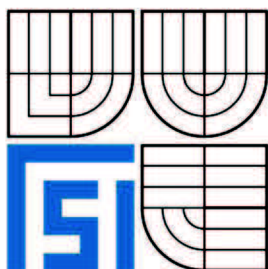


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## TLAKOVĚ LITÉ ODLITKY Z AI SLITIN PRO AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL

AL-ALLOY DIE-CASTINGS FOR AUTOMOTIVE INDUSTRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

JIŘÍ HAVEL

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

prof. Ing. JAROSLAV ČECH CSc.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2009/10

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Havel Jiří

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

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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:

### **Tlakově lité odlitky z Al slitin pro automobilový průmysl**

v anglickém jazyce:

#### **Al-alloy die-castings for automotive industry**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Studium současných trendů ve vývoji tlakově litých odlitků z Al slitin a možnosti uplatnění v průmyslu (především automobilovém).

Cíle bakalářské práce:

Posouzení trendu ve vývoji tlakově litých odlitků z Al slitin a výhledové možnosti.

Seznam odborné literatury:


1. ROUČKA, J. Metalurgie neželezných slitin. Skripta VUT. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
2. VILČKO, J. a SLOVÁK, S. Zlívárenská technológia. 1. vyd. Bratislava: ALFA, 1987. 496 s.
3. MICHNA, S., aj. Encyklopedie hliníku. 1. vyd. Děčín: ALCAN, 2005. 699 s. ISBN 80-89041-88-4.

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Jaroslav Čech, CSc.


Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/10.

V Brně, dne 20.11.2009

L.S.

  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu



  
\_\_\_\_\_  
doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

**ABSTRAKT**

Tato rešeršní práce je zaměřena na téma Tlakově lité odlitky z Al slitin pro automobilový průmysl. V teoretické části je toto téma popsáno z hlediska technologie lití pro Al slitiny se zaměřením na vysokotlaké lití, na slitinu hliníku AlSi9Cu3 a na metody zjišťování zbytkové napjatosti. V experimentální části je uvedena ukázka měření zbytkových napětí na vzorcích odlitých ze slitiny AlSi9Cu3.

**Klíčová slova**

Slitiny hliníku, tlakové lití, zbytková napjatost, AlSi9Cu3

**ABSTRACT**

This search is concentrated on Pressure-castings of aluminum alloys for the automotive industry. In the theoretical part of this topic is described in terms of technology for casting aluminum alloys with a focus on high-pressure casting of aluminum alloy AlSi9Cu3 and methods of detecting residual stress. In the experimental section is a sample of residual stress measurements on samples cast alloy AlSi9Cu3.

**Key words**

Aluminums alloy, die casting, residual stress, AlSi9Cu3

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

HAVEL, Jiří. *Tlakově lité odlitky z Al slitin pro automobilový průmysl*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 37s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Jaroslav Čech, CSc.



**Prohlášení**

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

28. 5. 2010

.....  
Jiří Havel

**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
ÚVOD A CÍL PRÁCE .....	8
TEORETICKÁ ČÁST .....	8
1. Přehled technologie lití pro Al slitiny .....	8
1.1 Gravitační lití .....	8
1.2 Nízkotlaké lití .....	9
1.3 Vysokotlaké lití .....	11
1.3.1 V historii a dnes .....	11
1.3.2 Princip vysokotlakého lití .....	12
1.3.3 Vybrané slévárenské slitiny pro tlakové lití .....	13
1.3.4 Stroje pro tlakové lití .....	13
1.3.5 Technologie lití pod tlakem - squeeze casting (SC) .....	16
2. Slitina hliníku AlSi9Cu3 .....	17
3. Metody zjišťování zbytkové napjatosti .....	19
3.1 Mechanické metody měření zbytkových napětí .....	20
3.1.1 Nepřímé metody měření zbytkových napětí .....	21
3.2 Měření pomocí magnetického pole .....	22
3.3 Rentgenová difrakce .....	23
4. Zkušební vzorky použité ve studii .....	24
4.1 Popis slévárny tlakového lití v závodě Škoda Auto a.s. Mladá Boleslav .....	25
4.2 Spodní díl bloku motoru .....	26
4.2.1 Tepelné zpracování spodních dílů motoru EA111 03D/1,2l .....	27
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	28
5. Cíl experimentu .....	28
5.1 Zjišťování modulu pružnosti E [MPa] na vzorcích ze slitiny AlSi9Cu3....	29
5.1.1 Měření rychlostí průchodu podélných ultrazvukových vln u odlitků ze slitiny AlSi9Cu3 .....	29
5.2 Zjišťování zbytkového napětí ve vzorcích odlitých ze slitiny AlSi9Cu3...	31
5.2.1 Výpočet zbytkového napětí $\sigma_1$ , $\sigma_2$ a $\sigma_{red}$ .....	34
6. Závěr .....	35
Literatura: .....	36

## ÚVOD A CÍL PRÁCE

Cílem této práce v teoretické části je ukázat možnosti slitin Al pro použití v automobilovém průmyslu a hlavně pak se zaměřit na slitinu AlSi9Cu3. Slitina AlSi9Cu3 se nejvíce využívá v motorové části automobilů, protože snižuje celkovou hmotnost automobilu a má jedny z nejlepších vlastností. V praktické části je cílem ukázat jednu z metod pro měření zbytkových pnutí, konkrétně metodu odvrtávací, která je hodně používaná, protože odvrtaný otvor se dá použít například k vyrobení závitu. Blok motoru, ze kterého byly vzorky vyřezány, byl odlit ze slitiny AlSi9Cu3 ve firmě Škoda Auto a. s. Mladá Boleslav. Pro praktickou část jsem měl k dispozici 3 vzorky, na kterých jsem měření prováděl.

## TEORETICKÁ ČÁST

### 1. PŘEHLED TECHNOLOGIE LITÍ PRO Al SLITINY

Technologie lití se dá rozdělit do 3 hlavních skupin:

- gravitační lití
- nízkotlaké lití
- vysokotlaké lití

Ve své bakalářské práci se nejvíce zaměřím na technologii vysokotlakého lití a ostatní dvě skupiny popíšu pouze informativně.

#### 1.1 Gravitační lití

Gravitační lití hliníkových odlitků se rozděluje do dvou technologií, a to lití do písku nebo lití do kokil. Při obou těchto technologiích může být použito jádro z pískové formovací směsi [1].

Rychlost proudění je zpravidla menší než 3 m/s (výškový rozdíl 0,5 m) bez respektování tlakových ztrát. U gravitačního lití nemůže během tuhnutí působit

v odlitku žádný statický tlak, působí jen hydrostatický tlak, který se směrem nahoru snižuje [2].

Trvanlivost odlitků se prodlužuje žáruvzdorným nátěrem, který slouží jako tepelná izolace.

Výhody gravitačního lití do kokil:

- tvarová a rozměrová přesnost odlitků
- odlitek má jemnozrnnou strukturu (následek rychlého ochlazení)
- zlepšení pracovního prostředí
- možnost automatizace

Nevýhody gravitačního lití do kokil:

- drahá forma
- nutnost odlitky tepelně zpracovávat (pro zlepšení obrobitelnosti a snížení vnitřního pnutí) [3]

## 1.2 Nízkotlaké lití

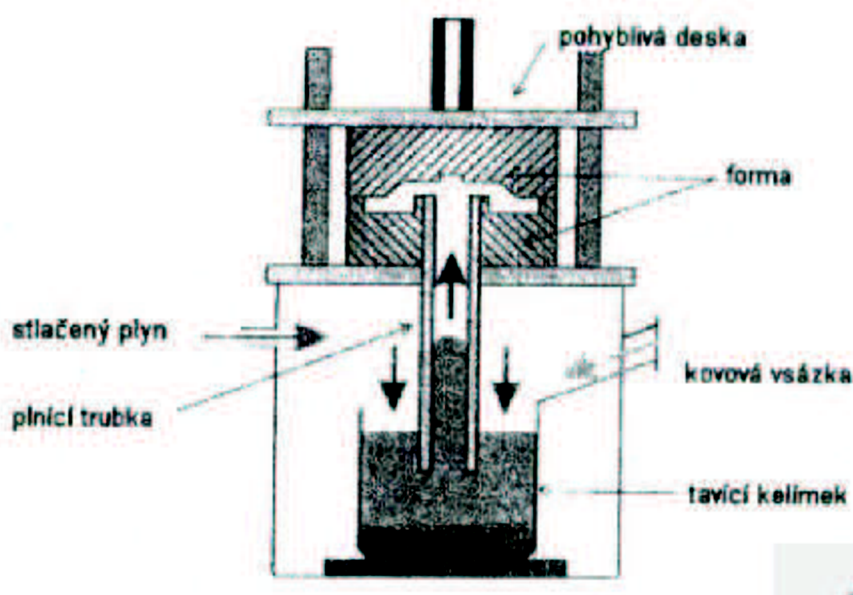
Od gravitačního lití se tato technologie odlišuje tím, že na hladinu roztaveného kovu v kelímku působí relativně nízký tlak plynu a kov je do formy vháněn přes svislou trubici ponořenou v tavenině. Lící forma se prakticky nachází nad kelímkem a dutina formy je postupně zaplňována od svého dna, čímž je dosahováno klidného plnění a vyšší vnitřní kvality odlitků [1].

