

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Technologie lití v automobilovém průmyslu

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Valášek, Ph.D.

Autor práce: Jiří Andrlé

PRAHA 2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jiří Andrlé

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Technologie lití v automobilovém průmyslu

Název anglicky

Casting technology in automotive industry

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je shromáždit aktuální poznatky o možnostech využití technologie lití ve výrobním procesu automobilového průmyslu. Mezi dílčí cíle práce patří popsání konkrétních možností aplikace lití v průběhu výroby automobilů a nastínění vývojových trendů v této oblasti.

Metodika

- Současný stav řešeného problému (literární rešerše),
- závěry a přínos práce.

Doporučený rozsah práce

30 s.

Klíčová slova

Kovové materiály, odlévání, výrobní proces.

Doporučené zdroje informací

ASM Handbook Committee. Metals Handbook Metals Park: American Society for Metals, 1987.

CAMPBELL, John. Castings practice: the 10 rules of castings. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. xii, 205 s.

Časopisy: Manufacturing Technology, Strojírenská technologie.

Fredriksson, Hasse, and Ulla Akerlind. Materials Processing During Casting Hoboken: Wiley, 2006.

Pluhař, Jaroslav, and Josef Koritta. Strojírenské Materiály 1. vyd. Praha: SNTL, 1966.

SAE 2002 World Congress. Light Metals for the Automotive Industry: [SAE 2002, World Congress, Detroit, Michigan, USA, March 4 – 7, 2002] Warrendale: Society of Automotive Engineers, 2002.

Vojtěch, Dalibor. Materiály a Jejich Mezní Stav Vyd. 1. V Praze: Vysoká škola chemicko-technologická, 2010.

Předběžný termín obhajoby

2015/16 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Petr Valášek, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 20. 4. 2015

doc. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 24. 4. 2015

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 19. 03. 2017

Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Technologie lití v automobilovém průmyslu vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom že, na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“

V Praze dne

.....

Jiří Andrlé

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval všem, kteří mi při tvorbě bakalářské práce pomohli. Především děkuji vedoucímu práce panu doc. Ing. Petru Valáškoví, Ph.D. za cenné rady, připomínky a čas, který mi věnoval.

Abstrakt: Cílem práce je analyzovat materiály a technologie používané při odlévání v automobilovém průmyslu. Práce je rozdělena na tři hlavní části. V první části se práce věnuje materiálům používaným na odlitky. Jsou zde popsány jak železné kovy – litiny klasické a temperované, tak i stále více používané lehké hliníkové, hořčíkové a titanové slitiny. V další části jsou popsány licí technologie používané v procesu výroby automobilu včetně inovativních metod, které se teprve implementují do výrobního procesu automobilu. V poslední části se práce věnuje vývoji a inovacím licích technologií. Jedná se zejména o simulace licích procesů pomocí počítačových programů, které jsou schopné reálně simulovat průběh odlévání. Tyto metody jsou popsány formou jejich praktického využití při výrobě kvalitních odlitků dále využitelných v automobilovém průmyslu.

Klíčová slova: kovové materiály, odlévání, výrobní proces

Casting technology in automotive industry

Summary: The goal of this work is to analyse materials and technologies used in casting proces in the automotive industry. The work is divided into three main parts. The first part describes materials used for castings. There are described ferrous materials – cast iron and tempered iron, and lightweight alloys that are increasingly used - aluminum, magnesium and titanium alloys. The next section describes casting technologies used in the manufacturing process of the car, including the innovative methods that are being implemented to automobile manufacturing process. The last part is dedicated to the development and innovation of casting technology. In particular, the simulation of casting processes using computer programs that are capable of realistically simulating the course of casting. These methods are described in terms of their practical use in the manufacture of high quality castings further used in the automotive industry.

Key words: metal materials, casting, manufacturing proces

Obsah

1	ÚVOD.....	1
2	CÍLE A METODIKA PRÁCE.....	2
3	PROBLEMATIKA TECHNOLOGIE LITÍ V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU - LITERÁRNÍ REŠERŠE.....	3
3.1	MATERIÁLY POUŽÍVANÉ NA ODLITKY V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU	3
3.1.1	Hliník.....	3
3.1.2	Litina	7
3.1.3	Hořčík.....	11
3.1.4	Titan	12
3.2	METODY A TECHNOLOGIE LITÍ V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU	13
3.2.1	Lití do pískových forem	13
3.2.2	Tlakové lití	14
3.2.3	Nízkotlaké lití.....	15
3.2.4	Odstředivé lití.....	16
3.2.5	Lití do ztracené formy	18
3.2.6	Gravitační lití do trvalé formy.....	19
3.2.7	Thixocasting	20
3.3	FILTRACE TAVENINY A JEJÍ VLIV NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI ODLITKŮ	21
3.3.1	Vliv filtrace na mechanické vlastnosti slitiny Al-Si.....	22
3.4	VÝVOJ A INOVACE LICÍCH TECHNOLOGIÍ POUŽÍVANÝCH V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU..	23
3.4.1	Výroba pístních kroužků	24
3.4.2	Výroba “A“ sloupku funkčního konceptu automobilu Volvo.....	25
3.4.3	Simulace procesu výroby lopatky turbíny turbodmychadla metodou thixocastingu ..	27
4	ZÁVĚR.....	31
5	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	32

Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1: Litiny podle tvaru vyloučeného grafitu.....	8
Obr. 2: Předpis tepelného zpracování temperovaných litin.....	10
Obr. 3: Bloky motorů VW vyrobených ze slitiny ALUSIL®	16
Obr. 4: Schematické znázornění metody odstředivého lití s rotující formou	17
Obr. 5: Model uspořádání ventilů na vtokové soustavě	17
Obr. 6: Schematické znázornění gravitačního lití do trvalé formy	20
Obr. 7: Schematické znázornění thixocastingu	21
Obr. 8: Schematické znázornění činnosti filtru	22
Obr. 9: Vliv filtrace na (a) průběh pevnosti v tahu v závislosti na teplotě, (b) teplotní závislost deformace při zatížení do lomu	23
Obr. 10: Stromečkové uspořádání odlitku pístních kroužků při vytahování z pískové formy.	24
Obr. 11: Závislost podílu tuhé frakce na teplotě suspenze.....	28
Obr. 12: Postup plnění formy	29
Obr. 13: Detail procesu plnění lopatky turbíny během procesu thixocastingu.....	29
Obr. 14: Nezaběhnutí (a) ve výsledku simulace, (b) reálného odlitku	30
Tab. 1: Fyzikální vlastnosti hliníku	5
Tab. 2: Chemické složení použité slitiny Al-Si	22
Tab. 3: Čas a finance potřebné k výrobě sloupků.	27

Seznam použitých zkratk

LLG – Litina s lupínkovým grafitem

LKG – Litina s kuličkovým grafitem

LVG – Litina s vermikulárním grafitem

TL – Temperovaná litina

CGI – Compacted Graphite Iron

ADI – Austempered Ductile Iron

MKP – Metoda konečných prvků

SMCS – Slow – Motion Casting Simulation

SCC – Safety Concept Car

RMC – Rapid Manufacturing Consortium

SL - Stereolithografie

1 Úvod

V dnešní době se nejen v automobilovém průmyslu lze setkat se snahou o výrobu stále silnějších, kvalitnějších, lehčích ale v neposlední řadě také levnějších dílů a výrobků. Tato snaha je dána nejen vývojem techniky ale také rozvojem jednotlivých oborů a požadavkem na trvale udržitelný rozvoj. Tendence ke zjednodušování výrobních procesů a ekonomická rentabilita výrobků je jedním z hlavních kritérií výroby obecně. Honba za silnějšími a zároveň lehčími komponenty na komerčním automobilovém trhu vedla dodavatele odlitek ke zdůraznění inovací ve snaze výrobců o snížení spotřeby paliva a emisí CO₂. Tomu odpovídá i trend využívání hliníku jakožto lehkého a zároveň pevného materiálu, což přispívá k neustálému snižování hmotnosti automobilů a tím i snižování emisí. Vzhledem k trendu zjednodušování výrobních operací se tak stále častěji aplikuje úprava konstrukce automobilových dílů tak, aby jejich stavba byla prostší a jejich výroba mohla probíhat v méně krocích. Z tohoto jevu tak mnohdy vyplývá i nahrazování standardních výrobních procesů litím, které je schopné produkovat mechanickými a materiálovými vlastnostmi vyhovující, rozměrově přesné, kvalitní a levné díly využitelné v průběhu výroby automobilů.

2 Cíle a metodika práce

Cílem této bakalářské práce je shromáždit aktuální poznatky o možnostech využití technologie lití ve výrobním procesu automobilu. Mezi dílčí cíle práce patří popsání konkrétních možností aplikace lití v průběhu výroby automobilů a nastínění vývojových trendů v této oblasti. Literární rešerše byla sepsána mimo jiné prostřednictvím aktuálních vědeckých článků z elektronických informačních zdrojů SCOPUS a databáze Web of Science.

3 Problematika technologie lití v automobilovém průmyslu – literární rešerše

Tato práce se v oblasti zdrojů zaměřila na aktuální publikace, jak z oblasti strojírenské technologie, tak i literaturu pojednávající o aktuálních materiálech používaných v automobilovém průmyslu. Tyto knihy byly vhodně doplňovány různými elektronickými zdroji a aktuálními vědeckými články z databází licencovaných elektronických informačních zdrojů SCOPUS a Web of Science.

3.1 Materiály používané na odlitky v automobilovém průmyslu

V konstrukci karoserie automobilu se odlitky používají jen zřídka, nicméně jejich zastoupení je početnější v pohonném ústrojí. V minulosti se na odlitky používala hlavně litina, jelikož se tolik nedbalo na celkovou hmotnost automobilu a jeho emise. V dnešní době, kdy automobilovému průmyslu udává trend snaha o lehčí komponenty a nižší emise, se stále více odlitků vyrábí z lehkých, a přitom pevných slitin. Jedná se zejména o slitiny hliníku a dalších neželezných kovů – hořčíku a titanu. Následující kapitola se tedy věnuje popisu materiálů používaných na odlitky v automobilovém průmyslu pro bližší popsání vhodnosti použití jednotlivých materiálů pro konkrétní aplikace.

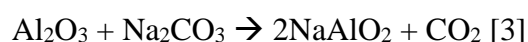
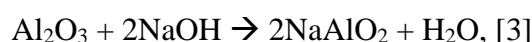
3.1.1 Hliník

Odlitky ze slitin hliníku se v konstrukci automobilů používají ve dvou hlavních skupinách. Přestože v nosných částech automobilů převažují díly tvářené, nalezneme zde i výjimky v podobě dílů odlévaných. Jsou to především tvarově složité spojovací součásti v uzlech karoserií. Větší zastoupení mají hliníkové odlitky v oblasti konstrukce hnacího ústrojí. Tam se naopak ve větší míře setkáváme s odlitky než s tvářenými díly. To je dáno hlavně použitím odlitků ze slitin hliníku na tvarově složité součásti jako například bloky motorů či převodové skříně. Pokud by tyto díly bylo možné vyrobit jinou technologií, bylo by to však velmi finančně náročné. [1]

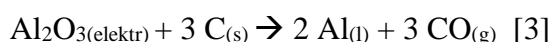
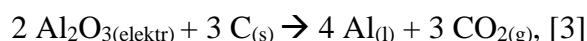
V automobilovém hnacím řetězci se hliníkové odlitky široce používají pro téměř 100 % pístů, okolo 75 % na hlavy válců, 85 % na sací potrubí a převodovky a další díly jako části zadní nápravy, skříň diferenciálu a hnací hřídele. Dále jsou hliníkové odlitky používány na přibližně 40 % disků kol, brzdové komponenty, odpružení (podpory, ramena náprav), komponenty řízení (podpora airbagu, řídicí hřídele, klouby, pouzdra) a také na přístrojové desky. [2]

3.1.1.1 Výroba hliníku

Nejvýznamnější ekonomicky využitelnou rudou pro výrobu hliníku je bauxit. V závislosti na bohatosti se jedna tuna hliníku získává ze čtyř až šesti tun bauxitu. Existuje několik způsobů výroby čistého oxidu hlinitého z rud, prakticky se však průmyslově využívá jen několik z nich. V současnosti se oxid hlinitý vyrábí téměř výlučně zásaditými metodami. Těmito metodami se působením alkálií (NaOH, resp. Na₂CO₃) na rudu bauxitu váže oxid hlinitý na hlinitan sodný, který je rozpustný ve vodě, podle následujících rovnic [3]:



