnost u menších forem dosahuje až 100 000 i více odlití. Vzhledem k nutnosti amortizace ceny forem je technologie tlakového lití vhodná pouze pro vysokosériovou a hromadnou výrobu odlitků. Maximální velikost odlitků. Které se na konkrétním stroji dají vyrobit je limitována maximální hmotností kovu a uzavírací silou stroje. Je to hodnota síly, kterou jsou svírány obě poloviny formy. Velké stroje mají uzavírací sílu až kolem 40 MN, výjimečně i vyšší. [3]

2.3.2 Tlakové licí stroje

Podle konstrukce se tlakové stroje dělí na dva základní typy, se studenou komorou a s teplou komorou. Podle směru pohybu plnicího pístu mohou být stroje se svislou nebo vodorovnou komorou. [3]

2.3.2.1 Tlakový licí stroj se studenou komorou

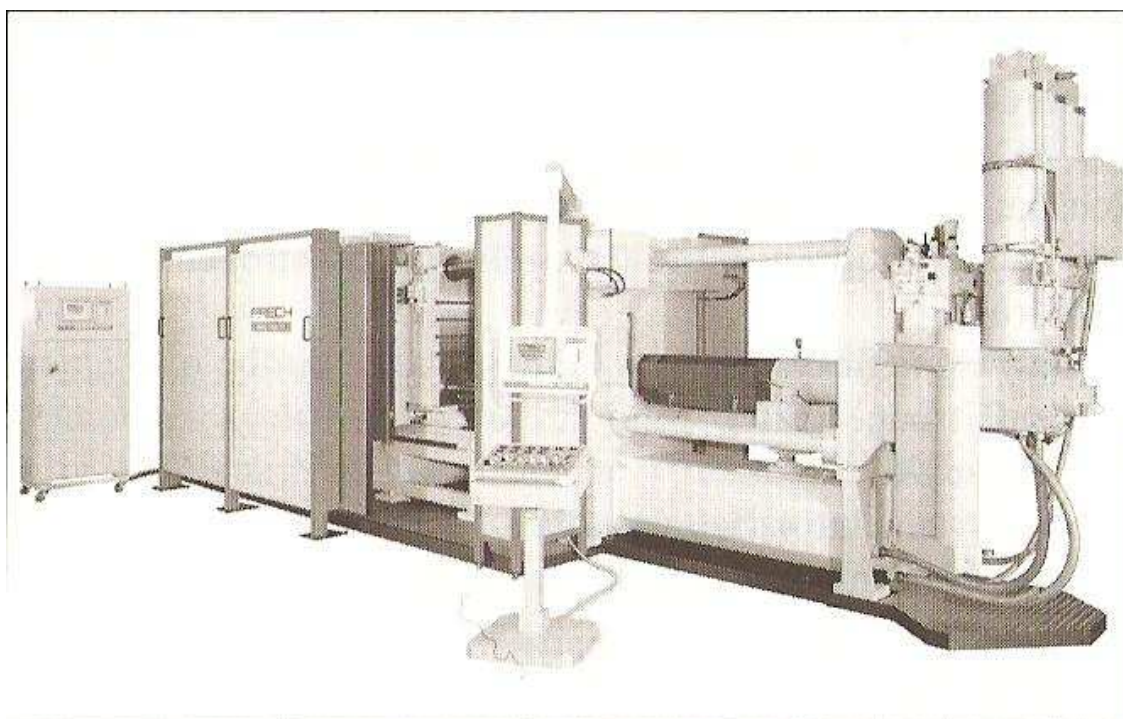


Obr. 8 : Horizontální tlakový stroj se studenou komorou [3]

Dávkování kovu do plnicí trubice se může provádět manuálně, u modernějších zařízení je však dávkování automatické a to buď plnicí lžící nebo pneumatickým dávkovacím zařízením z udržovací nebo dávkovací pece, která bývá součástí každého pracoviště tlakového stroje. Transport kovu se provádí některým ze způsobů, který zamezuje styku kovu s atmosférou. Po ztuhnutí se odlitek z pohyblivé části formy vytlačí pomocí vyhazovačů a odebírá ručně nebo pomocí robota. Následuje ochlazení odlitku, ostřížení vtoků a přetoků a konečná apretace. Před dalším licím cyklem se forma nastříká separačním prostředkem, který zamezuje nalepování odlitků a usnadňuje jejich vyjímání z formy. V moderních provozech je celý cyklus automatizován.