Při nízkotlakém postupu může být při plnění ovlivněna rychlost proudění, maximální tlak závisí na hustotě odlévaného kovu. Tlak v odlévaném kovu během tuhnutí je podobný jako při gravitačním lití [2].

Pracovní tlak musí být tak velký, aby překonal všechny odpory způsobené tlakem plynu ve formě, místními ztrátami při plnění (tenké stěny, změny směru) a zvyšující se viskozitu taveniny při poklesu její teploty. Nárůst pracovního tlaku

musí zabezpečit plnění formy optimální rychlostí. Rychlost plnění se volí tak, aby slitina neztuhla před zaplněním celé dutiny formy.

Nízkotlakým litím je možno dosáhnout vysoké kvality povrchu i vnitřního objemu odlitku [4]. Nízkotlaké lití se používá pro odlévání slitin lehkých kovů v automobilovém průmyslu, typickými zástupci odlitků jsou disky kol, hlavy válců a součásti brzdových systémů [1].



Obr. č. 1 schéma stroje pro nízkotlaké lití [7]

Výhody nízkotlakého lití: [13]

- cílené ovládání rychlosti lití
- klidné plnění formy
- široká minimalizace vratného materiálu
- možnost použití pískových jader
- možnost rozsáhlé automatizace
- používání alternativních materiálů např. písek, sádra nebo keramika

Nevýhody nízkotlakého lití: [14]

- jakost odlitků je velmi závislá na správné konstrukci formy

## 1.3 Vysokotlaké lití

### 1.3.1 V historii a dnes

Lití pod tlakem vzniklo v roce 1838 a používalo se na výrobu tiskařských písmen. Ve strojírenství se používá od roku 1894. V Československu se tlakové lití používalo od dvacátých let 20. století, kdy Ing. Polák použil principiálně nový způsob tlakového lití (zprvu pro odlévání mosazi). Podle jeho patentu se kelímek s roztaveným kovem oddělil od stroje a tavenina se nalévala lžící do plnicí komory, z té se pomocí plnicího pístu vháněla do dutiny formy. Tak vznikly první tlakové licí stroje se studenou plnicí komorou, která se nacházela mimo udržovací pec [5].

Technologie tlakového lití je nejdůležitějším a nejpopulárnějším procesem používaným pro výrobu tvarových odlitků ze slitin hliníku. Jedná se o atraktivní a známou metodou pro výrobu tvarově složitých, rozměrově přesných, tenkostěnných odlitků s vynikající jakostí povrchu. U odlitků je možno upustit od přídavků na obrábění a ušetřit odlévaný materiál. Tlakové lití se používá vždy tehdy, kdy je zapotřebí vysoká produktivita při velkém počtu kusů [2]. Objem výroby tlakově litých odlitků ze slitin hliníku narůstá každoročně o cca 10 %. Z celkového množství hliníkových odlitků se tlakovým litím vyrábí asi 70 % [6]. Např. v USA vykazuje podíl tlakového lití na výrobě všech hliníkových odlitků téměř 70 % [6]. V poslední době se zjišťuje, že nevýhodou této technologie je pórovitost a nerovnoměrná struktura odlitků [berg6]. Díly vyrobené touto metodou nejsou samozřejmě jen ze slitiny hliníku, ale již mnoho let i z hořčíkových, zinkových a v malé míře i z měděných slitin. Všechny články této technologie (tj. tlakový licí stroj, licí forma i používané slitiny) doznaly za dobu používání řadu změn. Velmi důležité je znát vliv licích parametrů na výslednou kvalitu odlitku.

Principem výroby je vstříkávání 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 přibližně 1 – 2 mm, u některých slitin i méně než 1 mm. Rozměry odlitků jsou velmi přesné – u menších rozměrů lze dosáhnout přesnosti až 0,3 – 0,5 %. Ve formách je nutno používat výhradně

kovová jádra. Tvar odlitku musí respektovat možnosti rozebírání formy a vytažení volných částí a jader. Velká část otvorů se předlévá.

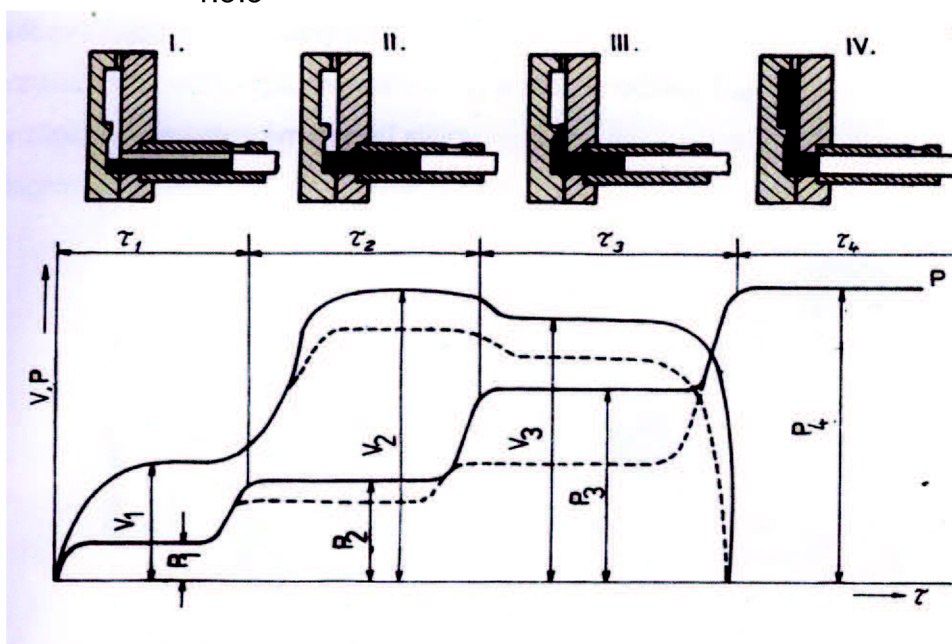
Odlévaný kov je během plnění dutiny formy zprvu jen pod okolním tlakem, který v závislosti na provedení odvodušňování postupně narůstá. Po ukončení plnění formy je pak odlévaný kov zatížen vysokým statickým tlakem. Tlak na konci plnění formy umožňuje zatečení ještě tekutého licího kovu do nejužších průřezů a zlepšuje reprodukci tvaru formy [2].

### 1.3.2 Princip vysokotlakého lití

Metoda vysokotlakového lití spočívá v tom, že roztavený kov se vtlačuje do dutiny slévárenské formy tlakem pístu tlakového stroje. Podle velikosti stroje lze vyvodit tlaky 2 až 500 MPa [7].

Plnění dutiny formy roztaveným kovem při tlakovém lití se provádí v několika fázích – viz (obr. č. 2):

1.3.3



Obr. č. 2 Fáze plnění dutiny formy [4]

1. **v čase 0 až  $t_1$** : naplnění plnicí komory tlakového licího stroje potřebným množstvím tekutého kovu – tlak na kov ještě nepůsobí
2. **v čase  $t_1$  až  $t_2$** : tzv. hrubé plnění – dochází k naplnění dutiny formy tekutým kovem – vtokovým systémem prochází velké množství kovu



vysokou rychlostí, nastává velké tření a část pohybové energie proudu kovu se proto mění v teplo, teplota kovu se zvyšuje

3. **v čase  $t_2$  až  $t_3$ :** doplňování kovu do formy – v této fázi je forma pouze doplňována ve všech detailech působením hydrodynamického tlaku proudícího kovu, hodnota tlaku vzrůstá rychleji a dosáhne maxima
4. **v čase  $t_3$  až  $t_4$ :** po úplném vyplnění dutiny formy kovem, přestane působit dynamický účinek a po dobu tuhnutí na kov působí pouze hydrostatický tlak [8]

### 1.3.3 Vybrané slévárenské slitiny pro tlakové lití

Slitiny, které se používají pro tlakové lití, musí být nejen dobře slévatelné, ale kromě vhodných mechanických vlastností musí vykazovat i dostatečnou pevnost za tepla. To umožňuje, aby tlakově lité odlitky při rychlém a brzděném smršťování ve formě nepraskaly. Ze slitin hliníku bývaly pro tlakové lití velmi používány slitiny: AlSi12, AlSi5Cu2, AlMg9, AlSi10MgMn. V současné době mají velké uplatnění slitiny AlSi9Cu3 (v kapitole 2 se budeme touto slitinou zabývat výrazněji) a AlSi12Cu, popř. jejich modifikace, které se po vyjmutí z formy ochlazují ve vodě. To přispívá nejen ke stabilitě rozměrů odlitků pro následující operaci, odstranění vtoku odstříháváním, ale současně se využívá i efektu tepelného zpracování - vytvrzování za normální teploty. Takto zpracovávané slitiny překonaly dříve uváděné důvody, proč nelze tlakově lité odlitky vytvrzovat. Vedle tlakových slitin hliníku, které díky metodám jejich odplyňování (např. profukování inertními plyny) doznaly značného rozvoje, se nyní začínají také uplatňovat pro tlakové lití slitiny hořčíku, které se vyznačují malou hmotností [9].