Roztok hlinitanu sodného se odděluje od sraženiny, tzv. červeného kalu, složeného hlavně z oxidů a hydroxidů křemíku, železa a titanu. Roztok hlinitanu sodného se potom rozkládá a vylučuje se čistý hydroxid hlinitý, který se následně odfiltruje. Alkalický roztok se po úpravách vrací zpět do procesu. Hydroxid hlinitý se pak při vysokých teplotách kalcinuje za účelem proměny na suchý čistý a nehygroskopický α -Al₂O₃ vhodný k výrobě kovového hliníku. Dalším stupněm je elektrolytická výroba hliníku. Hliník je výrazně neušlechtilý lehký kov, proto ho není možné vyrobit elektrolýzou z vodních roztoků. Pro tento kov se výhodně používá elektrolýza z roztavených solí. Pro výrobu hliníku elektrolýzou je vhodná roztavená sůl kryolit, Na₃AlF₆, do které se vsází oxid hlinitý a další přídavky na modifikaci vlastností elektrolytu. Elektrolýza hliníku se realizuje v elektrolyzních pecích, elektrolyzérech, u kterých se nachází roztavený kryolit při teplotě přibližně 960 °C. Současný elektrolyzér tvoří uzavřený systém, do kterého patří uhlíková katoda, tvořící dno elektrolyzéro a uhlíková anoda, která je ponořena do roztavené koupele. Do koupele se pravidelně přidává oxid hlinitý, který se za daných podmínek v kryolitu rozpouští, a následkem nastaveného napětí na elektrolyzéro se rozkládá na kovový hliník putující na dno ke katodě a kyslík, který oxiduje uhlíkovou anodu. Následující rovnice popisují výrobu kovového hliníku elektrolýzou [3]:



3.1.1.2 Vlastnosti hliníku

Hliník je lehký kov, bělavě šedé barvy. Je kujný a slévatelný; využití čistého hliníku pro účely slévání je však pro jeho nevýhodné pevnostní vlastnosti nízké. Ke slévání se proto využívají slitiny hliníku. V následující tabulce jsou znázorněny fyzikální vlastnosti čistého hliníku. [3]

Hustota	2700 kg.m ⁻³
Teplota tání	660 °C
Teplota vypařování	2520 °C
Krystalická mřížka	Kubická plošně centrovaná
Mřížková konstanta	$a = 4,05 \cdot 10^{-10}$ m
Atomové číslo	13
Atomová hmotnost	26,98

Tab. 1: Fyzikální vlastnosti hliníku [4]

Hliník má velmi výhodnou kombinaci fyzikálních (např. tepelná vodivost), mechanických, chemických (odolnost vůči korozi – díky vzniku ochranné vrstvy Al₂O₃ o tloušťce 5 – 20 nm) a technologických vlastností (např. dobrá schopnost k tváření za tepla i studena), které umožňují aplikaci hliníkových materiálů téměř ve všech oblastech lidské činnosti. [3]

3.1.1.3 Hlavní hliníkové slitiny používané v automobilovém průmyslu

Hliníkové slitiny lze obecně rozdělit do dvou hlavních skupin. Binární slitiny hliníku obsahují pouze hliník a jednu další složku kromě hliníku, a to křemík. Binární slitiny se následovně dělí na podeutektické (5 - 11,7 hm. % Si), eutektické (přibližně 11,7 hm. % Si) a nadeutektické (11,7 – 24 hm. % Si). Toto rozdělení je dáno obsahem křemíku a jeho omezenou rozpustností v tuhém stavu (podle rovnovážného binárního diagramu Al-Si). Další skupinou jsou speciální slitiny hliníku, které obsahují složek více. Jedná se o slitiny Al-Cu a Al-Mg. [3, 5]

AlSi – siluminy

V automobilovém průmyslu se používají např. siluminy s přísadou niklu a mědi, příp. železa. V těchto slitinách vznikají vícesložkové fáze, které mají dobrou tepelnou stabilitu, proto si slitiny s obsahem 1-2 % Ni si zachovávají dobré mechanické vlastnosti i za zvýšených teplot. Slitiny s niklem mají i poněkud menší součinitel teplotní roztažnosti. Z tohoto důvodu se používají zejména pro písty a hlavy válců motorů. Slévárenské vlastnosti se ale s obsahem niklu zhoršují. Vyloučení velmi jemné intermetalické fáze niklu nemá prakticky žádný vliv na

obrobitelnost ani na odolnost proti korozi. Obdobné účinky jako přísada niklu má i kobalt. Slitiny Al-Si-Cu se vyznačují sníženým obsahem křemíku. V současnosti patří k velmi používaným slitinám, protože se vyznačují svými velmi dobrými slévárenskými vlastnostmi. K jejich přednostem patří dobrá obrobitelnost, při chladnutí se u nich netvoří soustředěné staženiny a nedochází ke vzniku trhlin za tepla. Součástí této slitiny je měď, která zlepšuje vlastnosti za vyšších teplot, ale současně snižuje odolnost proti korozi. Odlitky jsou vyráběny metodou tlakového odlévání a jsou používány na automobilech jako armatury benzínových motorů, karburátory a ucpávky. Mechanické vlastnosti slitin Al-Si závisejí v první řadě na obsahu křemíku. S jeho rostoucím obsahem roste tvrdost a klesá tažnost, zejména při nadeutektickém obsahu Si. Nadeutektické slitiny Al-Si jsou tedy nejtvrdější a jsou proto využívány u součástek namáhaných na otěr (např. písty). Siluminy, konkrétně slitina A356 (AlSi7Mg), byly v nedávné době také testovány pro zpracování v polotuhém stavu (thixocasting) a použití v automobilovém průmyslu. Bylo zjištěno, že odlitky vyrobené touto technologií jsou velmi čisté, bez pórovitosti, s vynikajícím povrchem, a navíc s lepšími mechanickými vlastnostmi, než mají odlitky vyráběné konvenčními licími postupy za použití stejné slitiny. [5 - 7]

Slitiny Al-Si-Mg

Slitiny Al-Si-Mg jsou podeutektické slitiny s vyšším obsahem křemíku a mají dobré slévárenské vlastnosti i svařitelnost. Odlévají se jak do pískových, tak do kovových forem gravitačně i pod tlakem. Využívají se na velmi namáhané výrobky v automobilovém průmyslu. Slitiny Al-Si-Mg se používají ve stavu vytvrzeném – T6. Jsou vhodné na tenkostěnné, tvarově složité odlitky s vysokými nároky na pevnost a houževnatost. U automobilů může být příkladem použití této slitiny blok motoru nebo hlava válců. [5, 8]

Slitiny Al-Cu

Odlitky s vysokými nároky na pevnost – převodové skříně a odlitky pro práci za zvýšených teplot – hlavy válců. Vzhledem ke špatným slévárenským vlastnostem je u těchto slitin trend převádět odlitky z těchto slitin na slitiny typu Al-Si. U automobilů se odlitky z těchto slitin používají pro hlavy válců a rozměrově větší písty. [5, 9]

Slitiny Al-Mg

Použití těchto slitin je především u součástí, u kterých se požaduje vysoká odolnost proti korozi a pro namáhané odlitky s náhlými změnami průřezu. Vyznačují se vysokou měrnou pevností, rázovou houževnatostí, vysokou tažností, výbornou obrobiteľnosťou a nízkou hustotou. Mezi nevýhody těchto slitin patří horší slévárenské vlastnosti, větší pórovitost a nižší těsnost odlitků. Uplatnění v automobilovém průmyslu našly slitiny Al-Mg jako pedály, řadící páky, součásti podvozků či ozdobné díly aut. Jejich použití na dekorativní účely je dáno také výbornou leštitelností. [5, 9]

AlMgSi

Slitiny typu AlMgSi se používají na více namáhané odlitky pracující při vyšších teplotách. V konstrukci automobilů jsou z této slitiny například hlavy válců či automobilové kování. [3]

3.1.2 Litina

Litiny jsou slitiny železa, uhlíku a dalších prvků, v nichž je uhlík vyloučen jako grafit nebo vázán jako karbid Fe_3C , případně karbid jiného prvku. Obsah uhlíku v litinách je vyšší, než odpovídá jeho maximální rozpustnosti v austenitu, to je přibližně více než 2 % C.

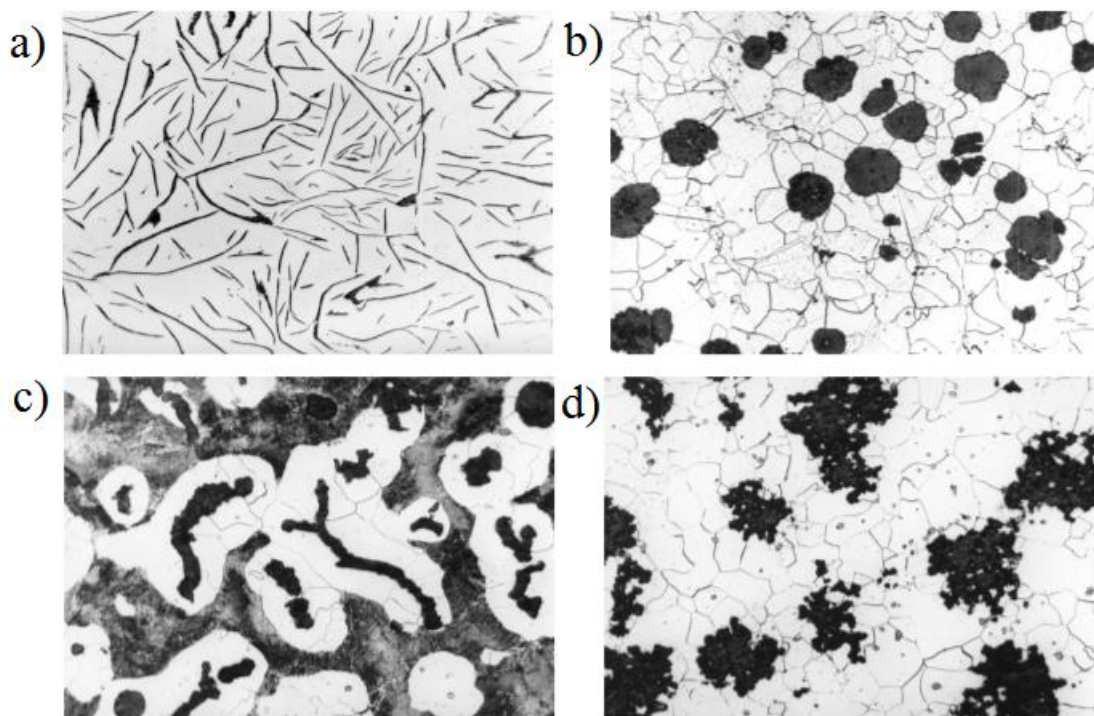
Základním kritériem pro určení druhu litin je tvar vyloučeného grafitu, viz obr. 1. Podle tvaru grafitu se litiny dělí na následující typy:

obr. 1 a) Litina s lupínkovým grafitem – LLG (šedá litina),

obr. 1 b) Litina s kuličkovým grafitem – LKG (tvárná litina)

obr. 1 c) Litina s červíčkovým grafitem – LVG (vermikulární litina) nebo také CGI litina (Compacted Graphite Iron)

obr. 1 d) Litina s vločkovým grafitem – TL (temperovaná litina) [10, 11]



Obr. 1: Litiny podle tvaru vyloučeného grafitu:

a) lupínkový – LLG b) kuličkový – LKG c) vermikulární – LVG d) vločkový – TL

[10]

Litina s lupínkovým grafitem – LLG (šedá litina)

Nejčastěji se šlo v minulosti v automobilovém průmyslu setkat s odlitky vyrobenými z litiny s lupínkovým grafitem (šedá litina). Zejména se jedná o litiny typu ČSN 42 24 20 a ČSN 42 24 25, které jsou obvykle očkované 75 % ferosiliciem. Hlavními důvody jsou dobrá pevnost v tahu a tvrdost, tedy zaručené mechanické vlastnosti. Používá se hlavně na odlitky, u kterých je požadavek právě na tyto dobré mechanické vlastnosti, jako například převodové skříně, motorové vložky, bloky motorů, hlavy válců, ozubená kola, písty, řemenice a kompresorové válce. [12]

Litina s kuličkovým grafitem – LKG (tvárná litina)

V současné době je nejpoužívanější litinou v automobilovém průmyslu litina s kuličkovým grafitem, známá také jako tvárná litina. Někdy se také používá místo oceli na odlitky díky podobným mechanickým vlastnostem. Jedním z hlavních důvodů pro její použití je úspora energie při tavení a také úspora materiálu. Vlastnosti této litiny jsou velmi výhodné, zejména se jedná o dobré slévárenské vlastnosti, nízkou měrnou hmotnost, dobrou obrobitelnost, dobré kluzné a tlumící vlastnosti. [13]

Litina s červíčkovým grafitem – LVG (vermikulární litina nebo také CGI litina – Compacted Graphite Iron)

Tento druh litiny se vyznačuje zvláštním tvarem grafitu – takzvaným červíčkovým. Může však obsahovat i menší množství kuličkového grafitu, obvykle do zhruba 20 % celkového vyloučeného grafitu. Tato morfologická varianta vyloučeného uhlíku se jak tvarově, tak svými mechanickými vlastnostmi pohybuje mezi litinami s lupínkovým a kuličkovým grafitem. Svým chemickým složením však odpovídá LKG. Hlavním rozdílem mezi LČG a LKG je tedy způsob modifikace, který u červíčkového grafitu způsobí nedokonalou sferoidizaci grafitu. Toho se dosahuje především modifikováním Mg v množství, které je menší než pro vznik kuličkového grafitu.

