

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ

A METROLOGIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Moderní trendy v oblasti tlakového lití se zaměřením na aditivní
výrobu

| | |
|-------------------|---|
| AUTOR: | Matěj Novotný |
| VEDOUCÍ PRÁCE: | Ing. Vladislav Andronov |
| STUDIJNÍ PROGRAM: | B2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství |

PRAHA 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Novotný** Jméno: **Matěj** Osobní číslo: **492648**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Moderní trendy v oblasti tlakového lití se zaměřením na aditivní výrobu

Název bakalářské práce anglicky:

Modern trends in high pressure die casting with a focus on additive manufacturing

Pokyny pro vypracování:

1. Úvod do problematiky tlakového lití a aditivní výroby
2. Rešerše moderních trendů v oblasti tlakového lití
3. Návrh metodiky testování a provedení experimentu
4. Shrnutí výsledků a závěrečné vyhodnocení

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Vladislav Andronov ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **15.03.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Vladislav Andronov
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně. Dále prohlašuji, že jsem všechny použité zdroje citoval správně, úplně a uvádím je v příloženém seznamu použité literatury.

Nemám závažný důvod proti zpřístupnění této závěrečné práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

V Praze dne:

Podpis:

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá rešerší moderních trendů ve vysokotlakém lití (High Pressure Die Casting) a nástrojových materiálů využívaných v aditivní výrobě pro kovový 3D tisk. V teoretické části práce je popsána technologie vysokotlakého lití, princip technologie i konstrukce licí formy. Dále je v této části popsána technologie 3D tisku kovů a podrobněji je představena technologie Direct Metal Laser Sintering, která je především využívána pro výrobu částí forem na vysokotlaké lití. V poslední části rešerše jsou popsány moderní trendy, které propojují vysokotlaké lití a aditivní výrobu. V moderních trendech tlakového lití je popsáno využití aditivní výroby, včetně nástrojových materiálů, jejichž využití aditivní výroba nabízí, dále je zde uvedeno využívání strukturálních dílů a technologie semi-solid metal casting. Praktická část práce se zabývá zkoumáním mechanických vlastností materiálu Böhler W360, který byl vyroben konvenční cestou a materiálem L-40, který byl vyroben z prášku technologií kovového 3D tisku. Následuje porovnání naměřených hodnot s hodnotami získanými během rešeršní části. V závěru praktické části je proveden souhrnný přehled informací získaných o nástrojových materiálech z rešeršní a praktické části. Tento výsledný přehled, může přinést povědomí o nových, doposud nezavedených, materiálech, které lze v rámci aditivní výroby využívat pro výroby nástrojů, včetně částí forem na vysokotlaké lití.

Klíčová slova

Aditivní výroba, 3D tisk, HPDC, DMLS, L-40

Abstract

This bachelor thesis deals with the research of modern trends in High Pressure Die Casting and tooling materials used in additive manufacturing for metal 3D printing. The theoretical part of the thesis describes the technology of high pressure die casting, the principle of the technology and the design of the casting mould. Furthermore, this part describes the technology of metal 3D printing and presents in detail the Direct Metal Laser Sintering technology, which is mainly used for the production of parts of moulds for high pressure die casting. In the last part of the research, modern trends that link high pressure die casting and additive manufacturing are described. Modern trends in die casting describe the use of additive manufacturing, including the tooling materials that additive manufacturing offers, and the use of structural parts and semi-solid metal casting technology. The practical part of the thesis deals with the investigation of the mechanical properties of Böhler W360 material, which was produced by conventional means, and L-40 material, which was produced from powder by metal 3D printing technology. This is followed by a comparison of the measured values with the values obtained during the research part. At the end of the practical part, a summary of the information obtained about the tool materials from the research and practical part is made. This resulting overview, may provide an awareness of new, previously unintroduced, materials that can be used in additive manufacturing for tool making, including parts of high pressure die casting moulds.