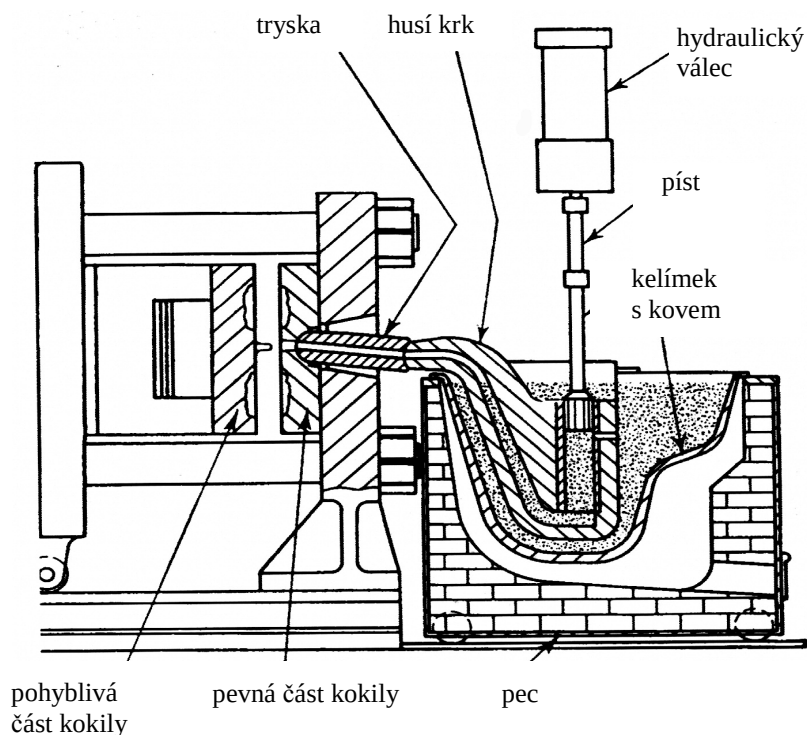
Typické parametry strojů jsou:

- uzavírací síla : do 45 MN
- lisovací tlak : 30 – 90 MPa
- hmotnost dávky kovu : do 60 kg
- produktivita : nižší než 60 odlití za hodinu
- dosažitelná tloušťka stěn : 1,5 – 2,5 mm [3]



Obr. 9 : Tlakový licí stroj se studenou komorou DAK 720-71 firmy Frech [8]