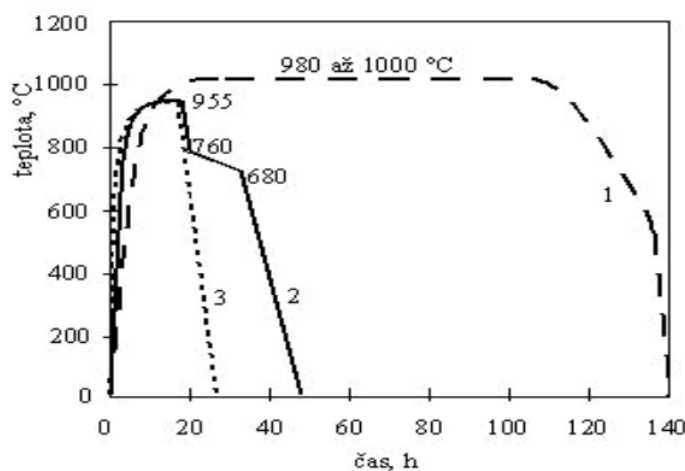
Právě díky vlastnostem, ležícím mezi šedou a tvárnou litinou, je tato litina velmi vhodná pro výrobu odlitků s velkou tvarovou složitostí. Slévárenské vlastnosti jsou u vermikulární litiny výhodnější než u tvárné litiny, a navíc tato litina v oblastech s požadavky na vyšší mechanické vlastnosti převyšuje litinu šedou. Pro konstruktéry je LVG výhodná díky svým vlastnostem při střídavém tepelném namáhání, které je pro jiné litiny omezujícím faktorem pro použití v konstrukci motorů. To ji mimo jiné předurčuje k využití v automobilovém průmyslu na bloky motorů, hlavy válců, svody či pouzdra ventilů. Její výroba je technologicky velmi podobná s výrobou LKG. [12, 14, 15]

Litina s vločkovým grafitem – TL (temperovaná litina)

Litiny s vločkovým grafitem, původní název temperovaná litina, je slitina Fe, Si, Mn, a dalšími doprovodnými prvky, ve které je tzv. temperovaný uhlík vyloučen částečně, nebo úplně jako vločkový grafit. Temperovaná litina se vyrábí z litiny s nízkým stupněm eutektičnosti, tzv. bílé litiny (obsah uhlíku 2,4 – 3,4 %) Po odlití se konečné mechanické vlastnosti získávají tepelným zpracováním, takzvaným temperováním. Temperování je dlouhotrvající žihání odlitků. V současné době je kvůli energetické náročnosti temperování nahrazována litinou s kuličkovým nebo červíčkovým grafitem. V automobilovém odvětví byla používána hlavně pro malé odlitky jako například součásti zámků nebo západky. Podle způsobu tepelného zpracování rozeznáváme dva druhy temperovaných litin, a to:

a) Temperovaná litina s bílým lomem. Vzniká oduhličením při temperování, velmi dlouhém tepelné zpracování při vysokých teplotách, viz obr. 2, křivka 1. Využívá se nejčastěji pro tenkostěnné odlitky s tloušťkou stěny maximálně 3 mm.

b) Temperovaná litina s černým lomem. Temperování spočívá v ohřevu do austenitické oblasti a uhlík rozpuštěný v austenitu se vylučuje jako vločkový grafit. Litina je neoduhličená a má v celém průřezu odlitku temperovaný uhlík viz obr. 2, křivka 2 a 3.



Obr. 2: Předpis tepelného zpracování temperovaných litin;
1) na bílý lom, 2) na černý lom, 3) perlitická litina [15]

Špatná zabíhavost a velká smrštivost je hlavní nevýhodou temperovaných litin. Jejich využití na velké odlitky tak není vhodné. Uplatnění však v automobilovém průmyslu nacházejí výrobky z temperovaných litin u středně mechanicky namáhaných součástí, jako například hlava ložiska čepu kola (těhlice) z temperované litiny zakomponovaná do polonápravy, samotné nápravy, či další menší součásti polonáprav. [10, 12, 15]

ADI litiny

Pro izotermicky kalenou litinu s kuličkovým grafitem (obvykle, a ne zcela správně nazývanou bainitická litina), se často používá zkratka ADI (Austempered Ductile Iron). Výsledkem tepelného zpracování není v tomto případě martenzit ani bainit, a proto se nejedná o kalení. K dosažení austeniticko-feritické struktury se provádí ohřev na austenitizační teplotu a následné rychlé ochlazení nejčastěji v solné lázni na teplotu izotermické výdrže. Tento nový typ litiny přinesl vysoké mechanické a technologické vlastnosti. Uplatňují se zejména v automobilovém průmyslu, kde jejich vysoké mechanické vlastnosti umožňují snížit průřez (tloušťku) odlitků a tím výrazně snížit jejich hmotnost. Další výhodou využitelnou u konstrukce automobilů jsou tlumící vlastnosti ADI litin srovnatelné s běžnými litinami s kuličkovým grafitem, které v případě použití u spalovacích motorů umožňují snížit jejich hlučnost.

Výhody použití tohoto moderního materiálu v automobilovém průmyslu můžeme demonstrovat na vývoji ojnice z ADI litiny, která byla následně použita u dvouválcového motoru s výkonem 55 koní. Změnou materiálu ojnice z klasické kované oceli na ADI litinu se na ojnici projevilo snížením hmotnosti ze 600 g na 400 g, což je výrazná úspora 33 %. Dalším příkladem využití této litiny je přední svislá vzpěra pro závodní vozy, či díl spodního ramene vozidla Dodge Ram Pick up, u kterého sice došlo jen k malé úspoře materiálu (6 %), ale k 54 % úspoře nákladů spojených s obráběním součástí. [12, 13, 16, 17]

V dnešní době se většina litinových dílů vyrábí z litiny s kuličkovým grafitem. Mezi její výhodné vlastnosti patří dobrá slévateľnost, nízká měrná hmotnost, obrobiteľnost, kluzné vlastnosti a tlumící schopnosti. Trendem dnešní doby v používání litiny je ale hlavně litina s červíčkovým grafitem, někdy také označována jako vermikulární litina. Tento materiál se používá pro odlitky s vlastnostmi ležícími mezi fyzikálními a mechanickými vlastnostmi litiny s lupínkovým a kuličkovým grafitem. Pro konstruktéry je LČG výhodná díky svým vlastnostem při střídavém tepelném namáhání, které je pro jiné litiny omezujícím faktorem pro použití v konstrukci motorů. Její výroba je technologicky velmi podobná s výrobou LKG. [14]

V posledních letech kleslo zastoupení železných materiálů v konstrukci automobilů hlavně kvůli rozhodnutí výrobců nahrazovat hliníkem doposud železné odlitky bloků motorů. [11]

3.1.3 Hořčík

Hořčík a jeho slitiny nacházejí stále větší praktické využití v automobilovém průmyslu pro kombinaci svých specifických vlastností, jako je nízká měrná hmotnost $1\,740\text{ kg/m}^3$, modul pružnosti v tahu 45 GPa a mez pevnosti 160 - 365 MPa. [18]

Hořčíkové slitiny jsou velmi atraktivní ve využití v automobilovém průmyslu z důvodů redukce váhy vozidla. Hořčík také vyniká vynikající tekutostí, takže je z něj možné odlévat velmi složité tenkostěnné odlitky (až 1,5 mm), což je v automobilovém průmyslu důležité. Strategie rozvoje hořčíkových slitin se tak stala rozhodující ve výrobním procesu většiny významných automobilových firem. [19]

Počátek používání hořčíkových slitin v automobilovém průmyslu započal v Německu u firmy Volkswagen v r. 1933 s modelem Volkswagen Typ 1, častěji známého jako „Brouk“. Již u prvního modelu tohoto automobilu bylo použito více jak 20 kg hořčíku na jedno vozidlo. V dnešní době se hořčík a jeho slitiny používají nejen na součásti motorů, ale také na části

podvozku, uzlů karoserií a také při výrobě interiérových aplikací jako například volantů, rámu sedadel, přístrojových desek či částí střešních oken. [20]

V dnešní době nejpoužívanější slitiny hořčíku pro slévárenské účely jsou slitiny typu Mg-Al-(Zn, Mn), které současně tvoří nejstarší skupinu slitin hořčíku. Jejich výhodou jsou optimální vlastnosti při poměrně nízkých výrobních nákladech. [18]

V automobilovém průmyslu se nejčastěji používá slitina se standardním označením AZ91 či AZ81, častěji známá pod obchodním názvem elektron. Tato slitina hořčíku obsahuje 9 % hliníku a 1 % zinku, dále také malé množství manganu. Pro aplikace, u nichž je požadavek na vyšší tažnost a houževnatost, se snižuje obsah hliníku a zinek je nahrazen 0,2 – 0,6 % manganu – slitiny AM20, AM50 a AM60. Tyto slitiny se používají pro aplikace s vysokými požadavky na bezpečnost, jako například volanty aut, armatury řízení či díly sedadel. [5, 21]

Konkrétní příklad využití slitiny AZ91 jsou litá kola, kterým se také říká elektrony právě podle použitého materiálu. Hořčíková slitina AZ91 se v automobilovém průmyslu používá i v různých modifikacích, jejichž mírně odlišné složení je optimalizováno pro konkrétní technologie odlévání. Například slitina s označením AZ91D se používá hlavně pro tlakové lití do kovových forem, proto může obsahovat větší množství mědi. Naopak slitina AZ91E musí obsahovat menší množství mědi, protože se využívá k lití do pískových forem, při kterém je rychlost tuhnutí nižší. [22]

3.1.4 Titan

Hlavní výhodou použití titanu jsou jeho dobré mechanické vlastnosti (srovnatelné s legovanými ocelmi) spolu s jeho malou měrnou hmotností, která je sice přibližně 1,6 krát větší než je tomu u slitin hliníku, ale naopak 1,7 - krát nižší než u oceli. Mezi nevýhody titanu patří špatná obrobitelnost jeho slitin a v některých případech může být nežádoucí také nízký modul pružnosti v tahu 115 GPa. V současné době je nejznámější a nejpoužívanější titanová slitina TiAl6V4, která obsahuje 5,5 - 6,75 % hliníku a 3,5 - 4,5 % vanadu. Mechanické vlastnosti této slitiny jsou: pevnost v tahu 1 000 MPa, mez kluzu 910 MPa, modul pružnosti v tahu 114 GPa, tvrdost HRC 36 při měrné hmotnosti 4 420 kg/m³. [23, 24]

V automobilovém průmyslu je zastoupení dílů z titanu a jeho slitin z hlediska hmotnostního zastoupení zanedbatelné. V některých aplikacích jsou však jeho výhodné mechanické vlastnosti využívány. Jedná se hlavně o vysoce namáhané součásti vysokootáčkových motorů závodních

speciálů, jako ojnice, pístní čepy či ventily spalovacích motorů. Ty mohou být použity v litém stavu bez dalšího tepelného zpracování. [25]

S díly z titanu se ale můžeme setkat i u sériových automobilů. Jde například o turbodmychadlo TD05 s γ TiAl turbínou používané u sériového automobilu Mitsubishi Lancer EVO VI. [26]

3.2 Metody a technologie lití v automobilovém průmyslu

Následující kapitola popisuje jednotlivé způsoby odlévání používané v průběhu výroby automobilu. Nejprve je popsána metoda lití do pískových forem, která byla na odlitky používána jako jedna z prvních, a která se i přes svou jednoduchost dokázala přizpůsobit dnešním požadavkům, a tak se stále v dnešní době používá pro výrobu automobilových součástí. Dále jsou popsány sofistikovanější technologie lití, jako například lití do kovových forem, tlakové lití, nízkotlaké lití, odstředivé lití. V poslední části této kapitoly jsou popsány inovativní lící technologie, které buď už z části našly, nebo teprve hledají své místo při výrobě komponentů automobilu. Jde o metody lití do ztracené formy a lití v polotuhém stavu – thixocasting.