Keywords

Additive manufacturing, 3D printing, HPDC, DMLS, L-40

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Vladislavu Andronovovi, vedoucímu bakalářské práce, za jeho ochotu, čas a odborné rady, které byly poskytnuté při psaní bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Vítovi Novákovi za pomoc a praktické rady při realizaci mechanických zkoušek pro praktickou část.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| Úvod | 9 |
| 1 Vysokotlaké lití – High Pressure Die Casting | 10 |
| 1.1 Princip technologie HPDC | 11 |
| 1.2 Výhody a nevýhody HPDC | 12 |
| 1.3 Rozdělení HPDC dle typu stroje | 13 |
| 1.3.1 Stroje s teplou licí komorou..... | 13 |
| 1.3.2 Stroje se studenou licí komorou | 14 |
| 1.4 Formy pro HPDC | 15 |
| 1.4.1 Konstrukce formy pro vysokotlakové lití | 15 |
| 1.4.2 Vtokový systém..... | 17 |
| 1.4.3 Temperační a chladicí systém..... | 18 |
| 1.4.4 Standardní materiál pro sériovou výrobu nástrojů pro HPDC | 19 |
| 2 3D tisk kovových materiálů | 21 |
| 2.1 Princip technologie Direct Metal Laser Sintering (DMLS) | 22 |
| 2.2 Požadavky na materiál pro 3D tisk nástrojů pro HPDC | 24 |
| Nástrojová ocel 1.2709..... | 25 |
| 3 Moderní trendy v oblasti HPDC | 27 |
| 3.1 Využití aditivní výroby | 27 |
| 3.1.1 Konformní chlazení..... | 27 |
| 3.1.2 Topologická optimalizace | 29 |
| 3.1.3 Reverzní inženýrství..... | 32 |
| 3.1.4 3D tisk částí forem | 33 |
| 3.1.5 Nové materiály pro HPDC..... | 34 |
| 3.1.6 Opravy a modifikace forem | 40 |
| 3.2 Strukturální díly | 42 |
| 3.2.1 Zadní část konstrukce podvozku vozu Tesla Model Y..... | 44 |
| 3.3 Semi-solid metal casting | 46 |
| 3.4 Shrnutí teoretické části a stanovení cílů | 48 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 4 | <i>Praktická část</i> | 49 |
| 4.1 | Metodika testování | 49 |
| 4.2 | Zkouška tahem | 50 |
| 4.2.1 | Zkušební tělesa | 51 |
| 4.2.2 | Naměřené hodnoty | 52 |
| 4.2.3 | Analýza lomových ploch | 53 |
| 4.3 | Zkouška rázem v ohybu | 54 |
| 4.3.1 | Zkušební tělesa | 55 |
| 4.3.2 | Naměřené hodnoty | 56 |
| 4.3.3 | Analýza lomových ploch | 57 |
| 4.4 | Porovnání naměřených hodnot s hodnotami z rešerše | 58 |
| 4.5 | Přehled materiálů | 59 |
| | <i>Závěr</i> | 61 |
| | <i>Seznam obrázků</i> | 63 |
| | <i>Seznam tabulek</i> | 64 |
| | <i>Seznam použité literatury</i> | 65 |

Úvod

Technologie vysokotlakového lití se řadí mezi nejpoužívanější a nejproduktivnější technologie odlévání. Hlavními výhodami této technologie jsou rychlost výroby, vysoká přesnost a dobrá jakost povrchu. Vysokotlaké lití také umožňuje vyrábět díly velmi složitých tvarů, které následně vyžadují pouze nízké množství dokončovacích operací. Technologie ovšem přináší mnoho nevýhod, především vysoké pořizovací náklady na stroje a formy. Dále je také velmi složité nastavit výrobní procesy, kdy vlivem mnoha složitých parametrů často vzniká velké množství nepřijatelných vad. Vysokotlaké lití je proto předurčeno především pro velkosériové výroby jako jsou například automobilový a letecký průmysl.

Stále rostoucí trend využívání aditivní výroby zasahuje také do propojení vysokotlakého lití, a právě zmíněné aditivní výroby. Technologie aditivní výroby, které přináší benefity jako konformní chlazení, topologickou optimalizace a reverzní inženýrství jsou stále častěji využívány při výrobě, opravách a modifikacích částí licích forem. Ovšem výroba částí forem technologiemi kovového 3D tisku vyžaduje i speciální nástrojové materiály, jejichž výběr je v práci popsán. Tato bakalářská práce se zabývá rešerší moderních trendů ve vysokotlakém lití. Dále také popisuje využití aditivní výroby právě v oblasti vysokotlakého lití, kdy toto propojení nabízí různé nové a zajímavé možnosti.

Cílem této bakalářské práce je seznámit čtenáře s problematikou vysokotlakého lití a aditivní výroby. Nabídnout čtenáři rešerší moderních trendů ve vysokotlakém lití, kde jedním z trendů je zavádění aditivní výroby do této technologie. Jednou z oblastí aditivní výroby jsou například moderní nástrojové materiály, kde u vybraných prémiových materiálů byly provedeny mechanické zkoušky, porovnání a následné vyhodnocení.