2.3.2.2 Tlakové licí stroje s teplou komorou

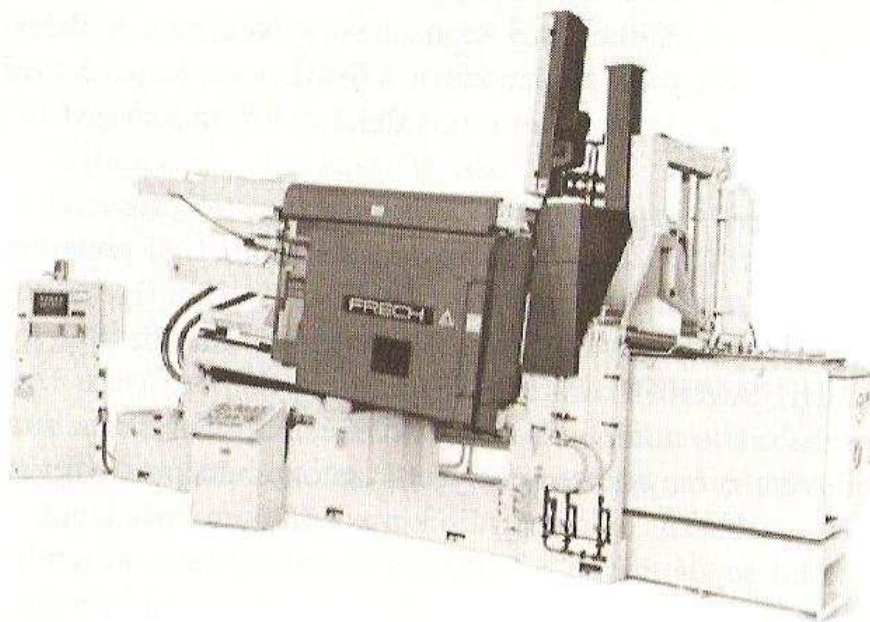


Obr. 10 : Tlakový stroj s teplou komorou [3]

Stroje s teplou licí komorou mají plnicí komoru umístěnou pod hladinou kovu v udržovací peci. Jejich výhodou je, že kov se z udržovací do plnicí komory nepřelévá a tak nedochází k jeho oxidaci. Rovněž teplotní ztráty jsou minimální. Tento typ pecí se nepoužívá pro slitiny hliníku, je však častý při lití slitin hořčíku a zinku.

Charakteristické parametry těchto strojů jsou:

- uzavírací síla : do 9MN
- lisovací tlak : 15 – 20 MPa
- hmotnost dávky kovu : 5 - 6 kg
- produktivita : i více než 100 odlití za hodinu
- dosažitelná tloušťka stěn : 1 mm [3]



Obr. 11 : Tlakový licí stroj s teplou komorou DAM 315 firmy frech [8]

2.4 Zbytková pnutí

Zbytkovým napětím rozumíme víceosé napětí působící v uzavřeném systému, jehož všechny části mají stejnou teplotu. Součet vnitřních sil vzhledem k libovolnému řezu uvažovaným systémem i součet vnitřních momentů vzhledem k libovolné ose procházející systémem je nulový. Systém je uzavřený nejen vůči vnějším silám a jejich momentům, ale i vůči vnějším nemechanickým stavovým veličinám, které v něm mohou mechanické účinky vyvolat. Zbytková napětí vznikají v polykrystalických materiálech, zvláště v kovech, jak při výrobě, tak vlivem technologie jejich dalšího zpracování. Obecně lze říci, že doprovázejí každý mechanický, tepelný nebo chemický proces, při němž dochází v materiálu k trvalé změně tvaru některých částí jeho objemu. [9]

2.4.1 Rozdělení zbytkových pnutí

Vnitřní napětí mohou být způsobena buď vnějšími nebo vnitřními silami. Napětí, které je vyvoláno účinkem vnějších sil na chladič odlitek je pnutí smršťovací. Po pominutí účinku vnějších sil na odlitek přestane toto pnutí působit. [10]

2.4.1.1 Rozdělení zbytkového pnutí podle původu vnitřních sil

- tepelné
- fázové (transformační)

Tepelné pnutí zbytkové vzniká v odlitku, který byl ochlazován z vysoké teploty, přičemž převažovala plastická deformace. Toto pnutí zůstává ve vychlazeném odlitku, ve kterém již nejsou žádné rozdíly teplot. [10]

Tepelné pnutí dočasné se vytváří v odlitku, když se jeho teplota mění uvnitř teplotní oblasti převažujících pružných deformací. Při vyrovnání teplot v jednotlivých částech odlitku se stává nulovým. Tato pnutí se zpravidla vytvářejí jen při druhotné změně teploty. [10]

Pnutí fázová vznikají v chladnoucím nebo ohřívaném odlitku, kde dochází ke změně fáze, se kterou je spojena i změna měrného objemu. Může být slévárenské (při primárním chladnutí) nebo pnutí při ohřevu či chladnutí hotového odlitku. [10]

2.4.1.2 Rozdělení zbytkového pnutí podle objemu, v jakém dosahují rovnováhy

- zbytková pnutí makroskopická (I. druhu)
- zbytková pnutí mikroskopická (II. druhu)
- zbytková pnutí submikroskopická (III. druhu)