3.2.1 Lití do pískových forem

Při procesu lití do pískových forem je možné formy a jádra použít na rozdíl od kokil (kovových forem) pouze jednou. Tavenina se do formy dostává buď bez použití další síly (gravitační lití) nebo pomocí nízkotlakého lití, které bude popsáno dále. Pro sériovou výrobu odlitků jsou pískové formy a jádra vyráběny pomocí lisovacích strojů a strojů pro lisování jader. Formovací hmota se zhutňuje buď pomocí vibrování a/nebo lisování nebo metáním či pomocí impulsu tlakové vlny. Jádra se pak zhutňují metáním či lisováním. [27]

Tato technologie je vhodná zejména pro komplexnější bloky motorů. Tvarově jednodušší odlitky je výhodnější odlévat technologií tlakového lití do trvalých forem, která je popsána dále. Nízkotlaké či gravitační lití do pískových forem využívá například firma BMW ve své slévárně v Landshutu v Německu, kde touto technologií ročně zpracují přibližně 35 000 tun lehkých kovových slitin pro výrobu 300 000 hlav válců a 500 000 klikových skříní. [28]

Po lisování formovacího materiálu a modelovací směsi se složí všechny části formy, přičemž právě forma sama o sobě zrcadlí všechny díly a otvory finálního motorového bloku. Písková forma se po tepelném zpracování a vychladnutí přesouvá do další sekce, kde je plněna taveninou. Celý blok je následně ochlazen před tím, než vstoupí do třetí části, kde je forma společně s

odlitkem tepelně zpracována. Tepelné zpracování bloku vede ke zlepšení mechanických vlastností slitiny pro vhodné použití. To je velmi důležité nejen pro temperování odlitku, jakož i pro spalování organického pojiva, které drží pohromadě pískovou formu a jádro. Po spálení pojiva je možné z odlitku odstranit zbytky pískové formy. Výhodou této metody je, že až 98 % písku může být opětovně použito pro výrobu další formy. [27, 29]

3.2.2 Tlakové lití

Při potřebě výroby velkého počtu kusů a vysoké produktivity se stále častěji využívá metoda tlakového lití. To potvrzuje i každoroční nárůst výroby hliníkových odlitků touto metodou o 10 %. Celkově se zhruba 70 % všech hliníkových odlitků vyrábí právě technologií tlakového lití. Technologii tlakového lití používá i slévárna Al ŠKODA AUTO v Mladé Boleslavi pro výrobu 3- válcových bloků motorů 1,0 l MPI a TSI a 4- válcových bloků motorů 1,2 l a 1,4 l TSI. Dále také pro skříně spojek MQ 100 a skříně převodovek MQ 200. [30, 31]

Principem této technologie je vstřikování tekuté slitiny do dutiny kokily pod vysokým tlakem (2 až 500 MPa podle velikosti stroje). Tavenina se nejprve z udržovací pece dopravuje do plnicí komory licího stroje, jehož píst je součástí lisovacího mechanismu. Rychlost lisovacího pístu je regulovatelná, jeho maximální rychlost dosahuje i více než $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Touto metodou je možné vyrábět tvarově složité odlitky s tloušťkou stěn 1 - 2 mm v závislosti na použité slitině. Některé materiály umožňují výrobu i tenkostěnných odlitků s tloušťkou stěny méně než 1 mm. Další nespornou výhodou této technologie je vysoká rozměrová přesnost. [5, 32]

Pohyb lisovacího pístu a plnění dutiny formy lze rozdělit do několika fází.

I. fáze: Předplnění licí komory

Nastává po naplnění licí komory tekutým kovem. Píst se pohybuje nízkou rychlostí, aby došlo k ustálení hladiny taveniny a nedošlo k vylití z nalévacího otvoru. V této fázi na kov nepůsobí žádný tlak. Následně nastává rovnoměrně zrychlený pohyb pístu. [33, 35]

II. fáze: Plnění formy

Tato fáze by šla rozdělit na dvě části. V první části nastává takzvané hrubé plnění formy, při kterém vtokovým systémem prochází velké množství taveniny a dochází k plnění dutiny formy. V této fázi se píst pohybuje konstantní rychlostí kolem 5 m/s. Dále nastává doplňování kovu do

formy tak, aby tavenina vyplnila působením tlaku od pístu veškerý volný prostor ve formě. [33, 35]

III. fáze: Dotlak

Po úplném vyplnění dutiny formy přestává na taveninu působit dynamický účinek pohybu pístu. Při chladnutí tak na tuhnoucí kov působí tlak, který lze nastavovat na regulátorech. U velkých licích zařízení tento tlak může být až 500 MPa. Tuhnutí tedy probíhá pod zvýšeným tlakem. [33 - 35]

3.2.3 Nízkotlaké lití

Technologie nízkotlakého lití spočívá ve zvýšení tlaku nad hladinou kovu a jeho vytlačení stoupací trubici vzhůru do formy. Dělená licí forma se tak nachází nad kelímkem a její plnění probíhá odspodu. Před samotným plněním kelímku se zásobou kovu je možné taveninu filtrovat přes keramický filtr, který zachytí zbytkové oxidy a zaručí tak vyšší čistotu tekutého kovu. Protože je ústí stoupací trubice pod hladinou taveniny, do formy proudí pouze čistý kov bez vměstků a oxidů. Umístěním formy nad kelímkem se dosahuje klidného plnění bez víření a tím pádem vyšší kvality odlitků. Rychlost odlévání lze jednoduše regulovat přetlakem plynu nad taveninou. Tímto tlakem je také zajištěno tuhnutí odlitku pod zvýšeným napětím. Další výhodou této metody je, že vtok zároveň slouží jako náliček, a tak je využití tekutého kovu mimořádně vysoké. Tuhnutí odlitku probíhá odshora směrem k plnicí trubici, což zvyšuje kvalitu odlitků, která vyniká nad odlitky vyrobené jinými technologickými procesy lití. Tato metoda je mimořádně vhodná pro aplikaci v automobilovém průmyslu pro odlévání slitin lehkých kovů, především pak na výrobu disků kol, hlav válců a částí brzdových systémů. Při vhodné konstrukci formy, teplotním režimu, licí rychlosti a načasování operací je s touto metodou možné dosáhnout vysoké kvality jak povrchu, tak i vnitřního objemu odlitku zároveň s velkou produkcí. Navíc řízeným tuhnutím je zajištěna rovnoměrná mikrostruktura, nízká pórovitost a minimální vady odlitků, čehož se využívá při výrobě bloků vysokovýkonných motorů. [3, 5, 36]

Komerčně používaná metoda nízkotlakého lití do trvalé formy byla ještě vylepšena firmou KS Aluminium-Technologie AG, která vyvinula patentovaný postup a slitinu ALUSIL®. Tato technologie je unikátní tím, že produkuje monolitické hliníkové bloky bez potřeby dalšího posílení pomocí litinových vložek válců. Slitina ALUSIL® (AlSi17Cu4Mg) při porovnání se standardními siluminovými slitinami vykazuje lepší konstrukční tuhost vzhledem k o 12 %

vyššímu Youngovému modulu. Příkladem využití tohoto postupu a slitiny mohou být bloky motorů řadového 5 - ti válce a vidlicového 10 - ti válce dieselových motorů VW zobrazených na obr. 3. [27]

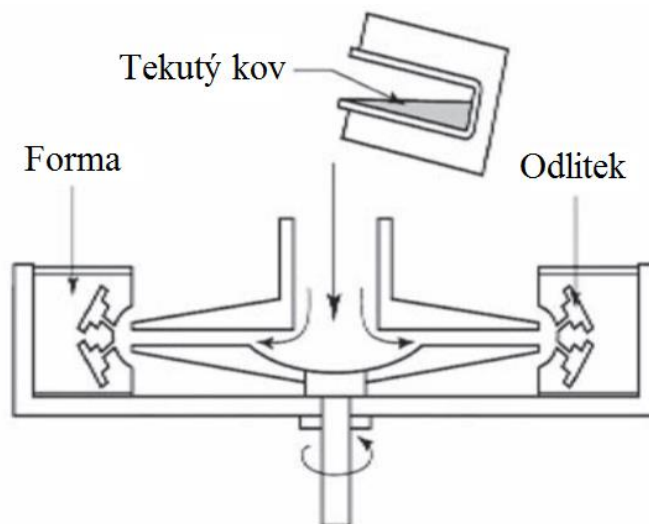


Obr. 3: Bloky motorů VW vyrobených ze slitiny ALUSIL® [27]

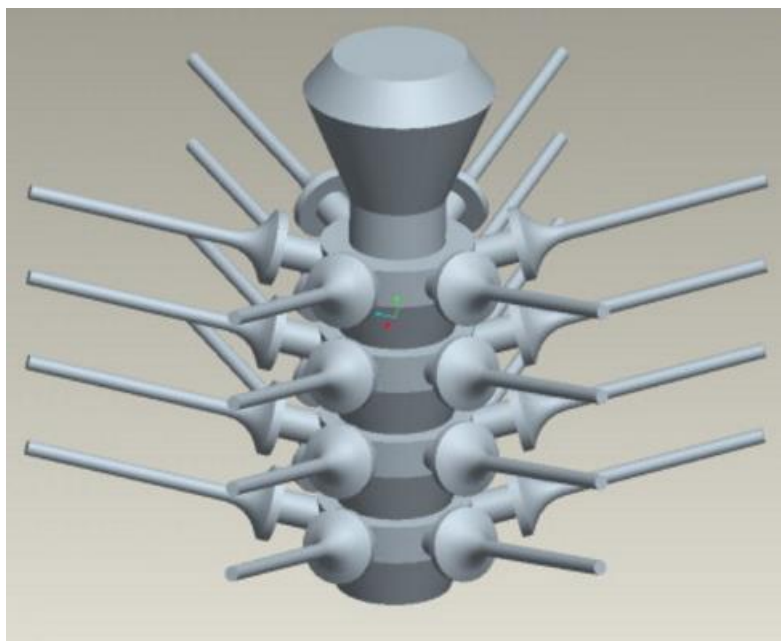
3.2.4 Odstředivé lití

Odlitky vyrobené tímto postupem se vyrábějí litím kovu do otáčející se formy, či do formy, která začíná rotovat při samotném lití. Tím je materiál v tekutém stavu nucen vykonávat rotační pohyb a odstředivá síla působící na kov ho tlačí na stěny formy. Tím se dosáhne těsného kontaktu a vměstky, struska i plyny se z kovu vytlačují a oddělují na vnitřní straně odlitku. Tím je zaručena rozměrová přesnost, kvalita a povrchová čistota odlitků. Tato technologie je použitelná jak pro malosériovou výrobu, tak i pro série do stovek tisíc kusů. [37, 38]

Při odstředivém lití se jako formy používají kokily. Při této technologii jsou dutiny licí formy uspořádány okolo osy rotace, navíc ve dvou řadách nad sebou, což je zřetelné z obr. 4. Při odlévání je tekutý kov odléván do osy rotace a následně odstředivou silou vytlačen do rotující formy. To umožňuje vytvoření většího množství odlitků najednou. Na obr. 5 je vidět, že při vhodném uspořádání forem nad sebou lze najednou vyrobit až 24 ventilů, a tak efektivně využít licí proces. Tato metoda se v automobilovém průmyslu využívá hlavně k výrobě ventilů. [39]



Obr. 4: Schematické znázornění metody odstředivého lití s rotující formou [39]



Obr. 5: Model uspořádání ventilů na vtokové soustavě [40]

3.2.4.1 Výroba výfukových ventilů z TiAl slitiny metodou odstředivého lití

Pro výrobu tepelně namáhaných výfukových ventilů se běžně používají austenitické oceli (výjimkou jsou tzv. duté ventily, plněné sodíkem pro zlepšení odvodu tepla během provozu motoru). V současné době se však jako ideální materiál jeví titanová slitina TiAl (Ti45Al8Nb1B), vzhledem k její nízké hustotě, vysoké měrné pevnosti, tuhosti a také vysoké odolnosti proti únavě materiálu při provozu za vysokých teplot. Touto problematikou se zabýval tým odborníků, jejichž experiment, popsáný ve článku [40], provedený při výrobě

odliteků výfukových ventilů spočíval ve spojení více technologických operací do jednoho kroku, tzv. one-step tavení a odstředivé lití. Tato fúze je použita ke snížení nákladů na odlitek. To znamená, že když je teplota roztavené slitiny a rotační rychlost keramické formy konstantní v předem nastavených podmínkách, tavenina se přímo nalije do otáčející se formy. Z experimentu však vyplynulo, že odlitky vykazují staženiny a vady, které se koncentrují do středu dříku ventilu. To bylo způsobeno tím, že se formy začaly plnit nejdříve podél vnějšího okraje dříku a až nakonec tavenina vyplnila střed dutiny. Stejným způsobem probíhalo i tuhnutí, což mělo za následek právě vznik vad ve středu odlitku. Bylo tedy nutné upravit konstrukci formy, zvětšit vtokové otvory a také zvýšit rychlost otáčení formy a teplotu taveniny. Po upravení těchto parametrů se veškeré vady odstranily. Při následné simulaci lití bylo zjištěno, že se formy již plní správně a mají tak i správný teplotní gradient. Reálnost této technologie pro aplikaci v hromadné výrobě a nákladová efektivnost TiAl automobilových ventilů jsou posuzovány. Předpokládá se však, že by tato metoda mohla přinést výrazné finanční úspory. [40 - 43]

3.2.5 Lití do ztracené formy

Technologie lití do ztracené formy byla široce používána pro odlitky z litiny a oceli, nicméně vývoj tohoto procesu byl relativně pomalejší pro slitiny hliníku a hořčíku než právě pro litinu a ocel. Právě proto, že vývoj pro stále více používané lehké neželezné slitiny zaostával, je tato metoda teprve ve své ranné fázi. Je však považována za reprezentativní příklad nové lící technologie 21. století.