1 Vysokotlaké lití – High Pressure Die Casting

Vysokotlaké lití, v anglické literatuře High Pressure Die Casting (HPDC), je technologie, při níž se roztavený kov vtlačuje do formy pod vysokým tlakem, který mnohonásobně převyšuje atmosférický tlak. Tyto formy jsou obvykle vyrobeny z vysokojakostní nástrojové oceli a jsou velmi přesně vyrobeny na požadované rozměry. Díky vysoké přesnosti formy a tlaku, působícímu na roztavený kov, jsou výsledné rozměry odlitku velmi přesné. Podobně přesných a tvarově složitých rozměrů lze dosáhnout pouze strojním obráběním, přesným tvářením nebo, v dnešní době moderním, 3D tiskem. Ve srovnání s těmito technologiemi je však vysokotlaké lití ve větších sériích levnější. [1] [2]

Při výrobě velkých sérií lze technologií vysokotlakého lití ušetřit až 40-50 % nákladů. Tlakové lití je také mnohem rychlejší výrobní metoda než například obrábění, ale takto vyráběné výrobky se obvykle neobejdou bez nutnosti následného obrábění, především kvůli nedostatečné přesnosti funkčních ploch. [1] [2]



Obrázek 1 - Díl uchycení tlumiče [3]

Příklad odlitku je zobrazen na Obrázek 1. Z hlediska mechanických a estetických vlastností je výsledná struktura, ve srovnání s jinými metodami odlévání, velmi dobrá. Povrch je čistý a hladký s jemnozrnnou strukturou, která vzniká atermickým podchlazením. Z tohoto důvodu je také dosaženo dobrých mechanických vlastností. Tlakové lití nachází největší uplatnění při odlévání nízkotavitelných slitin kovů jako je zinek, hliník, hořčík nebo měď. Hlavní využití této technologie je v současné době u hliníkových slitin, a to z důvodu výrazně nižší hmotnosti ve srovnání s ocelí, často při srovnatelných nebo dokonce lepších materiálových vlastnostech (pevnost, odolnost

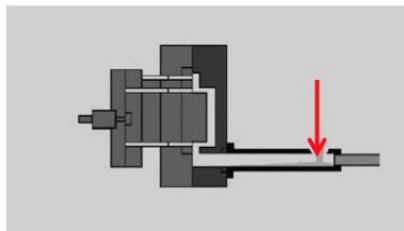
proti korozi, tepelná vodivost). Pro dosažení těchto vysokých nároků na odlitek, vyráběný tlakovým litím, a dobrých vlastností, které by mohly nahradit jiné technologie, je třeba dbát na optimalizaci celého procesu lití a volbu vhodných technologických parametrů. [1] [2]

1.1 Princip technologie HPDC

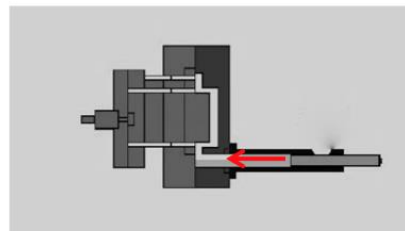
Princip dané technologie je znázorněn na Obrázek 2 a skládá se z těchto kroků:

- 1) Uzavření lisu a naplnění komory taveninou v prostoru před pístem.
- 2) Vstříknutí kovu do dutiny formy.
- 3) Chladicí cyklus.
- 4) Posun pohyblivé části formy a otevření lisu.
- 5) Vyhození vyrobeného dílu (případně odebrání manipulátorem).
- 6) Vrácení vyhazovacího paketu zpět do výchozí polohy a nástřik dutiny separátorem.