Zbytková pnutí makroskopická (I. druhu)

jsou napětí, která vznikají mezi jednotlivými krystaly nebo mezi skupinami krystalů a vyrovnávají se v makroskopických oblastech. Většinou se vyrovnávají až v celém objemu odlitku. Skládají se s vnějším zatížením a proto jsou mimořádně nebezpečná. Tato pnutí se projevují jako homogenní tlak nebo tah. Při odebrání jednotlivých vrstev materiálu se poruší rovnováha sil od zbytkových napětí I. druhu a dochází k deformaci odlitku. Vnitřní pnutí I. druhu je nebezpečné když se jeho absolutní hodnota blíží mezi kluzu materiálu nebo když se vnitřní pnutí připojuje k pnutí II. a III. druhu. [10]

Zbytková pnutí mikroskopická (II. druhu)

se vyskytují v jednotlivých krystalech nebo skupinách krystalů. Jejich působení se vyrovnává v mikroobjemech. V makroskopických částech se mění bod od bodu, jak co do rozměru, tak co do velikosti. Vzhledem ke svému úzce lokálnímu působení mají vliv na vznik mikrotrhlin při opakovaném namáhání. Mohou být tepelná i transformační, zbytková nebo dočasná. [10]

Zbytková pnutí submikroskopická (III. druhu)

Jsou v rovnováze v oblasti jedné nebo několika elementárních buněk krystalické mřížky. Jsou podmíněna nepravidelným statickým vysunutím atomů ze zákonitých poloh v krystalové mřížce. Jsou to vysoce lokalizovaná zbytková pnutí, podmíněná poruchami v atomové mřížce. Zahrnují objemy řádově desítek až stovek atomů podél suvných poloh. Vzhledem k náhodné orientaci mřížek nedávají v makroskopickém měřítku žádnou výslednici. Zdrojem těchto pnutí jsou poruchy typu dislokací, cizí atomy atd. Mohou být tepelné i transformační, může spolupůsobit při jejich vytváření i interstatické rozpouštění plynů. [10]

2.4.2 Metody zjišťování zbytkové napjatosti

Pro měření zbytkových pnutí je známá řada metod. Lze je rozdělit na fyzikální, mechanické, popřípadě chemické. Metody se liší podle možnosti zjišťování napjatosti po průřezu, zda jsou destruktivní nebo nedestruktivní, přesností a složitosti použitého měřicího zařízení, dobou provedení a vyhodnocením výsledků. [4]

2.4.2.1 Fyzikální metody

Jsou to metody, které umožňují vyšetřování odlitku bez jeho porušení.

- rentgenografická
- ultrazvuková
- magnetická a magnetoinduktivní
- termoplastické [4]

2.4.2.2 Mechanické metody (tenzometrické)

Jejich podstata je v měření deformací, ke kterým dochází vlivem uvolnění nebo znovurozdělení zbytkových pnutí po odebrání určité části odlitku, nebo při postupném odebírání vrstev materiálu. Při těchto metodách dochází k narušení odlitku, případně k jejich úplnému znehodnocení. Nejznámější a nejpřesnější je metoda otvoru, při které se trvalé mechanické napětí destrukčním zásahem do součásti uvolní, což se projeví změnou deformace.

- Matharova metoda
- upravená metoda otvoru
- americká norma E 837 [4]

Matharova metoda

Podstatou této metody je měření deformací v bezprostředním okolí otvoru vyvrtaného do odlitku. Vyvrtáním otvoru ve zkoumaném místě odlitku se v oblasti otvoru uvolňuje zbytkové pnutí a dochází k pružným deformacím, které jsou zachycovány vhodně rozmístěnými tenzometry.