Proces lití do ztracené formy spočívá v nahrazení vzoru odlitku, vyrobeného z pěny s nízkou hustotou, tekutým kovem. Jako modelovací materiál se typicky používá pěnový polystyren, ale stále více se lze setkat i s pěnovým polymetylmakrylátem (spíše známém ve své neexpandované podobě jako plexisklo), který redukuje vznik karbonu na povrchu odlitku. Tento způsob lití nabízí možnost výroby tvarově velmi komplikovaných odlitek se složitou geometrií, včetně složitých zápchů, hran a dutin bez potřeby dalších dokončovacích prací. Navíc má oproti konvenčním metodám lití do pískových forem ekonomické a ekologické výhody.

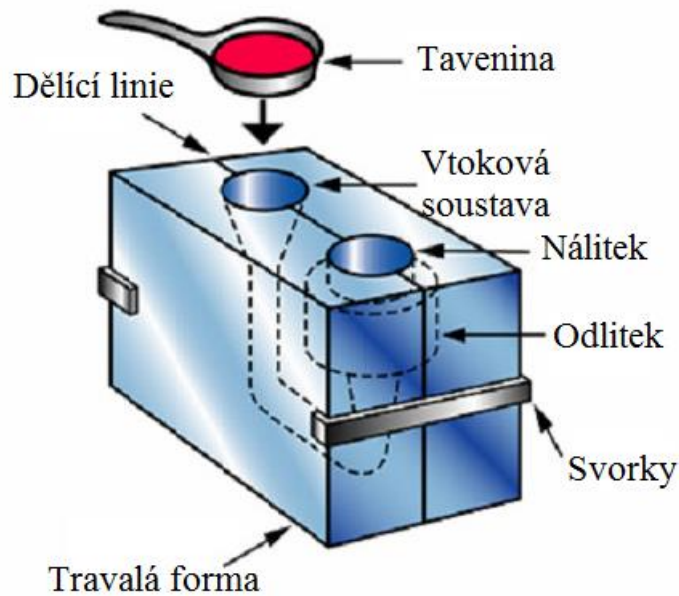
Proces výroby a samotného lití touto technologií lze rozdělit do několika fází. Zaprvé je vyrobena pevná forma s použitím modelu z lehké pěny, který je pokryt žáruvzdorným materiálem – keramikou, čímž vznikne negativní forma. Další možností je zahrnout model do formovacího písku bez pojiva. Následující postup probíhá stejně u obou způsobů vytvoření

formy. Tekutý kov se nalije na pěnový model, který se následkem vysoké teploty kovu odpaří a kov tak vyplní veškerý prostor, ve kterém se nacházel pěnový model. Nakonec se tak získá kovový odlitek v přesném tvaru pěnového modelu.

I v automobilovém průmyslu je tato metoda teprve na vzestupu. Někteří výrobci automobilů, a hlavně jejich slévárny však už touto technologií disponují a například společnost BMW technologií lití do ztracené formy vyrábí bloky vidlicových šestiválcových motorů R6ZK. Firma FORD používala tuto metodu k výrobě hliníkových hlav válců, společnost Fiat poté převzala tuto technologii do masové výroby malých odlitků. Společnost FATA aluminium, jedna z největších a nejdéle působících společností v oblasti konstrukce výroby a montáže automatizovaných zařízení na hliníkové odlitky, technologií lití do ztracené formy vyrábí nejen bloky motorů a hlavy válců, ale i další výrobky, jako například výfukové svody či další menší automobilové aplikace. [27, 44 - 47]

3.2.6 Gravitační lití do trvalé formy

Tuto technologii je možné charakterizovat jako opakovatelný lící proces používaný pro odlévání neželezných slitin, typicky pak pro hliníkové slitiny. Proces gravitačního lití do trvalé formy se od tlakového lití liší v podstatě pouze v tom, že pro naplnění formy taveninou se místo vysokého tlaku používá gravitační síla. Gravitační lití do trvalé formy je vhodné pro výrobu středního až velkého množství výrobků s větší tloušťkou stěn odlitků než u tlakového lití, ale zároveň menší než u lití do pískových forem. Vhodnou konstrukcí formy lze provádět plnění odspodu (patrné z obr. 6), což zamezí víření taveniny a plnění formy tak probíhá klidně bez zbytečné oxidace roztaveného kovu. Hlavní výhodou této metody je optimální odvod tepla z tuhajícího odlitku formou, což vede ke krátké době tuhnutí. To má za následek dobré mechanické vlastnosti odlitků, zejména po dalším tepelném zpracování. Navíc lze při tomto procesu ovlivnit správným návrhem vtokové soustavy a nálitků v horní části formy její plnění i tuhnutí odlitku. Další modifikací, pomocí vodního chlazení v dolní části formy, lze dokonce dosáhnout řízeného tuhnutí. V automobilovém průmyslu se tato technologie používá pro odlévání tvarově složitých hlav válců jak pro zážehové, tak i vznětové motory. Dále se využívá k výrobě bloků vznětových motorů, a výrobě vložek válců z šedé litiny. [27, 48, 49]

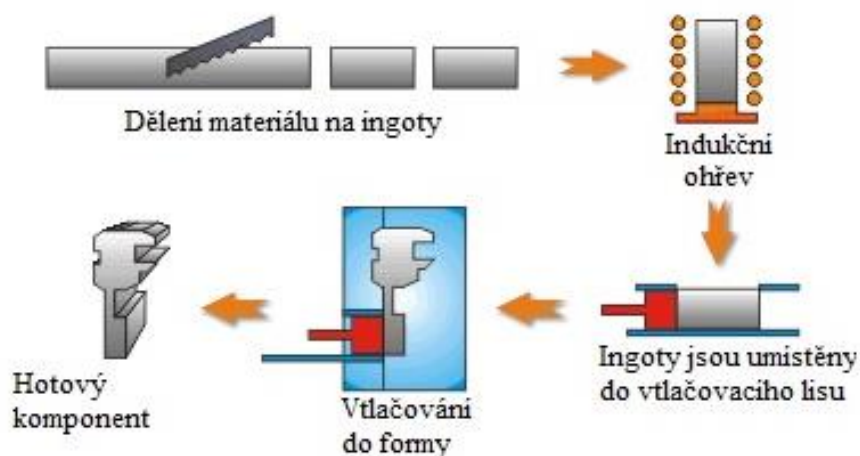


Obr. 6: Schematické znázornění gravitačního lití do trvalé formy [50]

3.2.7 Thixocasting

Thixocasting, nebo také zpracování kovů v polotuhém stavu, je způsob výroby, který se komerčně využívá posledních 15 – 20 let k výrobě tvarově přesných odlitků. Tento proces se od klasického lití odlišuje tím, že jako vstupní materiál využívá místo taveniny polotuhou suspenzi, která má vyšší viskozitu. Výchozí materiál, většinou ve formě ingotů, se přehřívá na teplotu, při které je jedna jeho část pevná a druhá kapalná. Pevná část obvykle představuje 25 – 50 % materiálu, kapalná 50 – 75 %. Takto přehřátá suspenze se při thixocastingu vysokou rychlostí (30 – 60 m/s) vtlačuje do kovové formy, kde tuhne pod zvýšeným tlakem. Celý proces výroby touto technologií je schematicky znázorněn na obr. 7. Vzhledem k vysoké viskozitě a thixotropním vlastnostem (polotekutá suspenze vykazuje jedinečný tok materiálu v rámci procesu plnění) je možné thixocastingem vyrobit i tenkostěnné odlitky, což je u jiných metod používaných v automobilovém průmyslu omezujícím faktorem. Odlévání v polotekutém stavu je jako způsob výroby výhodný hlavně díky možnosti výroby i tvarově složitých odlitků s velkou rozměrovou přesností, bez oxidace materiálu, bez smršťování a bez defektů vycházejících z pórovitosti. Výrobek má tudíž vysokou jakost a dlouhou životnost.

V porovnání s kovááním a obráběním má výrobek vyrobený thixocastingem stejné mechanické vlastnosti, ale jeho výroba je mnohem levnější. [51]



Obr. 7: Schematické znázornění thixocastingu [52]

3.3 Filtrace taveniny a její vliv na mechanické vlastnosti odlitků

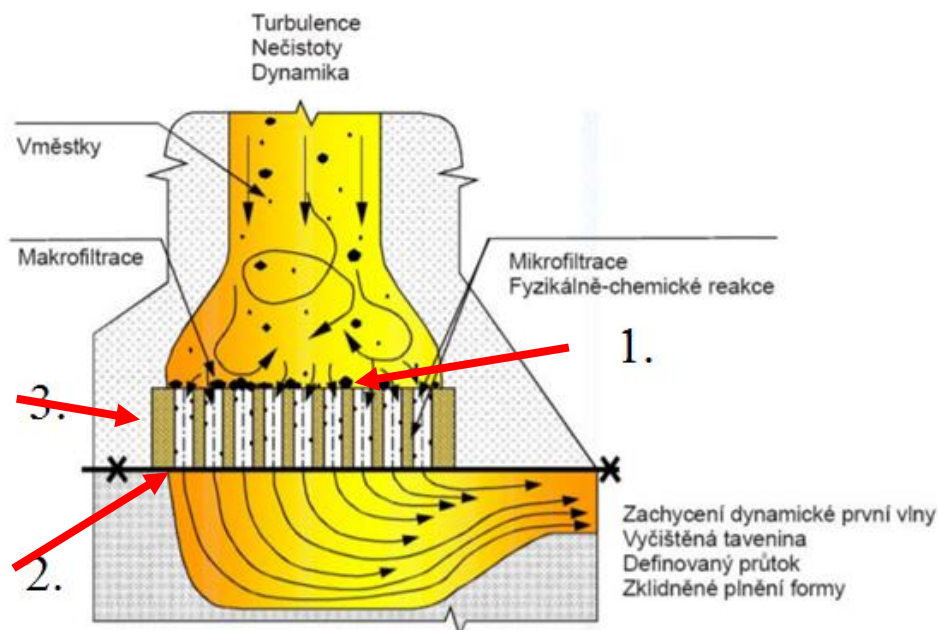
K dosažení potřebné vysoké jakosti odlitků a k odstranění vad napomáhá filtrace kovů, jejímž cílem je nejen zachycení nekovových vměstků endogenních, ale také zachycení vměstků, které vznikají důsledkem reakce hliníku s kyslíkem během lití. Nejvíce vměstků vznikajících u hliníkových slitin jsou oxidy Al_2O_3 , které jsou tvořeny především blánami a v tavenině se nacházejí v tuhém stavu. Jejich odstraňování je problematické především kvůli shodné hustotě s taveninou, takže nevyplouvají na povrch taveniny a zůstávají rozptýleny v celém objemu. Jejich odstranění funguje také jako prevence proti bublinatosti odlitků, protože vměstky jsou vhodné k nukleaci plynových bublin v tekutém kovu. [53, 54]

K filtraci se používají keramické filtry, ploché tkaninové filtry nebo kovová sítká. Filtry se mohou používat při přelévání kovu z tavící do udržovací pece, ale nejčastěji se zařazují do vtokové soustavy samotné formy. [55]

Filtrace taveniny lze dle dostupné literatury [52, 56] provádět třemi způsoby (viz obr. 8):

1. Cezení – pomocí keramického filtru se zachytávají částice, které jsou větší než velikost otvorů ve filtru,
2. Vytvoření filtračního koláče – na vnější straně filtru se zachytávají i nečistoty, které jsou menší než velikost otvorů na vstupní straně filtru,

3. Hlubková filtrace – na stěnách otvorů a kanálů se v celém objemu keramického filtru zachytávají nečistoty. Tento proces funguje na principu adheze.