### 1.3.4 Stroje pro tlakové lití

Dnešní stroje pro tlakové lití jsou výsledkem téměř stoletého vývoje a k jejich vysoké kvalitě a výhodné konstrukci přispěla aplikace řídicích a elektronických prvků s využitím výpočetní techniky.

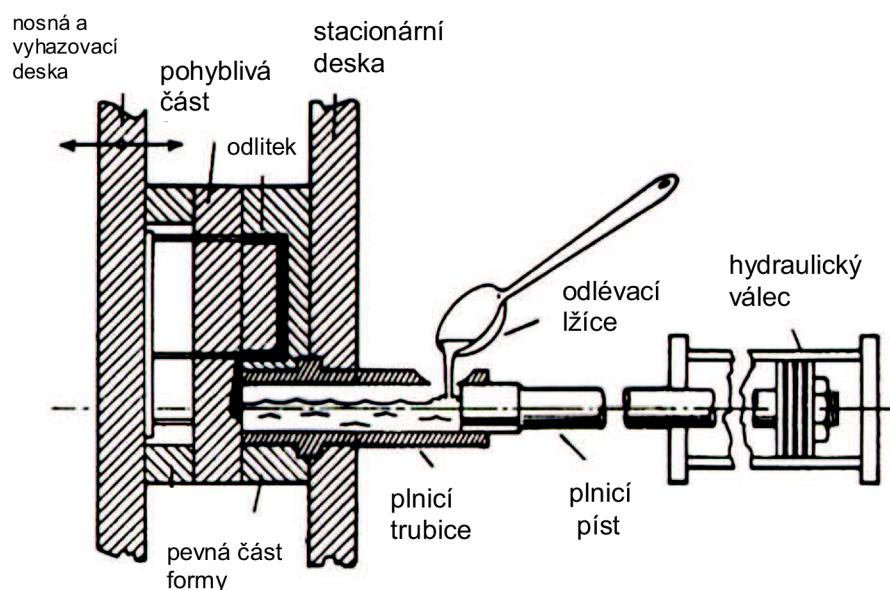
Ve svém vývoji doznaly konstrukce a technická provedení těchto strojů značných změn. Původní stroje, s teplou tlakovou komorou, dnes více nahrazují stroje se studenou tlakovou komorou (o jejich vývoj a výrobu se nejvíce

zasloužil pražský inženýr Josef Polák, jemuž byl v roce 1927 udělen patent v Československu č. 30 050, v Německu č. 496265 a 11. června téhož roku v USA i patent č. 1717254 na licí stroj, od kterého byla tavicí pec oddělena a tavenina se vlévala do vertikální tlakové komory, tlakem pístu se pak dopravovala do dutiny formy).

Dalším pokrokovým prvkem byla konstrukce tlakových strojů s horizontální tlakovou komorou. Tato konstrukce našla ihned velké uplatnění, neboť tyto stroje dosahují vyššího pracovního výkonu, lepšího využití odlévaného kovu a současně se vyznačují jednodušším vstřikovacím systémem, resp. spolehlivostí provozu. Principy tlakových strojů různých konstrukcí jsou dobře patrné ze schémat (obr. č. 3, 4).

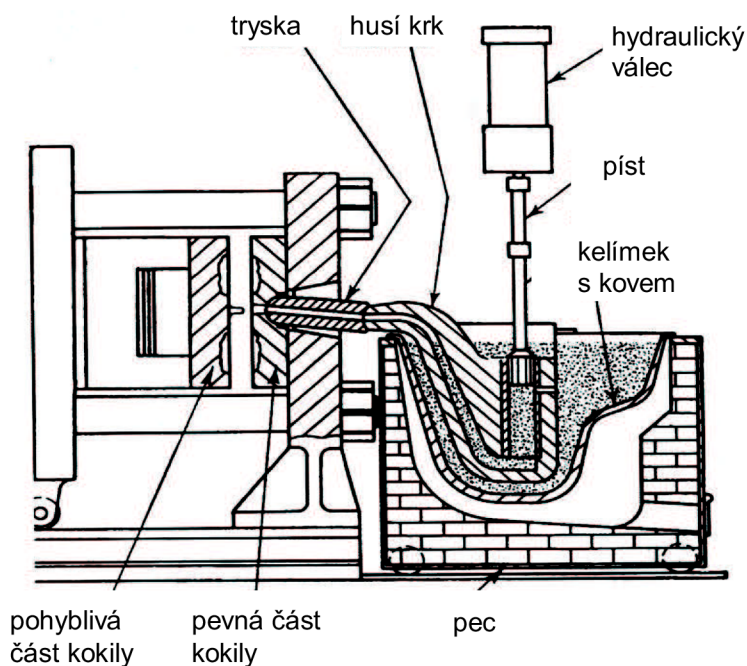
V současné době se vyrábějí tlakové stroje s velkou možností nastavení technologických parametrů. Vyznačují se zejména specifickou konstrukcí (ta se používá pro dopravu taveniny do tlakové komory při odlévání slitin hořčíku) či speciálním systémem ovládání vakua ve formě. Také existuje možnost uplatnit i netradiční modifikované metody vysokotlakého lití. Mezi ně se také řadí ve větším měřítku postupné zavádění metody vakuového tlakového lití, označované jako Vacural. V tomto případě tvoří tlaková forma, tlaková komora a píst uzavřený vakuový prostor a celý proces tlakového lití probíhá ve vakuu. Odlitky neobsahují ani plynovou porezitu, ani oxidické vměstky, a tím vykazují větší mechanické vlastnosti než odlitky vyráběné běžnou metodou tlakového lití. Nové metody tlakového lití též vyžadují speciální konstrukce a úpravy strojů pro tlakové lití. Mezi tyto metody se řadí squeeze casting (kapitola 1.3.5) a semi-solid Metal Casting [9].

Stroje se studenou komorou – Tato varianta strojů se k odlévání dílů vysokotlakovou metodou používá nejčastěji. Schéma stroje je zobrazeno na (obr. č. 3). Tyto stroje jsou vhodné pro odlévání více druhů slitin. Jejich velkou výhodou je, že plnicí komora není pod hladinou roztavené slitiny. Je tedy možno pracovat s menším objemem roztaveného kovu [10].



Obr. č. 3 Schéma tlakového stroje se studenou komorou [10]

Tlakové lití s teplou lící komorou – Tato zařízení mají komoru pod hladinou kovu, tedy přímo v udržovací peci. Jejich výhodou je, že kov se z udržovací do plnicí komory nepřelévá, a tak nedochází k jeho oxidaci. Tento typ pecí se pro slitiny hliníku nepoužívá, ale často je využíván pro lití slitin hořčíku a zinku. Schématicky je znázorněn na (obr. č. 4) [10].