Základními parametry k úspěšné aplikaci této metody jsou:

- stav homogenní napjatosti je rovinný
- změna zbytkového pnutí po tloušťce vyšetřované oblasti je zanedbatelná
- materiál je homogenní a izotropní. [4]

Upravená metoda otvoru (Rendler – Viegneseva)

Tato metoda se používá v případě nelineárního rozložení zbytkového pnutí. Je vhodná za předpokladu, když není hloubka vývrtu větší jak polovina průměru vyvrtaného otvoru. [4]

Americká norma E 837

Je použitelná v případech, kdy se pnutí příliš nemění s hloubkou a nepřevyšují polovinu meze kluzu. Na měřenou plochu se umístí tenzometry ve tvaru tříprvkové růžice. Poblíž tenzometrů se vyvrtá otvor o něco hlubší než je jeho průměr. Zbytková pnutí v oblasti obklopující vyvrtaný otvor se uvolní a změří se vhodným zařízením na měření deformace. V těsné blízkosti otvoru je uvolnění téměř úplné, jestliže se hloubka vyvrtaného otvoru blíží 1,2 násobku jeho průměru. [4]

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Cíl experimentu

Na vzorku ze slitiny AZ91D odlitého pod tlakem (obr. 12) zjistit možnost výpočtu modulu pružnosti E [MPa], následně pomocí Matharovy metody určit zbytkové napětí. Z těchto vypočtených hodnot se mohou určit hodnoty σ_1 , σ_2 a σ_{red} .



Obr. 12 : Odlitek víka převodovky ze slitiny AZ91D

3.2 Zjištění modulu pružnosti E [MPa]

Modul pružnosti E [MPa] se zjistí pomocí měření rychlostí průchodu podélných ultrazvukových vln a následným výpočtem.

3.2.1 Měření rychlostí průchodu podélných ultrazvukových vln

Měření bylo provedeno přístrojem ECHOMETR 1060, sonda DS6, $\varnothing 10\text{mm}$, 2MHz. Na tomto odlitku se nenachází mnoho rovnoběžných ploch, nakonec byly pro měření rychlosti průchodu podélných ultrazvukových vln vybrány 3 místa (obr. 13). Byly tedy naměřeny 3 výsledky z nichž se pro pozdější výpočet stanovil jejich průměr.



Obr. 13 : Místa měření průchodu podélných ultrazvukových vln

Místo měření	Rychlost [m.s ⁻¹]	Tloušťka stěny [mm]	$\varnothing V_L$ [m.s ⁻¹]
1	5487	5	5474
2	5507	5,1	
3	5430	24,7	

Tab. 5: Naměřené hodnoty rychlostí ultrazvukových vln v závislosti na tloušťce stěny

3.2.2 Vlastní výpočet modulu pružnosti E [MPa]

Po naměření hodnot rychlostí podélných ultrazvukových vln na odlitku ze slitiny AZ91D se provede vlastní výpočet modulu pružnosti E [MPa] pomocí následujících vzorců.

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot k \quad [\text{m.s}^{-1}] \quad (1)$$

$$E = \rho \cdot V_L^2 \cdot k_1 \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

$$k_1 = \frac{1}{K} \quad [-] \quad (3)$$

$$K = \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \quad [-] \quad (4)$$

$$\text{odchylka} = (1 - k_1) \cdot 100 \quad [\%] \quad (5)$$

Poissonova konstanta μ nabývá pro slitinu AZ91 hodnoty $\mu = 0,35$. Z Poissonovy konstanty μ se vypočte konstanta K (4), následně konstanta k_1 (3), která se zahrne do výpočtu modulu pružnosti E (2). Pokud by se s konstantou k_1 nepočítalo, vznikla by odchylka (5) o kterou by se hodnota modulu pružnosti E zvýšila (37,69%). Pro výpočet modulu pružnosti je také potřeba hodnota měrné hmotnosti, pro slitinu AZ91D je to hodnota $\rho = 1810 \text{ kg/m}^3$.

Místo měření	Rychlost V_L [m.s ⁻¹]	Modul pružnosti E [MPa]	Ø E [MPa]
1	5487	33 953	33 802
2	5507	34 202	
3	5430	33 252	

Tab. 6 : Závislost modulu pružnosti E na rychlosti šíření ultrazvukových vln.