Obr. 8: Schematické znázornění činnosti filtru [57]

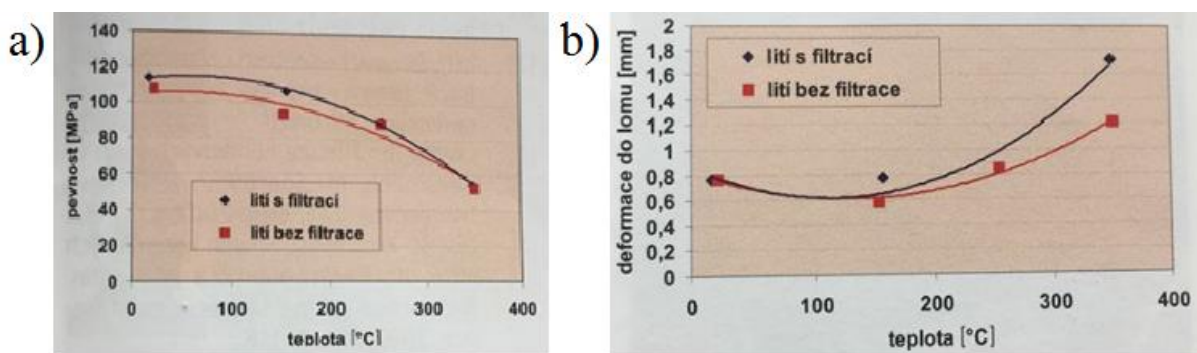
3.3.1 Vliv filtrace na mechanické vlastnosti slitiny Al-Si

Problematikou vlivu filtrace na mechanické vlastnosti hliníkových slitin se zabýval pokus provedený Petrem Lichým a Lucií Švandovou na Vysoké škole báňské – Technické univerzitě Ostravě [54]. Tento experiment se zabýval studiem vlivu filtrace na mechanické vlastnosti hliníkových slitin. Současně probíhalo sledování a vyhodnocování lomů u zkušebních vzorků. K experimentu byla vybrána slitina Al-Si, která svým složením přibližně odpovídá normalizované slitině EN AC-ALSi10Mg. Testovací slitina byla následujícího složení:

Chemické složení [hm. %]						
Al	Si	Fe	Mg	Mn	Ti	Cu
88,2	10,82	0,284	0,464	0,188	0,0094	0,0022

Tab. 2: Chemické složení použité slitiny Al-Si [54]

Lití probíhalo metodou gravitačního lití do pískové formy, vliv filtrace byl sledován na odlitcích tvaru hranolu. Hranoly byly vždy odlévány dva současně, přičemž u jednoho byl použit filtr, aby byly zajištěny stejné licí podmínky obou vzorků. Jako filtr byl použit lisovaný keramický filtr. Při vyhodnocování byly na zkušebních vzorcích provedeny tahové zkoušky při teplotách 20 °C, 150 °C, 250 °C a 350 °C, ze kterých vyplynulo, že pevnost v tahu se zvyšující se teplotou klesá pro oba testované vzorky viz obr. 9 a). Nicméně pevnost filtrované slitiny je při teplotě 20 °C vyšší o cca 7 %, při teplotě 350 °C se hodnoty pevnosti v podstatě nelišily. Při zkoumání závislosti deformace do lomu bylo zjištěno, že se deformace při teplotě 20 °C výrazně nelišily. Při teplotě 350 °C se hodnota lomové práce filtrovaného materiálu zvýšila o cca 34 % oproti materiálu nefiltrovanému, což je zřejmé z obr. 9 b).



Obr. 9: Vliv filtrace na (a) průběh pevnosti v tahu v závislosti na teplotě, (b) teplotní závislost deformace při zatížení do lomu [54]

Z experimentu [54], publikovaném ve slévárenské ročence, tedy vyplývá, že při použití filtrace pomocí keramických filtrů dochází ke zlepšení plasticity i pevnosti v tahu. Tento fakt může být způsoben morfologií vyloučeného eutektického křemíku. V případě použití filtru totiž dochází ke zjemnění částic křemíku, což má příznivý vliv na mechanické vlastnosti výrobku. [54, 58]

3.4 Vývoj a inovace licích technologií používaných v automobilovém průmyslu

Jako každé jiné průmyslové odvětví se i automobilový průmysl stále vyvíjí. Konkurence mezi jednotlivými výrobci vozidel i jejich dodavateli vede ke snaze vyrábět stále kvalitnější, a přitom levnější výrobky. To se samozřejmě týká i odlitků, a tak jsou patrné neustálé inovace dosavadních a vývoj nových licích technologií a materiálů. Následující kapitola popisuje inovativní licí technologie a progresivní materiály na odlitky na konkrétních aplikacích v procesu výroby automobilu.

3.4.1 Výroba pístních kroužků

Tradiční výroba

Pístní kroužky jsou jedním z dílů, které se běžně vyrábí metodou lití do pískových forem. Formování pro větší efektivitu probíhá na poloautomatických strojích. Pískové formy jsou na sebe naskládány do několika vrstev – sloupců, proto se také můžeme setkat s termínem stromečkové lití. Na obr. 10 je vidět odlitek pístních kroužků při vytahování z pískové formy. Na jedno odlití se tedy běžně vyrobí až 48 pístních kroužků.

Výchozí materiály pro výrobu pístních a těsnících kroužků jsou materiály dle ČSN ISO 6621-3 třída 10, 20 a 50, 60. Podle normy to tedy jsou pro třídu 10 šedá litina bez tepelného zpracování, pro třídu 20 šedá litina tepelně zpracovaná, pro třídu 50 tvárná litina a pro třídu 60 ocel. Po odlití a dvojitém tvarovém soustružení jsou kroužky dále povrchově upravovány. Povrchové úpravy jsou oblastí stále nabývající na významu. Mimo standardně používané metody tvrdochromování se stále více používají jeho modifikované verze. Mezi ty patří chrom-keramika (BCr), tedy vytvoření kanálek sycených tvrdými částicemi pro zvýšení životnosti a chrom-diamant (BDG). Další metody povrchových úprav jsou například nástříky molybdenem či nitridace. [60, 61]



Obr. 10: Stromečkové uspořádání odlitku pístních kroužků při vytahování z pískové formy

[59]

Inovativní SMCS metoda

Uspořádání forem nad sebou ve vrstvách při lití do pískových forem však může narušit konstrukci vtoků, protože se tlak a průtok v různých úrovních mění. Toto rozložení navíc snižuje rozsah dostupných možností konstrukce písních kroužků. Proto se při návrhu konstrukce lící soustavy používají simulace, které předpovídají chování taveniny v průběhu lití. Při běžných simulacích metodou konečných prvků (MKP) se numerickými metodami simuluje průběh proudění tepla a taveniny. Avšak nevýhodou běžně používané MKP je to, že jde stále pouze o simulaci, a tak velice záleží na tom, jak jsou vybrány a nastaveny simulační parametry. Kvůli těmto limitacím byla vytvořena nová lící metoda, která vylepšuje tok taveniny tím, že umožňuje přivádění taveniny po celém obvodu odlitku, což zlepšuje jednotnost grafitu v šedé litině. Tato nová metoda, nazvaná Slow-Motion Casting Simulation (SMCS) poskytuje podrobnější analýzu plnění formy, která umožňuje přesnější optimalizaci vtokového systému a zlepšuje sledování toku taveniny při různých lících rychlostech a teplotách. To vede i k lepšímu porozumění a kontrole kolísání tlaku a expanzí plynů při odlévání. SMCS tedy pomáhá slévači vytvořit vylepšený odlitek. [62]

Optimalizovaný lící proces také nabídl možnost postupně vyvinout sofistikovanější materiál. Pevnost tradičně používané martenzitické šedé litiny s kuličkovým grafitem pro kroužky vznětových motorů je až 1200 MPa. Nový materiál GOE70, vyvinutý společností Federal - Mogul Corporation, se vyznačuje martenzitickou strukturou matrice s vloženými karbidy chromu a pevností okolo 1800 MPa. Dalšími povrchovými úpravami, v tomto případě nitrací, lze zvýšit tvrdost až na 1300 HV (oproti tvrdosti šedé litiny s kuličkovým grafitem 400 HV). Písní kroužky vyrobené z GOE70 byly podrobeny testům životnosti na výkonných vznětových motorech a ukázaly výjimečně nízké opotřebení na lícové straně a vysokou odolnost, což vedlo ke snížení emisí výfukových plynů a snížení spotřeby oleje. Sériová výroba kroužků vyrobených z GOE70 začala v roce 2012, s první aplikací ve vysoce zatěžovaných diesellových motorech splňujících normu EURO 6. [61, 62]

3.4.2 Výroba “A“ sloupku funkčního konceptu automobilu Volvo

V roce 2001 na Detroitském autosalonu představila společnost Volvo nové vozidlo pojmenované ‘Safety Concept Car‘ (SCC). Zajímavostí tohoto funkčního vozidla byl mimo jiné i design A-sloupku, který se vyznačoval křížovým vyplněným skleněnými panely pro zvýšení rozhledu posádky automobilu. Běžně se v praxi A-sloupky vyrábí lisováním z plechu, nicméně v tomto případě, kvůli neobvyklému designu a konstrukci, nebyla tato metoda výroby možná.

Nastaly tedy dvě možnosti výroby. První možnost byla obrobení ocelového či hliníkového bloku. Společnost Volvo je však členem De Monfortského Univerzitního Rapid Manufacturing Consortium (RMC), která navrhla alternativní možnost výroby – litím. Ideální cesta podle RMC byla výroba stereolithografických modelů metodou QuickCastTM, a poté využití těchto modelů k odlití finálního výrobku metodou lití do ztracené formy. Komponenty by poté mohly být vyrobeny z materiálu dle výběru společnosti Volvo. [63, 64]

Stereolithografie (SL) je proces vytváření trojrozměrných objektů z epoxidové pryskyřice, která je vytvrzována pomocí laseru. Laser selektivně ozařuje a zpevňuje tekutý polymer v postupných vrstvách. Deska, na které se postupně vytváří objekt, je po zpevnění každé vrstvy posunuta právě o tloušťku nové vrstvy (0,05 - 0,15 mm), aby se celý proces mohl opakovat a dal tak vzniknout novému objektu. Po dokončení vytvrzování pryskyřice se nově vytvořený objekt vyjme, mechanicky začistí a vloží do ultrafialové pece, kde se vytvrdí případné zbytky tekuté pryskyřice. [64]

Metoda QuickCastTM byla vyvinuta tak, aby stereolithografické díly mohly být vyrobeny jako modely k metodě lití do ztracené formy. Tyto modely se při jejich vypalování zhroutnou do sebe a redukují tak případné praskání keramické formy způsobené tepelně vyvolaným pnutím z rozšiřujícího se modelu. [63, 64]

Projekt výroby A-sloupku litím byl následně rozdělen do několika fází - od přezkoumání CAD souboru s vymodelovaným A-sloupkem k potvrzení, že byla zvolena správná výrobní metoda. Samozřejmostí bylo testování modelů součástí, a po jeho výrobě i testování samotného výrobku. Na výrobu testovacího odlitku byla vybrána hliníková slitina LM25TF (AlSi7Mg0.5). Po prozkoumání tohoto testovacího odlitku Volvo potvrdilo, že s porovnáním s dalšími metodami výroby, včetně frézování, byla metoda lití do ztracené formy s použitím stereolithografického modelu QuickCastTM tou nejlepší možností. Dalším rozhodnutím bylo k výrobě finálního A-sloupku vybráno použití oceli – slitiny ANC3B s obsahem 8 % Ni. [63, 64]

V konečném porovnání metody výroby finálního A-sloupku vyrobeného odlitím z oceli ANC3B společnost Volvo potvrdila, že tato metoda byla tou nejlepší volbou. Výsledný odlitek byl navíc po odlití tepelně upraven pro snížení vnitřního pnutí. [63, 64]

Tab. 3 zobrazuje čas a finance potřebné k výrobě A-sloupků. V porovnání s frézováním vychází výroba litím velmi podobně, co se týče ceny a času potřebného k výrobě, nicméně vzhledem ke

složitému tvaru a napětím, která by ve výrobku vznikla při obrábění, se jako vhodnější varianta jeví právě lití.

Proces	Čas (v týdnech)	Cena za první A-sloupek SEK (Kč)	Cena za druhý A-sloupek SEK (Kč)
Výroba modelu	1	39 000 (173 940)	42 000 (187 320)
Forma a lití	4	56 000 (249 760)	56 000 (249 760)
Tepelná úprava (stabilizace)	½	20 000 (89 200)	20 000 (89 200)
Frézování ploch a děr	1	60 000 (267 600)	60 000 (267 600)
Celkem	6 ½	175 000 (780 050)	178 000 (793 880)

Tab. 3: Čas a finance potřebné k výrobě sloupků. [64]

Celý proces výroby od CAD souboru k dokončené vyrobené součásti trval celkem 45 dní, což bylo v porovnání s frézováním v dané době srovnatelné. Náklady byly taktéž srovnatelné. Hlavním důvodem pro zvolení metody výroby modelu pomocí stereolithografie a následnému lití do ztracené formy bylo to, že tento způsob výroby zajišťoval menší napětí ve finálním výrobku. [64, 65]

3.4.3 Simulace procesu výroby lopatky turbíny turbodmychadla metodou thixocastingu

Současná výroba lopatky turbíny turbodmychadla

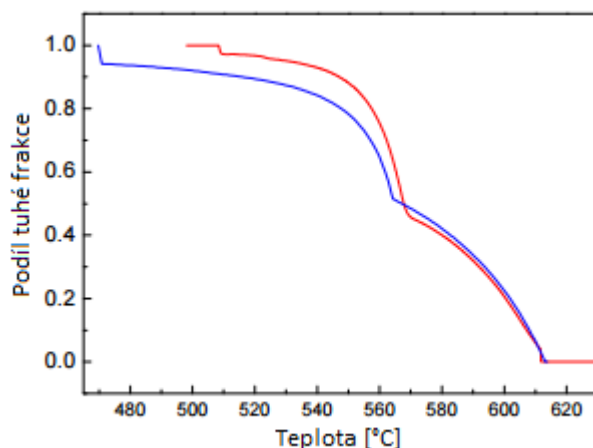
V současné době se lopatky turbín turbodmychadel vyrábějí dvěma způsoby: anti-gravitačním litím a kovááním. Anti-gravitační lití je široce využíváno pro své nízké finanční nároky, avšak nemůže být využíváno při dodávání na trh s velkými požadavky na množství, například pro automobilový průmysl, neboť výkony nejsou pro toto odvětví dostačující. Výroba kovááním může připravit lopatky turbín turbodmychadel i pro automobilový trh, ale dlouhá doba zpracování a vyšší náklady omezují i tento způsob výroby. Zpracování v polotuhém stavu je považováno za ideální vzhledem k možnosti vyrobit vysoce kvalitní výrobek s kompaktní konstrukcí, vysokou mechanickou kvalitou a zároveň s nízkými náklady. [66, 67]

Inovativní metoda výroby lopatky turbíny turbodmychadla – numerická simulace a thixocasting

Numerické simulace mají u thixocastingu velký význam pro pochopení regulace průtoku polotuhé suspenze, optimalizaci parametrů procesu, zlepšení konstrukce a zvýšení produkce.