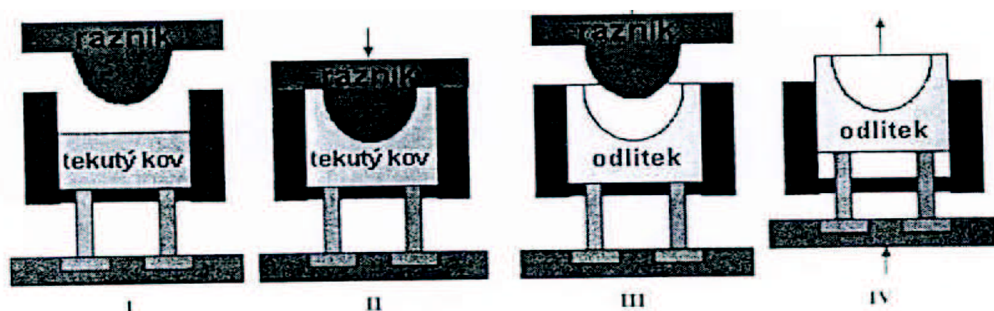
Obr. č. 4 Schéma tlakového stroje s teplou komorou [10]

### 1.3.5 Technologie lití pod tlakem - squeeze casting (SC)

Metoda squeeze casting je založena na vtláčení speciálního pístku do pomocného nálitku, umístěného nad materiálovým uzlem, ještě před tím, než ztuhne kov ve formě. Tento proces potlačuje vznik staženin nebo je rozptyluje do nepatrných velikostí, proto je vhodný při výrobě odlitků s tepelnými uzly nebo rozdílnou tloušťkou stěn. K tomuto účelu slouží tlakový stroj se speciálním přídatným zařízením a upravenou slévárenskou formou. Metodou squeeze casting je například vyroben pozoruhodný tlakový odlitek bloku spalovacího motoru vozidla Porsche Boxter. Odlitek je ze slitiny AlSi9Cu3 se zalitými vložkami z kompozitního materiálu na bázi hliníku s 25 % částic křemíku a 5 % výztužných vláken  $Al_2O_3$ . Zpomalené plnění formy umožňuje infiltraci odlévané taveniny do povrchu vložek, založených do formy, s cílem dokonalého zalití [9]. Proces lití s krystalizací pod tlakem (squeeze casting) obsahuje následující etapy:

1. přesně stanovené množství roztaveného kovu je nalito do předehřáté formy
2. aktivace tlaku v uzavřené dutině formy a tlačení tekutého kovu – toto je provedeno velmi rychle, aby došlo ke krystalizaci roztaveného kovu pod tlakem
3. udržování tlaku v kovu až do úplného ztuhnutí – to nezvyšuje pouze rychlost tepelného toku, ale také jím můžeme eliminovat makro a mikropórovitost; nukleace plynové pórovitosti je na tlaku závislá, tvorba pórovitosti kvůli rozpuštěným plynům v roztaveném kovu je pak omezená
4. vytáhnutí razníku a vyjmutí odlitku [12]

Postup lití s krystalizací pod tlakem (squeeze casting):



Obr. č. 5 Schématický diagram ukazující postup lití s krystalizací pod tlakem [11]

Výhody lití metodou squeeze casting [15]:

- kvalitnější mechanické vlastnosti
- jemná struktura, minimální pórovitost
- tepelná zpracovatelnost
- hladké povrchy, skoro dokonalý tvar
- vysoká produktivita, vysoká úspornost při určitém počtu kusů
- možnost odlévání speciálních slitin

Nejčastěji uváděné nevýhody metody squeeze casting [15]:

- vysoké investiční náklady
- zmenšená životnost forem
- limitující maximální velikost a váha

## 2. SLITINA HLINÍKU AISi9Cu3

Typickým představitelem materiálů vhodných pro tlakové lití je slitina AISi9Cu3. Z této slitiny je tlakovým litím vyráběna řada součástí v automobilovém průmyslu, např. skříně spojky a převodovky, bloky motoru, víka bloku válců, apod., které jsou tvarově náročné a na které jsou kladeny vysoké požadavky z hlediska jakosti a mechanických vlastností. Jde o odlitky, u kterých jsou některé stěny s tloušťkou 2 mm velmi tvarově náročné. [12]

### Fyzikální vlastnosti

Základní fyzikální vlastnosti slitiny AISi9Cu3 jsou uvedeny v tabulce (Tab. č. 1).

Tabulka č.1 Základní fyzikální vlastnosti

Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]:	2700
Teplota solidu [°C]:	525
Teplota likvidu [°C]:	610

### Chemické složení

Chemické složení slitiny AlSi9Cu3 dle ČSN EN 1706 je uvedeno v tabulce (Tab. č. 2).

Tabulka č. 2 Chemické složení slitiny AlSi9Cu3(Fe)

	Chemické složení v % hm.							
označení slitiny	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn
AlSi9Cu3(Fe)	8-11	0,6-1,1	2-4	0,55	0,05-0,55	0,15	0,55	1,2

### Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti slitiny AlSi9Cu3 dle ČSN EN 1706 jsou uvedeny v tabulce (Tab. č. 3).

Tabulka č. 3 Mechanické vlastnosti slitiny AlSi9Cu3(Fe)

pevnost v tahu	$R_m$	min. 240 MPa
smluvní mez kluzu	$R_{p0,2}$	min. 140 MPa
tažnost	$A_5$	min. < 1
tvrdost dle Brinella	HB	min. 80

### Mechanické vlastnosti vybraných slévárenských slitin

Mechanické vlastnosti slitin hliníku dle ČSN EN 1706 jsou uvedeny v tabulce (Tab. č. 4).

Tabulka č. 4 Mechanické vlastnosti odlitků tlakově litých

označení slitiny	tepelné zpracování	$R_m$ [Mpa] min.	$R_{p0,2}$ [Mpa] min.	$A_{50mm}$ [%] min.	tvrdost [HBS] min.
AlSi9Cu3(Fe)	Litý stav	240	140	<1	80
AlSi11Cu2(Fe)	Litý stav	240	140	<1	80
AlSi8Cu3	Litý stav	240	140	1	80
AlSi9Cu3(Fe)(Zn)	Litý stav	240	140	<1	80

Označení tepelného zpracování v (Tab. č. 4) odpovídá evropské normě ČSN EN 1706.

### 3. METODY ZJIŠŤOVÁNÍ ZBYTKOVÉ NAPJATOSTI

Všechny metody zjišťování zbytkových napětí je možné rozdělit na:

- destruktivní
- polodestruktivní
- nedestruktivní

Metody zjišťování zbytkových napětí je možné také rozdělit podle způsobu určování napětí na:

- analytické – výpočtové
- experimentální (Tab. č. 5)

Destruktivní metody jsou založeny na měření deformace při odstraňování vrstvy materiálu se zbytkovým napětím. Polodestruktivní metody umožňují použít součástku i po jejím změření. Nedestruktivní metody neovlivňují součástku při jejím měření.

Podle principu je možné metody měření zbytkových napětí rozdělit na:

- mechanické (měření deformace)
- fyzikální (měření změn vlastností)
- chemické (změny vyvolané chemickými procesy)

Podle charakteru měřené veličiny se jedná o metody:

- přímé
- nepřímé (zbytkové napětí se určí podle změny jiných veličin)

Zjišťování zbytkových napětí se provádí buď v těsné blízkosti od povrchu, nebo v celém průřezu dané součástky. Podle napjatosti je možné měřením stanovit napjatost prostou, rovinnou, nebo prostorovou. [16]

Tabulka č. 5. Metody zjišťování zbytkových napětí [16]

metody zjišťování zbytkových napětí	tvary součástí	způsob měření	
Mechanické	plochý tvar	deformace pásku	změna délky
			změna zakřivení
		vrtání děr	válcová díra
			mezikruží
	rotační tvar	změna rozměru válce	odstranění povrchové vrstvy
		trubka	rozříznutí trubky
			odstranění povrchové vrstvy
			odstranění vnitřní vrstvy
	kroužek	rozříznutí	
		změna křivosti	
podélné pásy z kroužků			
obecný tvar	metoda sítí	deformace sítě	
	křehké laky	vznik trhlin	
	křehké modely	vznik trhlin	
Fyzikální RTG	obecný tvar	difrakce	vzdálenost meziatomových rovin
Fyzikální ultrazvuk		šíření vln	změna rychlosti
			odraz vln
Elektrické	obecný tvar	změna proudu	změna potenciálu procházejícího proudu
			změna velikosti vířivých proudů
			změna indukčního toku
Magnetické	obecný tvar	změna magnetizmu	magnetická indukce zbytkový magnetizmus
Akustické	obecný tvar	prozvučitelnost	čestnost akustických emisí
Chemické	obecný tvar	difuze vodíku	trhliny na povrchu
		změna chemické aktivity	změna struktury

### 3.1 Mechanické metody měření zbytkových napětí

Měření deformace zkušebního tělesa při postupném odleptávání povrchových vrstev, měřený vzorek počítáme podle teorie pružnosti jako křivý prut. Při odleptávání se postupně odstraňují povrchové vrstvy materiálu a tím se uvolňuje i napětí v této vrstvě obsažené.