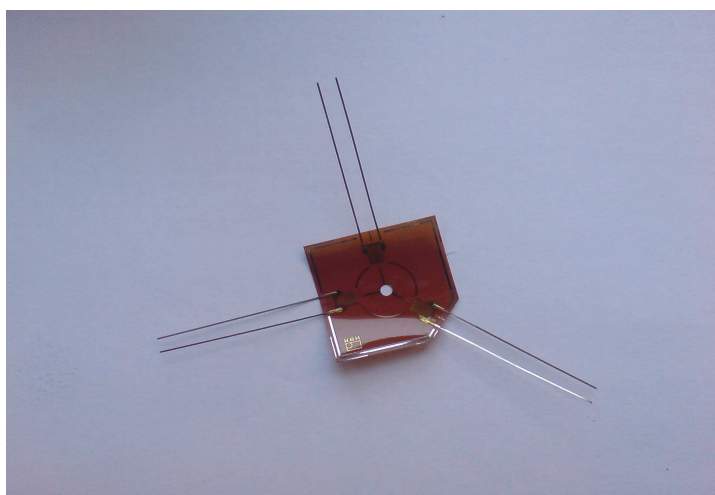
3.3 Zjišťování zbytkového napětí

Před samotným měřením a výpočtem napětí se musí vzorek připravit tak, aby měření bylo co možná nejpřesnější.

Příprava vzorku

- aby tenzometry na vzorku lépe přilnuly musí se po vybrání místa nalepení tenzometrů toto místo zbavit nečistot, nejlépe zbrúšením smirkovým papírem a následným omytím acetonem, acetonem se mohou omýt i samotné tenzometry

- po odstranění nečistot byl nalepen samotný tenzometr (obr.14), lepidlo x60 od firmy Hottinger Baldwin Messtechnik GMBH bylo naneseno na místo měření i na tenzometr, po přiložení tenzometru na vzorek bylo potřeba zatížit místo nalepení tlakem dokud lepidlo nevytvdlo (cca. 5 minut), aby se drátky tenzometru nepřilepily na vzorek, vložily se mezi drátky a vzorek kusy papíru



Obr. 14 : Tenzometr před nalepením na vzorek odlitku

Proces měření

- k drátkům byly připájeny kabely z přístroje, jeden drát z přepínače jako kompenzační (můstkové zapojení) a odečetly se hodnoty před odvrtáním (obr. 15)

- po odečtení hodnot byl v místě tenzometru odvrtán otvor (obr.16), nejprve předvrtán vrtákem Ø2 mm, následně dokončen vrtákem Ø6mm do hloubky 6mm (podle americké normy E 837 může být otvor vyvrtán až do hloubky $1.2 \times \text{Ø vrtáku}$), aby došlo k úplnému uvolnění pnutí muselo se s odečítáním hodnot po odvrtání přibližně 2-3 minuty počkat



Obr. 15: Vzorek před odvrtáním



Obr. 16: Vzorek po odvrtání

Před odvrtáním [μm]			Po odvrtání [μm]			Rozdíl [μm]		
a	b	c	a	b	c	a	b	c
658	912	1251	398	755	631	260	157	620

Tab. 7 : Rozdíl hodnot před a po odvrtání

3.3.1 Vlastní výpočet zbytkového napětí

Pomocí programu na výpočet zbytkového napětí, vytvořeném na ústavu strojírenské technologie odboru slévárenství byly vypočteny hodnoty konstant A,B. Do programu byla dosazena Poissonova konstanta ($\mu=0,35$), vypočtená hodnota modulu pružnosti E a změřené hodnoty přetvoření. Programem vypočtené konstanty A,B byly dosazeny do následujících vzorců.