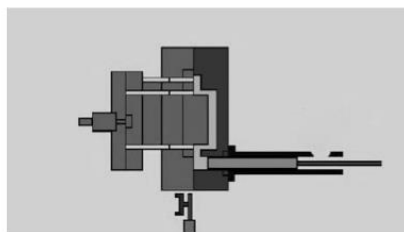
1)



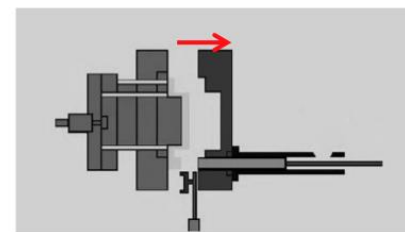
2)



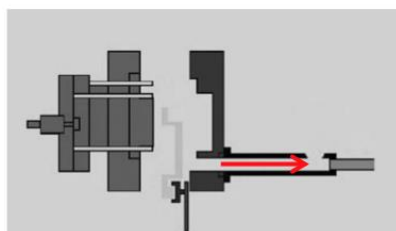
3)



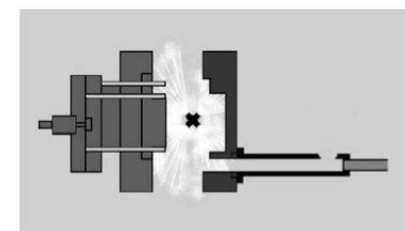
4)



5)



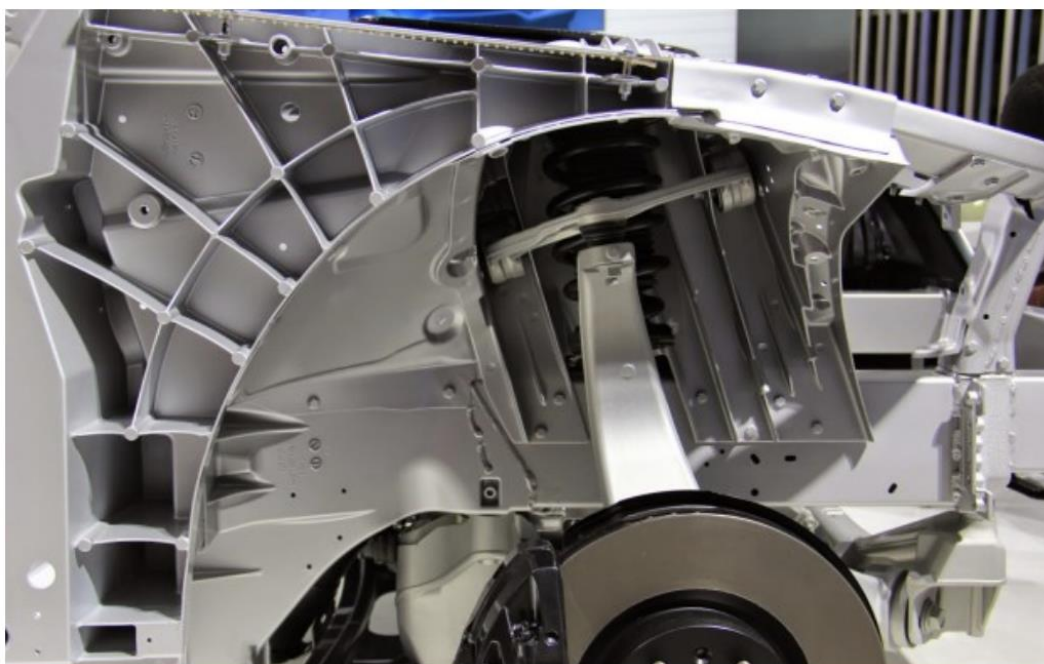
6)



Obrázek 2 - Princip pracovního postupu tlakového lícího stroje [1]

1.2 Výhody a nevýhody HPDC

Nejzásadnější výhody vyplívají z předcházejících kapitol a jsou důvodem, proč je HPDC vysoce využívané ve výrobě, kde je požadavek na velkou sérii a vysokou produktivitu. Jsou zároveň důvodem, že se současné velké automobilové koncerny pokouší aplikovat technologii vysokotlakého lití do výroby. V kapitole 3, moderní trendy v HPDC budou důvody pro využívání této technologie pro výrobu nejen automobilů podrobně rozebrány. Vysokotlaké lití ve velkosériové výrobě umožňuje výrobu složitých tenkostěnných odlitků, kde se tloušťka stěny odlitku může pohybovat mezi 1–2 mm. Kvalita povrchu odlitku je vysoká, funkční plochy přesto vyžadují následné obrobení. Povrch je čistý a hladký s jemnozrnnou strukturou. Další výhodou je vysoká rozměrová přesnost i tvarově velice složitých odlitků (až 0,3 – 0,5 %). Navíc mechanické vlastnosti odlitků jsou na vysoké úrovni. [1] [3]



Obrázek 3 – Strukturální díl vyráběný technologií HPDC [3]