Výhody:

- nízká cena
- dostupnost

Nevýhody:

- nízká přesnost

### 3.1.1 Nepřímé metody měření zbytkových napětí

#### **Metoda křehkého nátěru**

Zkoumaný povrch je potřen křehkým pryskyřičným nátěrem, v poslední době i fólií s křehkou vrstvou. Po zaschnutí se působením deformací iniciují trhlinky ve směru kolmém na maximální dilataci. Možnost zkoumání povrchových mikrotrhlin vodivým nátěrem po popraskání změna vodivosti nátěru, nebo folie.

Výhody:

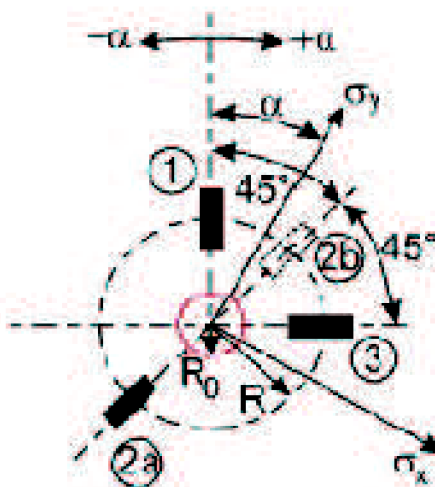
- rychlá, operativní metoda

Nevýhody:

- malá přesnost
- velké ovlivnění okolními vlivy (teplota, vlhkost)
- náročné na zkušenosti pracovníka

#### **Metoda odvrtávání**

Princip odvrtávací metody (metody otvoru) spočívá ve zjištění deformací, které vzniknou v odlitku, po odvrtání malého otvoru. Proto se tato metoda označuje jako semidestruktivní, kdy malé narušení povrchu nemusí mít vliv na funkčnost daného odlitku. Změna deformace se určuje tenzometry umístěnými v radiálním směru ve stejné vzdálenosti od středu otvoru, a to pomocí tenzometrické růžice. Odvrtáním materiálu se naruší vnitřní silová a momentová rovnováha a to způsobí deformaci na povrchu, která je změřena tenzometrickou růžicí. Naměřené uvolněné deformace se pak vyhodnotí a pomocí odvozených teorií se určí průběh a velikost zbytkových napětí. [17] (více se touto metodou budeme zabývat v experimentální části).



Obr. č. 6: Schéma tenzometrické růžice

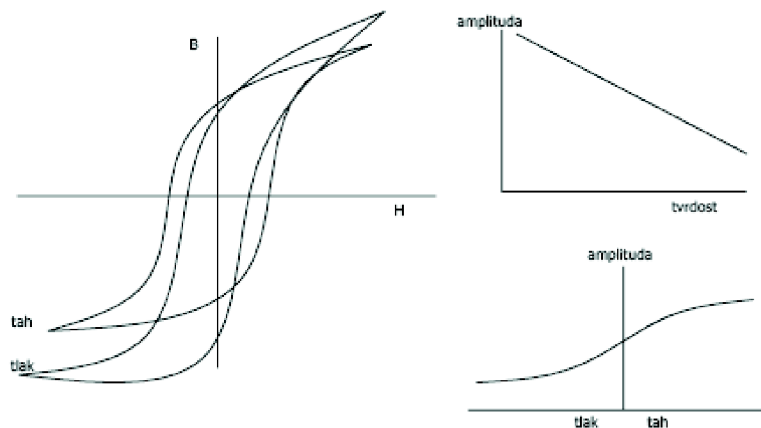
### 3.2 Měření pomocí magnetického pole

Při přiblížení či oddálení magnetu k jádru je slyšet v reproduktoru hlasité praskání. Souvisí to s nespojitostmi při magnetování feromagnetických materiálů.



Obr. č. 7: Původní Barkhausenovo uspořádání zesilovače

### Hysterezní křivka materiálu



Obr. č. 8: Hysterezní křivka

Proměřuje se hysterezní křivka materiálu - z její deformace se stanoví velikost napětí v materiálu. Vlivem napětí v materiálu se tvar smyčky mění, amplituda šumu je závislá i na tvrdosti materiálu.

Výhody:

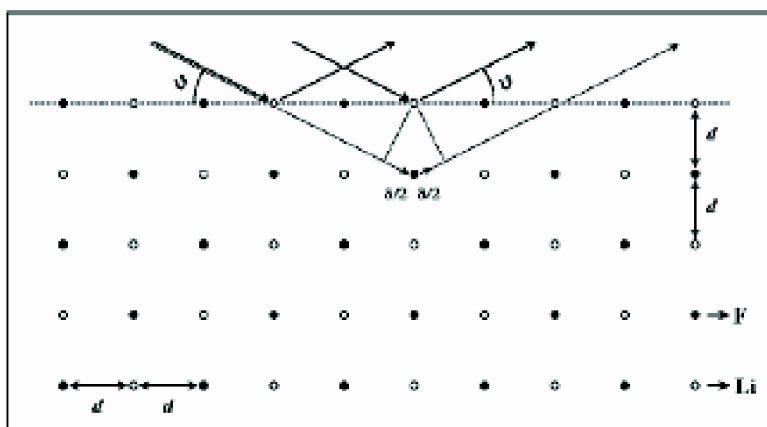
- nedestruktivní
- rychlá, operativní, velmi přesná

Nevýhody:

- složitá kalibrace
- použití pouze pro feromagnetické materiály

### 3.3 Rentgenová difrakce

Rozptyl rentgenových paprsků na krystalech materiálů. Zjišťuje se mezivzrost  $d$ , která je porovnávána s mezivzrostem nedeformované mřížky. Vychází se přitom ze vztahů z teorie elasticity. Při ozáření mřížky dojde při dosažení příznivého směru paprsků k mřížce k rozptylu (difrakci) a ke vzniku interferenčního maxima ve směru  $\theta$ .



Obr. č. 9: Odraz rentgenových paprsků od materiálu

Výhody:

- nedestruktivní
- možnost měřit distorzi z několika směrů
- možnost stanovit napětí na jednotlivých fázích
- možnost měřit napětí I. II. i III. druhu
- proměření velmi nehomogenních napěťových polí
- lze měřit z plošného obsahu v řádech  $\text{mm}^2$

Nevýhody:

- měříme pouze ve velice tenkých vrstvách  $10^{-2} - 10^{-3}[\text{mm}]$
- mnohé materiály dávají velmi neostrá difrakční maxima
- nelze použít pro měření amorfních materiálů
- přesnost měření klesá se zvětšujícími se zrny materiálu
- měření pouze elastických deformací [18]

#### 4. ZKUŠEBNÍ VZORKY POUŽITÉ VE STUDII

Zkoumané vzorky byly odlity v prostorách automobilky Škoda Auto a. s. Mladá Boleslav. Vzorky byly odebrány z talkově litéch spodních bloků motorů.

#### **4.1 Popis slévárny tlakového lití v závodě Škoda Auto a. s. Mladá Boleslav**

Mladoboleslavský závod je tvořen samozřejmě všemi nutnými prvky, bez kterých se náročná výroba moderních automobilů neobejde. Areál je tvořen slévárnami hliníku a litiny, obráběcími dílnami, montážními linkami, dále sklady (surovin i hotových výrobků) a také oddělením administrativy, laboratořemi, kontrolami kvality, oddělením obchodu, expedicí apod.

Slitina  $\text{AlSi9Cu3(Fe)}$  je jedinou používanou slitinou a v současné době i perspektivní slitinou pro výrobu tlakově litých odlitků ve slévárně hliníku Škoda Auto a. s. Mladá Boleslav. Slitina  $\text{AlSi9Cu3(Fe)}$  vychází ze slitiny ČSN 424339, která se používala pro výrobu odlitků v hutních provozech Škoda Mladá Boleslav od r. 1969. Po vstupu hutních provozů Škoda Mladá Boleslav do německého koncernu Volkswagen bylo zahájeno používání označení  $\text{AlSi9Cu3(Fe)}$ . Vyrábějí se zde z ní strojní součásti do automobilů Škoda, Volkswagen a Seat - skříně převodovky a spojky, horní a spodní díl tříválcového bloku motoru se zalitými litinovými vložkami. Hmotnost tam vyráběných odlitků se v současné době pohybuje od 4 do 20 kg/ks. Pracovní cyklus je prováděn v třisměnném provozu. Ten je výhodný z hlediska provozu tavírny (rovnoměrný odběr elektrické energie, průběžné tavení na plynových pecích bez vychladnutí vyzdívky).