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4 \cdot A} - \frac{1}{4 \cdot B} \cdot \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_3 - 2 \cdot \varepsilon_2)^2} \quad (6)$$

$$\sigma_2 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4 \cdot A} + \frac{1}{4 \cdot B} \cdot \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_3 - 2 \cdot \varepsilon_2)^2} \quad (7)$$

$$\sigma_{red} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (8)$$

Konstanta		Rozdíl [μm]			Zbytkové napětí [MPa]		
A	B	a	b	c	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	σ_{red} [MPa]
-4,62288E-06	-9,17253E-06	260	157	620	-29,3	-65,9	76,6

Tab. 8 : Výsledky experimentu ze vzorku slitiny AZ91D

4. ZÁVĚR

Cílem této práce byla charakteristika hořčíkových slitin, včetně jejich fyzikálních a mechanických vlastností, zejména pak nalezení vhodného uplatnění pro hořčíkové slitiny lité pod tlakem v různých odvětvích průmyslu, především v průmyslu automobilovém. Dále stručný popis tlakového lití včetně tlakových licích strojů a problematiky zbytkového pnutí, jemuž byla věnována experimentální část této práce. Cílem experimentální části bylo ukázat možnost zjišťování zbytkové napjatosti na odlitku víka převodovky ze slitiny AZ91D lité pod tlakem. Výsledky experimentu by měly být brány pouze jako orientační, jelikož byly stanoveny pouze z jednoho vzorku, na stanovení přesnějších výsledků by bylo zapotřebí více odlitků.

Diskuse k výsledkům experimentální části:

Modul pružnosti E [MPa] dosáhl u vzorku víka převodovky průměrné hodnoty $E = 33\,802$ MPa, literatura běžně pro slitinu AZ91D uvádí hodnotu $E = 45\,000$ MPa. V měřeném místě bylo změřeno tlakové napětí $\sigma_2 = -65,9$ MPa, tlakové napětí je z hlediska napjatosti vzorku výhodnější než napětí tahové. Mez pevnosti v tahu R_m má pro slitinu AZ91D v literatuře uvedenou hodnotu $R_m = 240$ MPa a $R_{p0,2} = 160$ MPa. Změřené tlakové napětí σ_2 dosahuje tedy 27,45% R_m a 41,18% $R_{p0,2}$. Jelikož byly tyto hodnoty stanoveny pouze z jediného vzorku, musí se tento experiment brát pouze jako ukázka možnosti změření zbytkového napětí.

4. LITERATURA

- [1] Čermák, J. : Současné trendy ve zpracování hořčíkových slitin tvářením. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2005, roč. 5, č. 10 [cit. 2010-02-01]. Dostupné z <<http://www.mmspektrum.com/clanek/soucasne-trendy-ve-zpracovani-horcikovych-slitin-tvarenim>>.
- [2] Wikipedia encyklopedie. Hořčík. [online]. Poslední aktualizace 2010-05-04 [cit.2010-05-06]. Dostupné z: < <http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnesium> >
- [3] Roučka, J.: Metalurgie neželezných slitin, CERM, Brno, 2004, str. 116–122. ISBN 80-214-2790-6.
- [4] Veverka Aleš. Stanovení zbytkových pnutí tenzometricky a rentgenograficky u odlitku z Al slitin pomocí squeeze casting. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie - slévárenství“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2002. 68 s.
- [5] Čech, J., Juříčka, I., Boucník, P.: Použití hořčíkových slitin ve slévárenství. [cit. 2010-04-05]. Dostupné na http://www.explat.cz/files/pouziti_mg_slitin_ve_slevarenstvi.pdf
- [6] Nová, I. : Rozvoj tlakového lití. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2004, roč. 4, č. 5 [cit. 2010-02-20]. Dostupné z <<http://www.mmspektrum.com/clanek/rozvoj-tlakoveho-liti>>.
- [7] Ptáček, L.: Slévárenské slitiny hořčíku. *Slévárenství*, 52, 2004, č. 2-3, s. 61–66.
- [8] Ustohal, V., Ptáček, L.: Slitiny hořčíku na odlitky. *Slévárenství*, 49, 2001, č. 2-3, s. 103 – 112.
- [9] Kraus, I. : Úvod do strukturní rentgenografie, 1.vyd. Praha: Academia, 1985. 235 s.
- [10] Rusín, K. : Teorie slévárenských procesů II, 3. vyd. Brno: VUT Brno, 1990. 97 s. ISBN 80-214-0152-4.