Automobilové koncerny se navíc k této technologii uchylují pro možnost vyrábět výrazně složitější výrobky, jako je možné pozorovat na Obrázek 3, což má za následek sjednocení více dílů do jednoho složitějšího. Tento proces následně výrazně snižuje náklady na výrobu jednotlivých částí. [1] [3]

Nevýhody výroby pomocí technologie vysokotlakého lití jsou především vysoké pořizovací náklady na stroj. Návrh a výroba tlakových forem je také vysoce nákladná. Při nesprávném nastavení pracovních procesů navíc může být výroba i vysoce neefektivní. Odlitky vytvořené technologií vysokotlakého lití mohou podléhat nepříznivému jevu nazývaný vnitřní perezita odlitků. [1] [4]

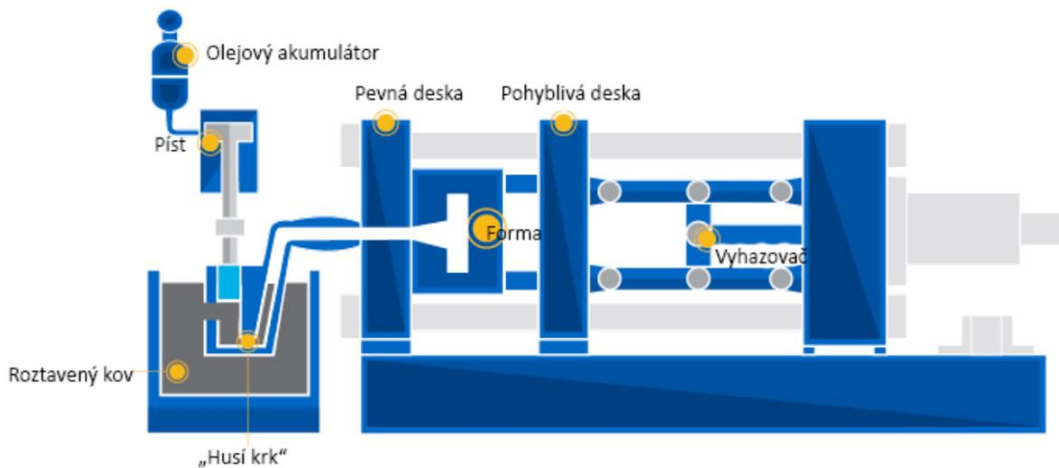
1.3 Rozdělení HPDC dle typu stroje

Konvenční technologie vysokotlakého lití. Hlavními důvody, proč se tato technologie stále používá ve většině sléváren, jsou vysoká produktivita, přesnost, kvalitní povrch odlitku a možnost odlévat tímto způsobem tenkostěnné profily. Na druhou stranu nevýhodou je vysoká pořizovací cena strojů. Níže jsou popsány různé konvenční technologie a jejich základní principy. V současné době je kladen důraz především na celkovou automatizaci procesu, a proto se používají CNC stroje. [1] [5] [4]

Klasické vysokotlaké lití se dělí na dvě kategorie, dle použitého stroje, které jsou popsány níže. První ze dvou kategorií je využití stroje s teplou lící komorou, která je využívána především pro cín nebo zinek. Druhá kategorie využívá stroj se studenou lící komorou, která je využívána častěji hlavně pro slitiny hliníku. [1] [2] [5]

1.3.1 Stroje s teplou lící komorou

Tento typ odlévacího stroje se používá především pro kovy s nízkou teplotou tání, jako je zinek nebo cín. Hlavním poznávacím rysem těchto strojů je, že tavicí pec je součástí lícího stroje. Roztavený kov je tlačěn pístem nebo stlačeným vzduchem přímo z pece přes komoru do formy. Komora se v místě hrdla zužuje a je ukončena tryskou. Jak je znázorněno na Obrázek 4, píst se pohybuje směrem dolů, aby uzavřel komoru, a poté vytlačí taveninu do formy. Jakmile kov ve formě ztuhne, píst se stáhne a komora se znovu naplní roztaveným kovem. [1] [2] [5]