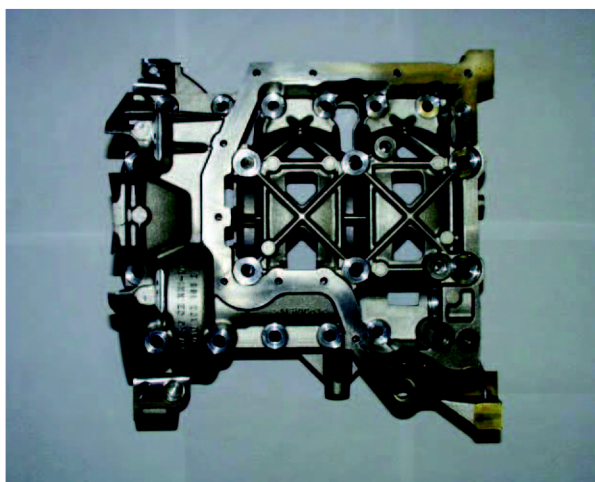
Tavírna je vybavena čtyřmi pětitudnovými plynovými šachtovými pecemi Striko 5000. Tyto pece mají dvě části - tavící a udržovací a obě jsou dimenzovány na 2,5 tuny roztaveného materiálu. Základní surovinou pro tavení jsou hliníkové housky (asi 50 %), zbytek tvoří vlastní vratný materiál. Kontrola chemického složení slitiny je prováděna z každé tavby před odlitím. Vzorek je posílán potrubní poštou a jeho ofrézovaná část se v laboratořích hodnotí na kvantometru. Analýza je provedena přibližně za 60 s a výsledky rozboru jsou rozesílány pomocí interních sítí. Měření se provádí dvakrát, v případě výskytu odchylky i vícekrát. Pokud chemické složení tavby nesouhlasí s předepsanou

normou či požadavkem zákazníka, pak je standardně provedena úprava složení na tavírně a vzorek je opět poslán do laboratoře. U hliníkových slitin se opakované měření složení tavby stává zcela výjimečně, protože chemické složení u vsázky se mění minimálně.

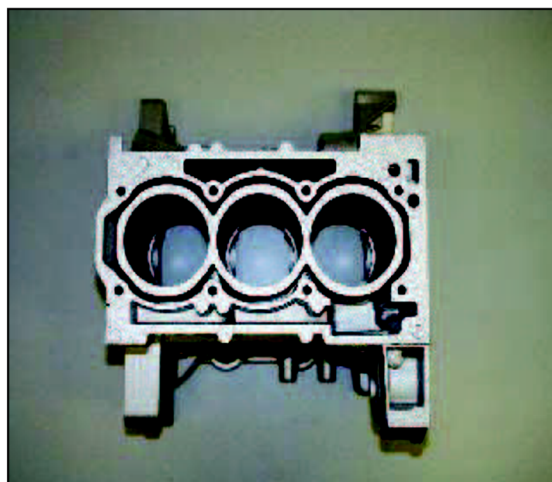
Kontrola teploty se provádí vždy před odpichem do převozního bubnu ponorným pyrometrem. Při zavádění nového materiálu či nové součásti, případně pokud vznikly nějaké komplikace s materiálem, se provádí odlévání zkušebního tělesa na kontrolu mechanických vlastností [19].

## 4.2 Spodní díl bloku motoru

Spodní díl bloku motoru je odléván na tlakovém stroji se studenou horizontální komorou (na kterém se v současné době odlévají výhradně téměř všechny slitiny hliníku). Po ztuhnutí se odlitek z pohyblivé části formy vytlačí pomocí vyhazovačů a odebírá se ručně nebo pomocí robota. Následuje ochlazení odlitku, odstřížení vtoků a přetoků. Před dalším licím cyklem se forma nastříká separačním prostředkem, který zamezuje nalepování odlitků na formu a usnadňuje jejich vyjímání z formy. V moderních provozech je celý výrobní cyklus automatizován.



Obr. č. 10



Obr. č. 11

Obr. č. 10 Spodní díl bloku 3v motoru EA111 03D/1,2I [19]

Obr. č. 11 Horní díl bloku 3v motoru EA111 03D/1,2I [19]

Parametry tlakového lícího stroje: [19]

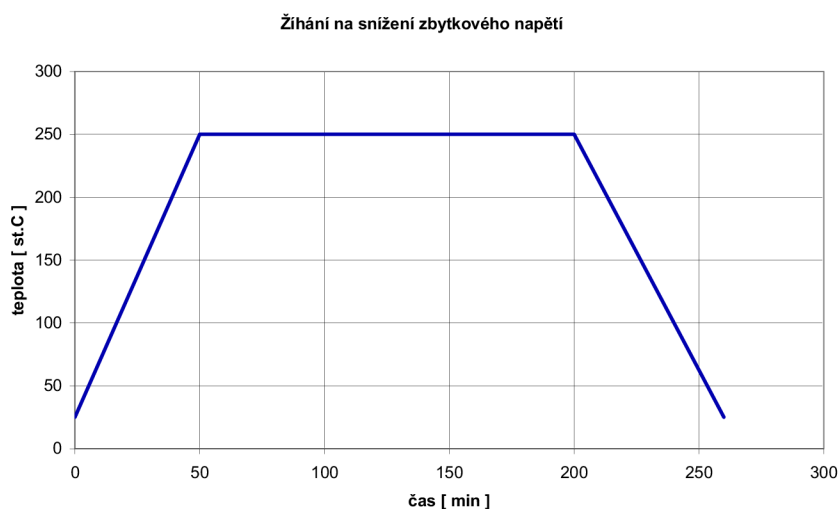
- **vstupní teplota lití** – materiál AISi9Cu3(Fe): 670 °C
- **vstupní teplota formy** – materiál X38CrMoV5:
  - 200 °C – pohyblivá
  - 180 °C – pevná
- **teplota chladícího média v soustavě chladících kanálů ve formě** -olej: 90 °C,  
-voda: 25 °C
- **vstříkovací rychlost  $v_1$** : 0,15 m/s
- **vstříkovací rychlost  $v_2$** : 4,5 m/s

#### 4.2.1 Tepelné zpracování spodních dílů motoru EA111 03D/1,2I

Odlitky je nutné žíhat, protože v oblastech ložisek, kde je uložena kliková hřídel, dochází k značným nárazům kliky. Bez žíhání, k odstranění pnutí, dochází k velkým deformacím v oblasti ložisek a hrozí tak zadření kliky v motoru obzvlášť, když je motor studený.

Žíhací cyklus (obr. č. 12 ) se skládá z těchto režimů:

- ohřev na teplotu 250 °C +/-10 °C po dobu cca. 50 minut
- prodleva na teplotě 250 °C +/-10 °C po dobu cca. 2,5 hod.
- ochlazení na teplotu 25 °C až 40 °C během cca.1 hodiny



Obr. č. 12 Příklad tepelného zpracování odlitku bloku motoru ze slitiny AlSi9Cu3

*Poznámka:* Ke zbytkovému napětí v odlitcích: vlivem smršťování vzniká v průběhu tuhnutí v odlitcích zbytkové napětí. Po vychladnutí nastává i za normální teploty tečení materiálu a napětí se postupně zmenšuje. Takový samovolný pokles napětí v odlitku (kovu) se nazývá relaxace (Termín "relaxace napětí" zde není chápán striktně jako "pokles napětí bez změny deformace", ale volněji jako "pokles napětí")[19].

## EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 5. CÍL EXPERIMENTU

Cílem experimentu je zjistit možnost výpočtu zbytkového napětí u Al slitin litých tlakově do písku. Experiment jsem rozdělil na dvě části. V první části budeme zjišťovat modul pružnosti  $E$  [MPa] a v druhé části experimentu se budeme věnovat výpočtu zbytkového napětí. Z těchto veličin potom určím hodnoty  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_{red}$ .



## 5.1 Zjišťování modulu pružnosti E [MPa] na vzorcích ze slitiny AlSi9Cu3

Označení vzorků:

- Vzorek č. 1-25.8/35II Horní díl bloku motoru
- Vzorek č. 2-9.9/35I Horní díl bloku motoru
- Vzorek č. 3-11.9/30I Spodní díl bloku motoru



Obr. č. 1



Obr. č. 2

Obr. č. 1 vzorek č. 1-25.8/35II Horní díl bloku motoru

Obr. č. 2 vzorek č. 2-9.9/35I Horní díl bloku motoru

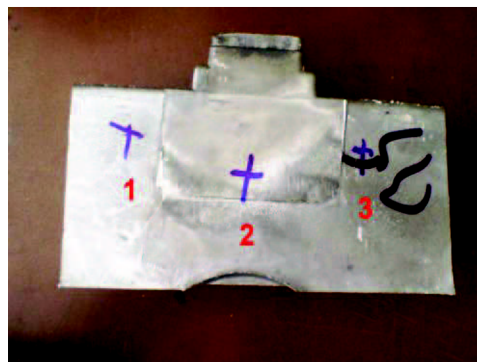
### 5.1.1 Měření rychlostí průchodu podélných ultrazvukových vln u odlitků ze slitiny AlSi9Cu3

Měření rychlosti šíření podélných ultrazvukových vln jsem provedl na 3 různých vzorcích vyřezaných z bloků motoru. Každé 3 vzorky byly vyřezány z jiné tavby. Na vzorku č.1 jsem provedl 2 měření a na vzorcích č. 2 a 3 jsem provedl 3 měření z důvodu lepší dostupnosti pro měřicí sondu. Měření jsem prováděl tloušťkoměrem ECHOMETR 1060, který se jeví, podle mého uvážení, jako neoptimálnější z důvodu největší přesnosti měření.