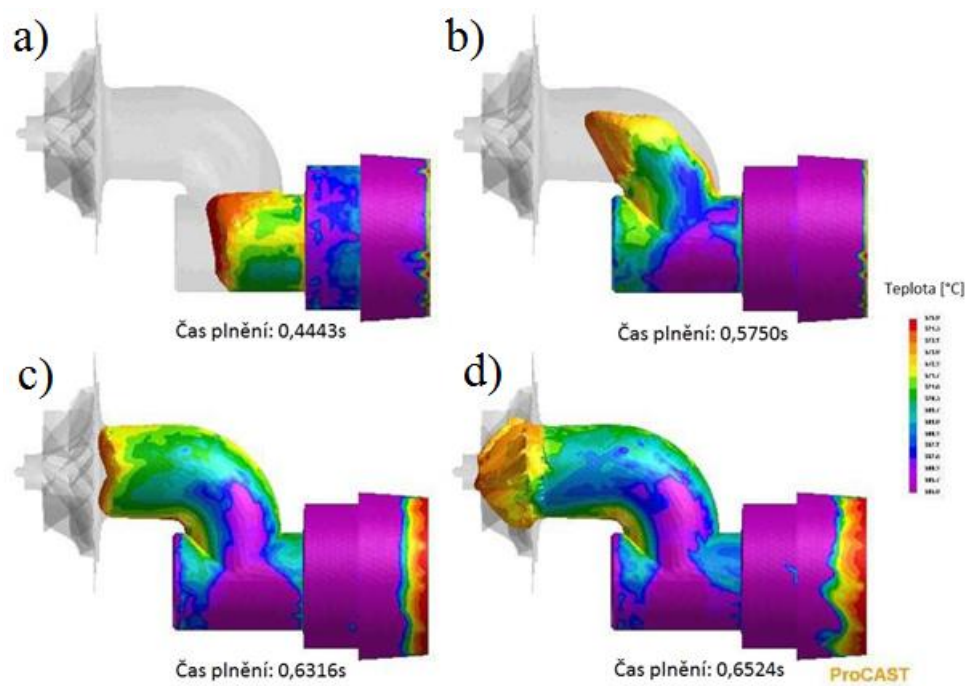
V dnešní době lze proudění modelovat pomocí vhodného softwaru, například programu ProCast.

Při polotuhém odlévání lopatky turbíny se využívá hliníková slitina 319, která obsahuje 50 % [68] tekuté složky. V grafu na obr. 11 je znázorněna závislost podílu tuhé frakce na teplotě suspenze. Ta je vypočtena dvěma následujícími způsoby: metodou skenovacího kalorimetru (červená křivka) a termodynamickým výpočtem dle Scheila (modrá křivka).



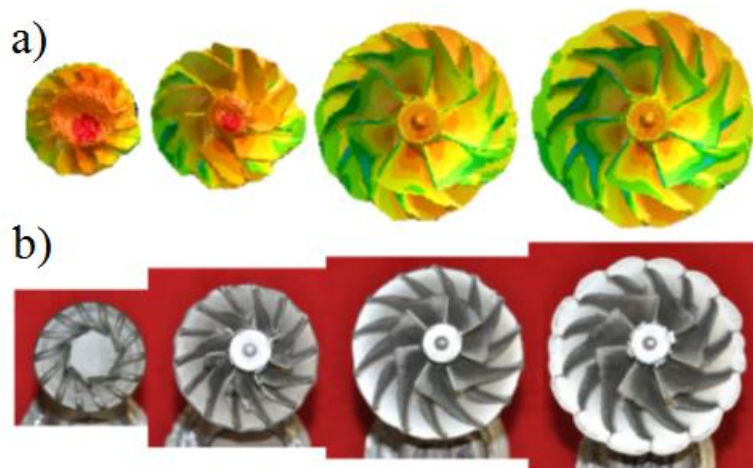
Obr. 11: Závislost podílu tuhé frakce na teplotě suspenze [68]

Pomocí programu ProCast byla panem Fan Zhangem [68] vytvořena simulace demonstrující plnění formy polotuhou suspenzí. Teplota je v této simulaci barevně odlišena. V první fázi - obr. 8 a) polotuhá suspenze proudí do nálitku laminárně bez stříkání a šplouchání. Forma je vyplňována postupně z pístu, což zajišťuje bezproblémový odvod plynu a účinně se tak zabraňuje defektům způsobeným právě zachycením plynových bublin. Z obr. 12 je patrné postupné snižování plochy průřezu směrem k výrobku, což zabraňuje stranám suspenze, které obsahují oxidy, dalšímu pohybu směrem k výrobku. Ve stejné chvíli, kdy se směr proudění mění z horizontálního na vertikální - obr. 12 b), se horní část suspenze obsahující oxidy, oddělí od čela proudu, což zabrání veškerým oxidům dostat se do finálního odlitku. Všechny oxidy se tedy zachytí v nálitku nebo vtokové soustavě, čímž se zabrání případným defektům. [68]



Obr. 12: Postup plnění formy [68]

Na obr. 13 je porovnání simulace plnicího procesu (a) s výsledky samotného lití (b). Plnicí proces pro všech 14 lopatek turbodmychadlové turbíny je synchronní, což zajišťuje konzistentnost a stejné mechanické vlastnosti v každé lopatce. Výsledky simulace by měly být vyhodnoceny před samotným litím k analýze možných defektů. Z porovnání je zřejmé, že simulace lití velmi dobře popisuje, jak bude lití probíhat reálně. [68]

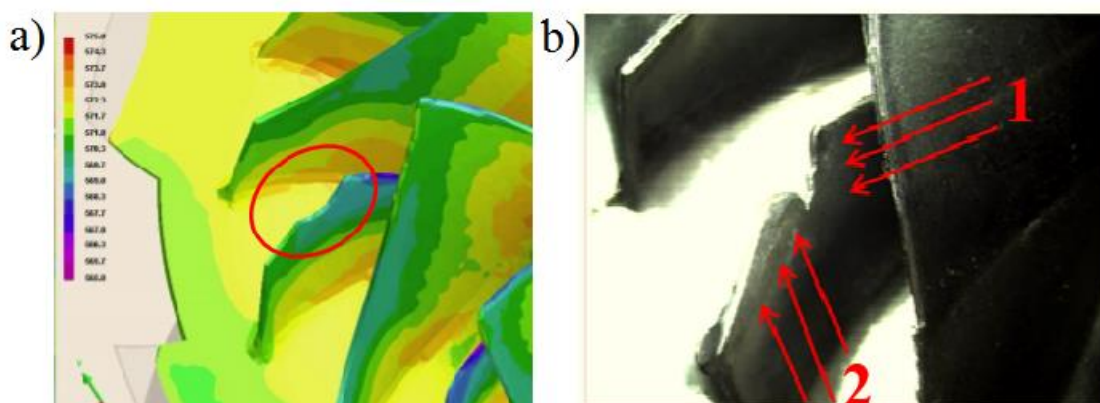


Obr. 13: Detail procesu plnění lopatky turbíny během procesu thixocastingu

(a) výsledek simulace, (b) skutečný výsledek [68]

3.4.3.1 Vady odlitků litých metodou thixocasting

Výsledky simulace mohou předvídat i vady, jako například nezaběhnutí, která se občas objevují na hranách lopatek, což je patrné z obr. 14. Je známo, že k nezaběhnutí často dochází při finálním vyplňování dutin formy. Tento výsledek simulace – obr. 14 a) je shodný s reálnou polohou nezaběhnutí na obr. 14 b). Na počátku plnění malé lopatky polotuhá suspenze teče zprava doleva (znázorněné šipkou 1) a zastaví se, když jsou vyplněny 2/3 objemu lopatky. Následně začne polotuhá suspenze proudit odspoda nahoru (znázorněné šipkou 2) a vyplňuje zbytek prostoru. Nezaběhnutí se objeví, když je rychlost plnění polotuhou suspenzí příliš nízká nebo je příliš nízká teplota formy či suspenze, nebo je ucpaný odvodušňovací ventil. Výsledky simulací velice přesně předpovídají umístění nezaběhnutí, a tak odrážejí proces formování. Ve výsledku tak dobře odpovídají skutečnému průběhu plnění. [68]



Obr. 14: Nezaběhnutí (a) ve výsledku simulace, (b) reálného odlitku [68]

4 Závěr

Mnoho dílů automobilu, včetně jeho hlavní součásti – bloku spalovacího motoru - je vyrobeno odlitím taveniny do formy. Technologie lití svou schopností vyrábět velmi kvalitní výrobky z materiálů s rozdílnými mechanickými a fyzikálními vlastnostmi, s relativně nízkými náklady, velmi dobře konkuruje jiným technologickým způsobům výroby automobilových součástí. Některé díly je navíc nemožné vyrobit jinou strojírenskou technologií v takovém množství, kvalitě a hlavně ceně, kterou vyžaduje automobilový trh. Technologie lití proto zaujímá ve výrobním procesu automobilu nezastupitelnou pozici.

V práci je vypracováno shrnutí materiálu používaných na odlitky v automobilovém průmyslu. Bylo zjištěno, že budoucnost mají hlavně lehké slitiny neželezných kovů – hliníku a hořčíku, a to především z důvodu redukce jednotlivých dílů a v důsledku toho i celého automobilu, což vede ke snížení spotřeby paliva, a tudíž i snížení emisí výfukových plynů. Na druhou stranu nelze opomíjet ani litinu, především temperovanou, která na trhu odlitků zaujímá specifickou pozici díky poměru svých mechanických vlastností a ceny. Rešerší bylo zjištěno, že pozornost výrobců odlitků a automobilů není zaměřena jen na snižování nákladů na výrobu a hmotnosti automobilů, ale samozřejmě také na bezpečnost. Proto nelze obecně říci, že trendem je používání pouze lehkých slitin, které svými pevnostními vlastnostmi zaostávají za jinými, vesměs dříve používanými materiály, které si tak stále drží svoji pozici při výrobě odlitků.

Analýza vedla ke srovnání licích technologií používaných v automobilovém průmyslu. Každý výrobce automobilů používá pro výrobu odlitků různých dílů odlišné licí technologie. Bylo zjištěno, že technologie lití do pískových forem a technologie tlakového lití do kovových forem zaujímají výhradní místo při výrobě automobilových součástí. Je však na místě doplnit důležitý poznatek, že určité díly motoru, jako například výfukové ventily, pístní kroužky či turbíny turbodmychadel vyžadují použití specifických materiálů a technologie používané k jejich výrobě jsou těžko nahraditelné.

Klíčovým závěrem z hlediska vývoje technologie lití je fakt, že ústřední roli v návrhu licích technologií hraje čím dál více počítačová simulace průběhu lití. Tou je možné navrhnout optimální parametry licího procesu i předvídat případné vady odlitků, což výrazně snižuje náklady spojené se zaváděním výroby nových odlitků a jejich testování.