Obr. č. 3

Obr. č. 3 ECHOMETR 1060 - sonda DS6,  $\varnothing 10\text{mm}$ , 2MHz



Obr. č. 4

Obr. č. 4 Měřený vzorek č. 2. Křížky označují místa, kde jsem měřil rychlosti šíření podélných ultrazvukových vln

Tabulka č. 1 Závislost rychlosti na tloušťce stěny. Naměřené hodnoty:

vzorek číslo	měřené místo	tloušťka stěny [mm]	rychlost [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	$\varnothing V_l$ [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
1	1	23,85	6380	6385
	2	23,7	6390	
2	1	20,8	6440	6413
	2	21,65	6410	
	3	20,7	6390	
3	1	21,8	6400	6380
	2	22	6350	
	3	21,8	6390	

Z tohoto experimentu zjistíme  $E$  [MPa] modulu na vzorcích odlévaných tlakově u komerčních odlitků AISi9Cu3.

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

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

Protože není známo, jakých hodnot nabývá pro každý měřený materiál konstanta  $k$ , která je funkcí Poissonovy konstanty  $\mu$ , můžeme ji teoreticky zanedbat a tím se dopouštíme odchylky, která je rovna konstantě  $k_1$ . Výsledná odchylka je popsána vztahem:

$$E = \rho \cdot V_L^2 \cdot k_1 \text{ [Pa]} \quad (3)$$

kde

$$k_1 = \frac{1}{K} \quad [1] \quad (4)$$

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

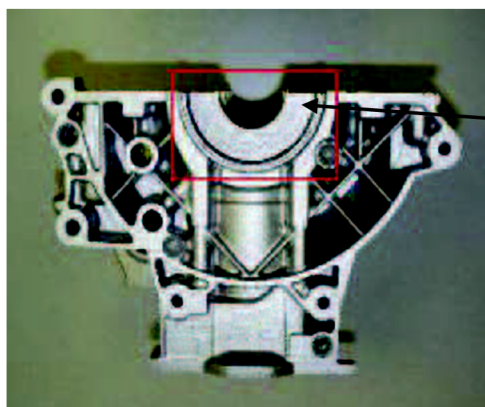
(Konstanta  $k_1$  je funkcí Poissonovy konstanty  $\mu$ , která je pro hliníkové slitiny  $\mu=0,33 - 0,34$ . Pro výpočet volím  $\mu=0,33$ . Konstanta  $k_1$  pak nabývá hodnot  $k_1=0,675-0,65$ . Pokud bychom zanedbali konstantu  $k_1$ , pak by se snížil modul pružnosti  $E$  o odchylku (5), která je rovna 32,5 - 35 % modulu pružnosti v tahu. Měrná hmotnost u tlakově litých odlitků z Al slitin se pohybuje od  $\rho=2\,680 \text{ kg/m}^3$  do  $\rho=2\,740 \text{ kg/m}^3$ , volím  $\rho=2\,710 \text{ kg/m}^3$ ).

Tabulka č. 2 Závislost modulu pružnosti  $E$  na rychlosti šíření podélných ultrazvukových vln.

číslo vzorku	$V_L \text{ [m.s}^{-1}\text{]} \text{ pro místo}$			$\emptyset V_L \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	$E \text{ [MPa]} \text{ pro místo}$			$\emptyset E \text{ [MPa]}$
	1	2	3		1	2	3	
1	6380	6390		6385	74 454	74 681		74 565
2	6440	6410	6390	6413	75 851	75 157	74 681	75 226
3	6400	6350	6390	6380	74 914	73 742	74 683	74 443

## 5.2 Zjišťování zbytkových napětí ve vzorcích odlitých ze slitiny AlSi9Cu3

Měření provádíme na vzorcích vyřezaných z bloků motoru (obr. č. 5). Měření bylo prováděno na ústavu strojírenské technologie – obor slévárenství.



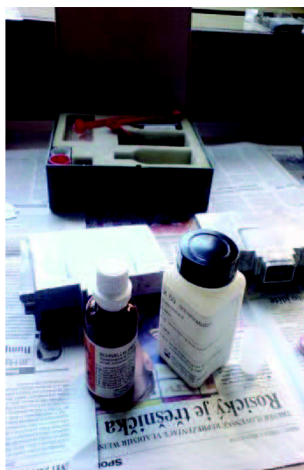
Místo kde se vzorky z horního bloku motoru vyřezaly

Obr. č. 5 Horní díl bloku motoru

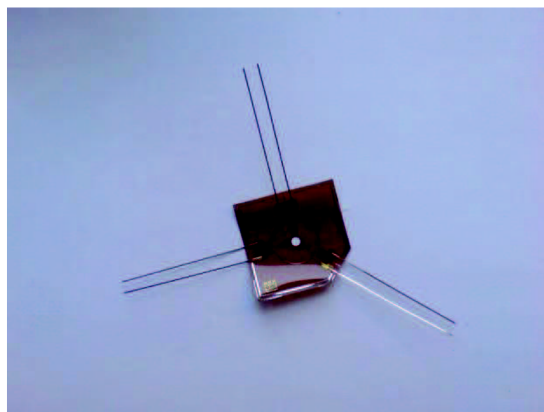
### Postup měření:

1. fáze: Dokonale zbrousíme místo nalepení, nejlépe jemným smirkovým papírem brousíme do té doby, než je na ohmat dokonale jemné.

2. fáze: Důkladně omyjeme zbroušená místa a tenzometry (obr. č. 7), (aby lépe přilnuly). Nejlepší na omytí je aceton, poté vysušíme do sucha.



obr. č. 6



obr. č. 7

Obr. č. 6 Lepidlo s označením: X60

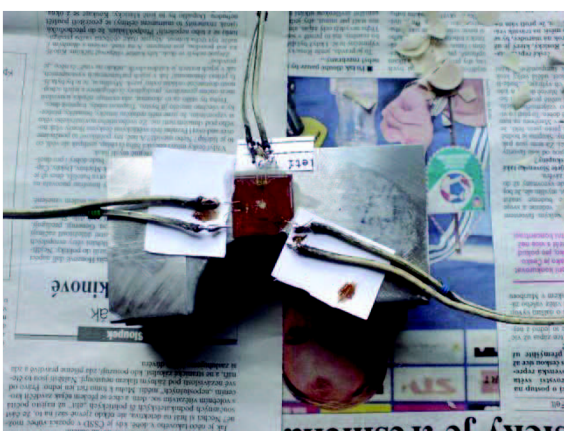
Obr. č. 7 Tenzometry: 1-RY21-3/120

3. fáze: Nalepíme tenzometry. Namícháme lepidlo (obr. č. 6) X60 od firmy Hottinger Baldwin Messtechnik GMBH (upravený dentakryl), nanese lepidlo na tenzometr a trochu i na místo měření. Přiložíme tenzometr na materiál, papírky oddělíme drátky od materiálu, aby se na něj nepřichytly. Válcovými

pohyby vytlačíme přebytečný tmel, který poté setřeme, přiložíme fólii a gumu, kterou zatížíme tlakem rukou. (Dáváme pozor, aby se nám guma pod rukama nepohnula.) Přidržíme přibližně 4-5 minut dokud lepidlo nevytverdne.

4. fáze: Drátky narovnáme, zastříhneme a pájkou nacínujeme. Z přepínače (obr. č. 11) zapojíme 1 drát kompenzační (můstkové zapojení), (obr. č. 8), dále natáhneme šňůry k drátkům a připájíme.

5. fáze: V místě tenzometru předvrtáme otvor vrtákem 2mm (obr. č. 9) a poté tento dovrtáme vrtákem 6mm do hloubky 6mm. (Podle americké normy E 837 můžeme vrtat až do hloubky  $1.2 \times \varnothing$  vrtáku).