5 Seznam použité literatury

- [1] HLUCHÝ, Miroslav, KOLOUCH, Jan. Strojírenská technologie: Nauka o materiálu. Praha: Scientia, 2002. 266 s.
- [2] Miller W.S. , Zhuang L. , Bottema J., Wittebrood A. J., De Smet P. , Haszler A., Vieregge A., Recent development in aluminium alloys for the automotive industry. Materials Science and Engineering A280, 2000, s. 37–49.
- [3] MICHNA, Š., LUKÁČ, I., OTČENÁŠEK, V., KOŘENÝ, R., DRÁPALA, J., SCHNEIDER, H., MIŠKUFOVÁ, A., A KOLEKTIV, Encyklopedie hliníku. Nakladatelství Adin, Prešov, 2005, 700 s. ISBN 80-89041-88-4
- [4] NĚMEC, M., PROVAZNÍK, J. Slévárenské slitiny neželezných kovů. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2008. 137 s. ISBN 978-80-01-04116-1
- [5] ROUČKA, Jaromír. Metalurgie neželezných slitin. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2790-6
- [6] H. LAKSHMI, M.C. VINAY KUMAR, RAGHUNATH, P. KUMAR, V. RAMANARAYANAN, K.S.S. MURTHY, P. DUTTA, Induction reheating of A356.2 aluminum alloy and thixocasting as automobile component, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 20, 2010, s. 961-967, ISSN 1003-6326, online dostupné z <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1003632610606140>>
- [7] Hadleigh Castings, Aluminium casting alloy A356.0, online dostupné z <<http://www.hadleighcastings.com/uploads/A356.0%20Alloy%20Detail.pdf>>
- [8] Chang-Yeol Jeong, High Temperature Mechanical Properties of AlSiMg(Cu) Alloys for Automotive Cylinder Heads, Materials Transactions, Vol. 54, No. 4, s. 588 to 594. The Japan Institute of Metals, 2013, online dostupné z <<https://www.jim.or.jp/journal/e/pdf3/54/04/588.pdf>>
- [9] NĚMEC, Milan, Bohumír BEDNÁŘ a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. Teorie slévání. Praha: České vysoké učení technické, 2009, 217 s. ISBN 978-80-01-04395-0
- [10] ROUČKA, Jaromír. Metalurgie litin. Skripta, 62 s.
- [11] Elaheh Ghassemieh. Materials in Automotive Application, State of the Art and Prospects, New Trends and Developments in Automotive Industry, Prof. Marcello Chiaberge (Ed.), InTech, 2011, ISBN: 978-953-307-999-8, online dostupné z <<http://www.intechopen.com/books/new-trends-and-developments-in-automotive-industry/materials-in-automotive-application-state-of-the-art-and-prospects>>

- [12] ŠENBERGER, J.; BŮŽEK, Z.; ZÁDĚRA, A.; STRÁNSKÝ, K.; KAFKA, V.: Metalurgie oceli na odlitky, Filtrace tavenin železa v průmyslové praxi, s. 1-311, Vysoké učení technické v Brně - Nakladatelství Vutium, 2008, ISBN 978-80-214-3632-9
- [13] STACHOVEC, I. Výroba ADI litin. Brno: Vysoké učení technické. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, 2008. 9-12 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jaroslav Šenberger, CSc
- [14] Slévárenství.cz – Vermikulární litina. Online dostupné z: <<http://www.slevarenstvi.cz/text/A13%20Vermikul%C3%A1rn%C3%AD%20litina.doc>>
- [15] PODRÁBSKÝ, Tomáš; POSPÍŠILOVÁ, Simona. Struktura a vlastnosti grafitických litin. VUT, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství, 2006-11-16 online dostupné z <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/savgl/index.php?chapter=1>>
- [16] GEDEONOVÁ, Z., JELČ, I. Metalurgia liatin. 2. vyd. Košice: 2000, s. 5-261.; ISBN 80-7099-616-5
- [17] SEATON, B. Philip.; Dr. Xiao-Ming Li. An ADI alternative for a heavy duty truck lower control arm. 2002. [cit. 2016-12-21], online dostupné z: <<http://www.ductile.org/magazine/2005%20Issue%203.pdf>>
- [18] ČÍŽEK, L., KOŘENÝ, R., HERNAS, A., JUŘIČKA, I., LASEK, S.: Možnosti využití odlitků z hořčíkových slitin v automobilovém průmyslu. Časopis METAL, 2002
- [19] ASM Specialty Handbook - Magnesium and Magnesium Alloys, ed. Avedesian, M.M., Baker, H., ASM International, USA, 1999, s. 3-84.
- [20] MAGNESIUM ONLINE RESOURCE CENTER. Magnesium in automotive, online dostupné z <<http://www.mg12.info/metallurgy/magnesium-applications/magnesium-in-automotive.html>>
- [21] BOUCNÍK, P., ČECH, J., JUŘIČKA, I.: Použití hořčíkových slitin ve slévárenství. 5. Medzinárodná vedecká konferencia, 1997, CO-MAT-TECH, Trnava.
- [22] B.R. Powell, P.E. Krajewski and A.A. Luo, 4 - Magnesium alloys for lightweight powertrains and automotive structures, In Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, edited by P.K. Mallick, Woodhead Publishing, 2010, s. 114-173, Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles, ISBN 9781845694630
- [23] Technical datasheet: Titanium Alloy Ti 6Al-4V. 2000 [cit. 2016-12-21], online dostupné z <<http://cartech.ides.com/datasheet.aspx?i=101&E=269>>

- [24] Titanium Alloys - Ti6Al4V Grade 5. 2002 [cit. 2016-12-21], online dostupné z <<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1547>>
- [25] LORIA, Edward A. Quo vadis gamma titanium aluminide. *Intermetallics*. 2001, vol. 9, is. 12, s. 997-1001. ISSN: 0966-9795
- [26] TETSUI, Toshimitsu. Development of a TiAl turbocharger for passenger vehicles. *Materials Science and Engineering: A*. 2002, vol. 329-331, no. 1, s. 582-588. ISSN: 0921-5093
- [27] European Aluminium Association. THE ALUMINIUM AUTOMOTIVE MANUAL, 2011 [cit. 2017-01-12], online dostupné z <<http://www.european-aluminium.eu/media/1573/aam-applications-power-train-2-engine-blocks.pdf>>
- [28] ABB Robotics. BMW Case study: Foundry/Precision casting. 2006 [cit. 2017-01-15], online dostupné z <https://library.e.abb.com/public/f934aae1deaeb40ec12577c7002f5f01/bmw_casestudy_en_print.pdf>
- [29] Hieu Nguyen. Manufacturing Processes and Engineering Materials Used in Automotive Engine Blocks. School of Engineering Grand Valley State University. 2005 [cit. 2017-01-15], online dostupné z <<https://pdfs.semanticscholar.org/1f47/7553f4722262a5989bfac00be8dbe805192e.pdf>>
- [30] 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, s. 755 – 767
- [31] VAŇKOVÁ, B.: Návrh řešení ke zvýšení tvrdosti odlitku bloku motoru. Diplomová práce v oboru „strojírenská technologie“. Vedoucí práce Ing. Petr Zikmund. Brno: VUT-FS, Ústav strojírenské technologie. 2015.
- [32] STREET, A. Ch. The Diecasting book. Redhill: Portcullis Press, 1986, 786 p. ISBN 09-019-9498-7
- [33] KOŘENÝ, R., GRÍGEROVÁ, T. Zliévarenstvo neželezných kovov. Bratislava: ALFA, 1988
- [34] 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, s. 25 - 33.

- [35] RAGAN, E. a kolektív. Liatie kovov pod tlakom. Prešov: Fakulta výrobných technológií Technickej univerzity, 2007, 383 s., ISBN 978-808-0739-799
- [36] Advanced casting technologies for lightweight automotive applications. China Foundry. 2010, (4), s. 463-469, ISSN 16726421. [cit. 2017-02-22], online dostupné z <<http://www.foundryworld.com/uploadfile/201012338775429.pdf>>
- [37] SLOVÁK, Stanislav; RUSÍN, Karel. Teorie slévání. Brno: Nakladatelství technické literatury, n. p., 1990.
- [38] SWEB.CZ, Lití slévárenských slitin. 2014. [cit. 2017-01-23], online dostupné z <volny.a2.sweb.cz/u%C4%8Divo/Druhy%20lit%C3%AD%20str.%2042-47.doc>
- [39] WEI, Sufei. ASM Handbook: Casting. Centrifugal casting. Roč. 2008, č. 15, s. 667-673 [cit. 2017-01-23], online dostupné z <<http://cctm-usa.com/news/Centrifugal%20Casting%20by%20Sufei%20Wei.pdf>>
- [40] P.X. Fu, X.H. Kang, Y.C. Ma, K. Liu, D.Z. Li, Y.Y. Li, Centrifugal casting of TiAl exhaust valves, Intermetallics, Vol. 16, Issue 2, 02/2008, s. 130-138, ISSN 0966-9795
- [41] Wu Xinhua, Review of alloy and process development of TiAl alloys, Intermetallics, 14 (2006), s. 1114–1122.
- [42] Klaus Gebauer, Performance, tolerance and cost of TiAl passenger car valves. Intermetallics, 14 (2006), s. 355–360.
- [43] K. Liu, Y.C. Ma, M. Gao, G.B. Rao, Y.Y. Li, K. Wei, Xinhua Wu, M.H. Loretto, Single step centrifugal casting TiAl automotive valves, Intermetallics, Vol. 13, Issue 9, 09/2005, s. 925-928, ISSN 0966-9795
- [44] Fan Zitian Jiang Wenming Liu Fuchu Xiao Botao. Status quo and development trend of lost foam casting technology. 2014. Vol. 11, no. 4, s. 296-307. ISSN 1672-6421, [cit. 2017-01-23], online dostupné z <<http://www.foundryworld.com/uploadfile/2014090239235829.pdf>>
- [45] Debruin, M., & Jordan, S. The case for steel lost foam casting. 2016. Modern Casting, 106(10), s. 38-41.
- [46] Engine blocks produced by FATA Aluminum, [cit. 2017-01-25], online dostupné z <<http://fataaluminum.com/sample-page/products/lost-foam-casting/>>
- [47] Zdzisław Żółkiewicz, Marek Żółkiewicz. LOST FOAM PROCESS – THE CHANCE FOR INDUSTRY. TEKA Kom. Mot. Energ. Roln. – OL PAN, 2009, 9, s. 431–436.
- [48] LI, Faguo et al. Mechanism of Filling and Feeding of Thin-Walled Structures during Gravity Casting. Materials. 2015. Vol. 8, no. 6, s. 3701-3713.
- [49] <http://www.investacast.com/outsourcing/gravity-die-casting> [cit. 2017-03-01]

- [50] <http://pimg.tradeindia.com/01817246/b/1/Gravity-Die-Castings.jpg> [cit. 2017-03-01]
- [51] HRSG. GERHARD HIRT a HRSG. REINER KOPP. Thixoforming: Semi-solid Materials Processing. Weinheim, Bergstr: WILEY-VCH, 474 s., 2009. ISBN 9783527322046
- [52] http://www.azom.com/work/nYikvYa2TZ1lqZ22O99L_files/image002.gif [cit. 2017-03-03]
- [53] ROUČKA, J. a kol.: Příručka o filtraci. Brno: ČSS, 2007
- [54] LICHÝ PETR, ŠVANDOVÁ LUCIE: Vliv filtrace taveniny na mechanické vlastnosti odlitků ze slitin hliníku, VŠB – TU Ostrava, slévárenská ročenka
- [55] MAKALOUŠ, J. Vliv filtrů na plnění formy při odlévání slitin hliníku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 69 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.
- [56] ANDREWS, I.A. and MATTHEWS A.L.: Molten metal filtration, An Engineered Balance. Saint-Gobain Ceramics & Plastics, Inc. [cit. 2016-12-11], online dostupné z <<http://foundry.saint-gobain.com/media/documents/S00000000000000001039/Engineered%20Balance.pdf>>
- [57] http://www.keramtech.cz/knihovna/filtrace_tavenin_pomoci_lisovanych_keramickych_filtru.pdf [cit. 2016-12-11]
- [58] BRŮNA, M.; BOLIBRUCHOVÁ, D.; KANTORÍK, R.: Filtration of aluminium alloys and its influence on mechanical properties and shape of eutectical silicium. Archives of Foundry Engineering, 2008, č. 2, s. 13-16.
- [59] Video z <<https://www.youtube.com/watch?v=hL9zw0Ihiro>> [cit. 2017-01-24] Buzuluk a.s.
- [60] HRABÁK, V. a kol. Pistní kroužky: Konstrukce, výroba, provoz. Buzuluk Komárov, a.s., Charlie Hořovice, 2000.
- [61] Norma ČSN ISO 6621 - 3, třída 10, 20, 50, 60
- [62] Piston ring casting process lowers friction, increases durability. Modern Casting, 2014, vol. 104, no. 4, s. 45. ISSN 00267562
- [63] Volvo Safety Concept Car makes driving safer, Press release, 2001 [cit. 2016-12-28], online dostupné z <<https://www.media.volvocars.com/uk/en-gb/media/pressreleases/5269>>
- [64] TROMANS, G. Developments in rapid casting. Bury St Edmunds, Suffolk, U.K.: Professional Engineering Pub, 2003. ISBN 9781860583902
- [65] <http://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matid=10261>

- [66] Q. Zhu, S.P. Midson, Semi-solid moulding: Competition to cast and machine from forging in making automotive complex components, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* 20 (2010), s. 1042 - 1047.
- [67] G. Wallace, A.P. Jackson, S.P. Midson, et al. High-quality aluminum turbocharger impellers produced by thixocasting, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* 20 (2010), s. 1786 - 1791.
- [68] ZHANG, Fan, et al. Simulation on the thixocasting process of the turbocharger impellers and selection of the viscosity models. In: *Solid State Phenomena.* Trans Tech Publications, 2015. s. 219 - 224.