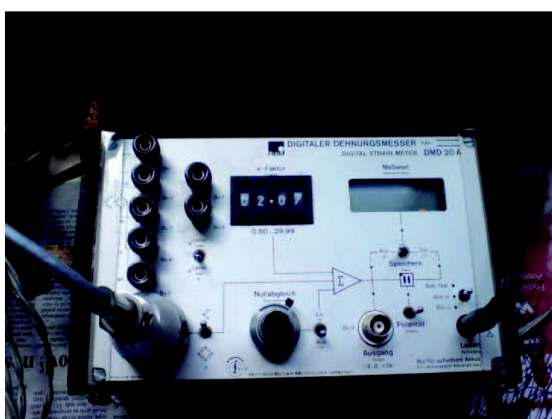


obr. č. 8



obr. č. 9

6. fáze: Po odvrtání lehce očistíme, chvílku počkáme, aby došlo k úplnému uvolnění pnutí, a můžeme odečítat napětí z měřícího přístroje (obr. č. 10)



obr. č. 10

Obr. č. 10 Můstek: DMA 20A

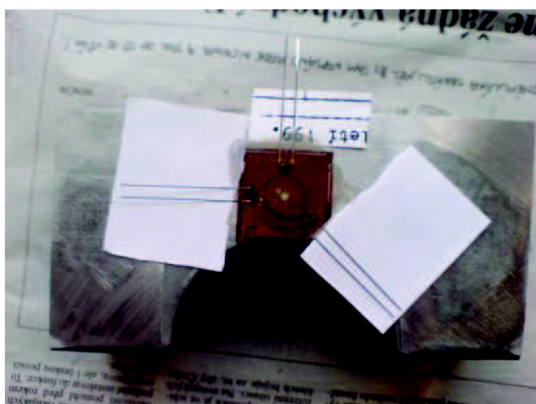


obr. č. 11

Obr. č. 11 Přepínač: UMK10



Měření bylo provedeno na 3 vzorcích, kde místa byla vybrána uprostřed vzorků, z důvodu nejlepší dostupnosti (obr. č. 12).



obr. č. 12

Tabulka č. 3 Zjišťování rozdílu zbytkového napětí, před odvrtáním a po odvrtání

vzorek číslo	před odvrtáním [ $\mu\text{m}$ ]			po odvrtání [ $\mu\text{m}$ ]			rozdíl [ $\mu\text{m}$ ]		
	A	b	c	a	b	c	a	b	c
1	1095	1128	1275	1084	1114	1233	11	14	42
2	932	164	819	933	208	835	-1	-44	-16
3	384	598	900	565	642	877	-181	-44	23

### 5.2.1 Výpočet zbytkového napětí $\sigma_1$ , $\sigma_2$ a $\sigma_{red}$

Výpočet zbytkového napětí jsem provedl pomocí vzorců:

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

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

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

Konstanty A a B jsem získal z programu na zjišťování zbytkového napětí vytvořeného na oboru slévárenství. Poissonovu konstantu volím  $\mu=0,33$ .

Tabulka č. 4 Výpočet zbytkového napětí  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  a  $\sigma_{red}$ 

číslo vzorku	$\varnothing E$ [MPa]	rozdíl vnitřního napětí [ $\mu m$ ]			zbytkové napětí [MPa]			konstanty	
		a	b	c	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_{red}$	A	B
1	74 565	11	14	42	-40,2	-88,1	102,6	-2,06E-06	-4,16E-06
2	75 226	-1	-44	-16	70,1	-4,1	87,7	-2,05E-06	-4,12E-06
3	74 444	-181	-44	23	55,1	-66,9	122,2	-2,07E-06	-4,16E-06

## 6. ZÁVĚR

Cílem této práce byla ukázka zpracování Al slitin a charakteristika Al slitin, jež jsou vhodné pro automobilový průmysl, a také popsání mechanických a fyzikálních vlastností nejpoužívanější slitiny pro automobilový průmysl - slitiny AlSi9Cu3.

Cílem experimentální části bylo ukázat, jak se v automobilovém průmyslu provádí zjišťování zbytkové napjatosti. Na těchto 3 vzorcích odlitých ze slitiny AlSi9Cu3 jsem ukázal postup, pro měření zjišťování zbytkových napětí. Mnou provedeny výzkum je pouze ukázkou možného postupu při měření. Pro výsledky, které by se daly skutečně využít například ve Škoda Auto a. s. Mladá Boleslav, bych potřeboval mnohem více vzorků, na základě nichž bych byl schopen určit zbytkové napětí z jakékoliv tavby, popřípadě z jakéhokoliv bloku motoru.

### Diskuse k výsledkům:

Místa 2 a 3: nejnebezpečnější hodnoty, protože vyšlo tahové napětí.

Místo 2 dosahuje 29.1% meze pevnosti v tahu.

Místo 3 dosahuje 22,9% meze pevnosti v tahu

Místo 1: méně nebezpečné hodnoty, protože vyšlo tlakové napětí.

Místo 1 dosahuje -88,1 [MPa].

**Literatura:**

1. MICHNA, Š., LUKÁČ, I., OČENÁŠEK, V., KOŘENÝ, R., DRÁPALA, J. a kol.: *Encyklopedie hliníku*, Prešov: Adin, 2005.
2. LEIS, W.: Giessen im CCT. *Symposium 2003*. Aalen, 2003
3. <http://strojirenstvi.studenske.cz/2008/10/gravitan-lit.html>
4. KOŘENÝ, R., GRÍGEROVÁ, T. *Zlívárénstvo nežezezných kovov*. Bratislava: ALFA, 1988
5. POŽÁR, J. Moderní metody výroby součástek metodami lití s krystalizací pod tlakem a tváření v polotuhém stavu. *Slévárénská ročenka*, 2000. 167 s.
6. STANČEK, L., VANKO, B., SEDLAČEK, E., BATYŠEV, A.I. Procesy tlakového liatia s vysokou spoľahlivosťou odliatkov a ich uplatnenie v automobilovom priemysle. *Mezinárodní konference TECHNOLOGY 2005*. Bratislava, Slovenská republika, 2005, str. 755 - 767
7. [http://www.stefanmichna.com/prograsivni-technologie/progresivni\\_technologie\\_odlevani.pdf](http://www.stefanmichna.com/prograsivni-technologie/progresivni_technologie_odlevani.pdf)
8. ČECH, J., BAŘINOVÁ, D., ZEMČÍK, L. Experimental and simulated evaluation of the quality of pressure and squeeze castings. *ARCHIVES OF FOUNDRY 2002*. Katowice, Poland, 2002, str.25 - 33.
9. <http://www.mmspektrum.com/clanek/rozvoj-tlakového-liti>
10. ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie nežezezných slitin*. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 148 s. ISBN 80-214-2790-6
11. LIPOVÝ, R. *Výroba odlitků pro automobilový průmysl ze slitin Al pomocí Squeeze-casting*, Diplomová práce v oboru „strojírenská technologie“. Brno: VUT-FS, Ústav strojírenské technologie. 2002.
12. ČECH, J., ZEMČÍK, L., PALÁN, K., BAŘINOVÁ, D. Možnosti experimentu a simulace při stanovování jakostních charakteristik u litin a vad u tlakově litých odlitků. *Slévárénství*, č. 8 - 9, 2002, str. č. 305 – 311.
13. [www.sebestasro.cz/html/litinefe.htm](http://www.sebestasro.cz/html/litinefe.htm)
14. [www.theones.wz.cz/include/slev.ppt](http://www.theones.wz.cz/include/slev.ppt)
15. Ghoma Ghomashchi, M. R., Vikhrov, A. Squeeze casting: an overview, *Journal of Materiale Processing Technology 101*, 2000., str. 1 – 9, Dostupné na World Wide Web: [www.elsevier.com](http://www.elsevier.com)



16. [www.stag.utb.cz/apps/stag/dipfile/index.php?download\\_this\\_unauthorized=8445](http://www.stag.utb.cz/apps/stag/dipfile/index.php?download_this_unauthorized=8445)
17. Doubrava, K., Kuliš Z.: Odvrtávací metoda – základní teorie, Summer Workshop of Applied Mechanics, Praha, 2002, 18 s.
18. [http://www.ateam.zcu.cz/download/Integrita\\_prednaskaTZ.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/download/Integrita_prednaskaTZ.pdf)
19. JIRKU, Lukáš. Hodnocení pórozity u tlakově litých odlitků z Al-slitiny. Diplomová práce v oboru „strojírenská technologie – slévárenství“. Brno: VUT-FSI, ústav strojírenské technologie. 2007, 138s.