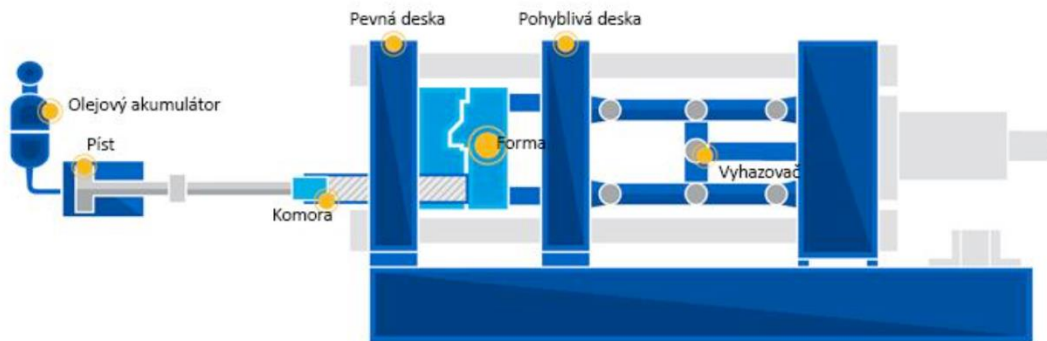
Obrázek 4 - Schéma stroje s teplou licí komorou [6]

Výhodou je, že vliv okolní atmosféry na taveninu je minimalizován a nedochází k výrazným tepelným ztrátám. Dlouhodobý kontakt roztaveného kovu se součástmi stroje (píst, komora) však může způsobit problémy. Tyto problémy následně často vedou k opotřebení a zkrácení životnosti stroje. [1] [2] [5]

1.3.2 Stroje se studenou licí komorou

Tato metoda se používá z důvodu vysokého tepelného namáhání součástí strojů pro lití za tepla u kovů s vyšší teplotou tání, jako jsou hliník, měď, hořčík a někdy i slitiny železa. Hlavní rozdíl spočívá v tom, že tavicí pec s roztaveným kovem je umístěna mimo stroj a kov je do stroje přiváděn mechanickým dávkovačem. [1] [2] [5] [7]

Jakmile je komora naplněna požadovaným množstvím kovu, píst se pohybuje a tlačí taveninu do formy. Píst působí na tuhnoucí taveninu, dokud tato tavenina neztuhne, a poté, když je odlitek vyhozen z formy, je píst vrácen do původní polohy a proces se opakuje. Hlavní výhodou je snížení tepelného namáhání stroje, zejména pístu a komory, což má pozitivní vliv na opotřebení a životnost stroje. Nevýhodou je nutnost dopravy taveniny ke stroji, a tedy tepelné ztráty. [1] [2] [5] [7]



Obrázek 5 - Schéma stroje se studenou lící komorou [8]

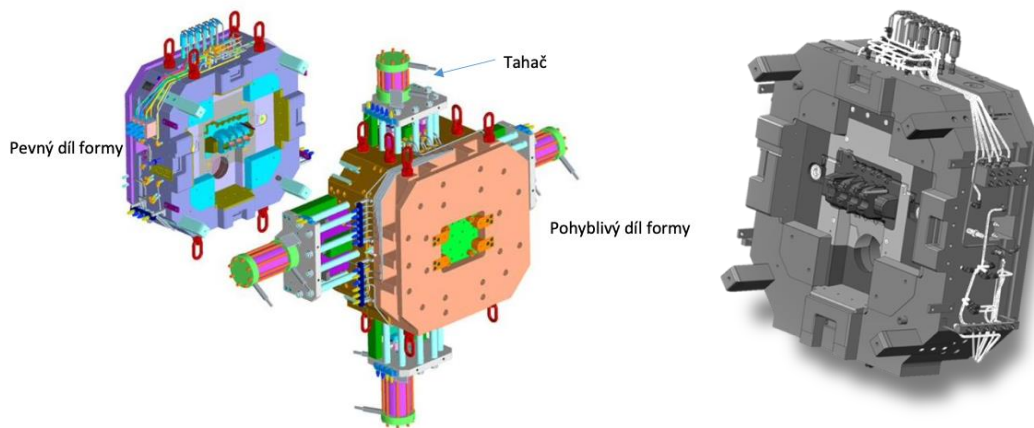
Na Obrázek 5 je zobrazeno schéma horizontálního stroje s komorou pro lití za studena. Existují také stroje se svislou lící komorou, ale ty se v současné době příliš nepoužívají kvůli horšímu využití materiálu a nižšímu pracovnímu výkonu. [1] [2] [5] [7]

1.4 Formy pro HPDC

Při tlakovém lití má forma zásadní význam a velmi úzce ovlivňuje kvalitu a produktivitu výroby, zejména proto, že je v přímém kontaktu s kovem, a právě ve formě probíhá hlavní proces lití. Forma na vysokotlaké lití je zobrazena na Obrázek 6. [2]

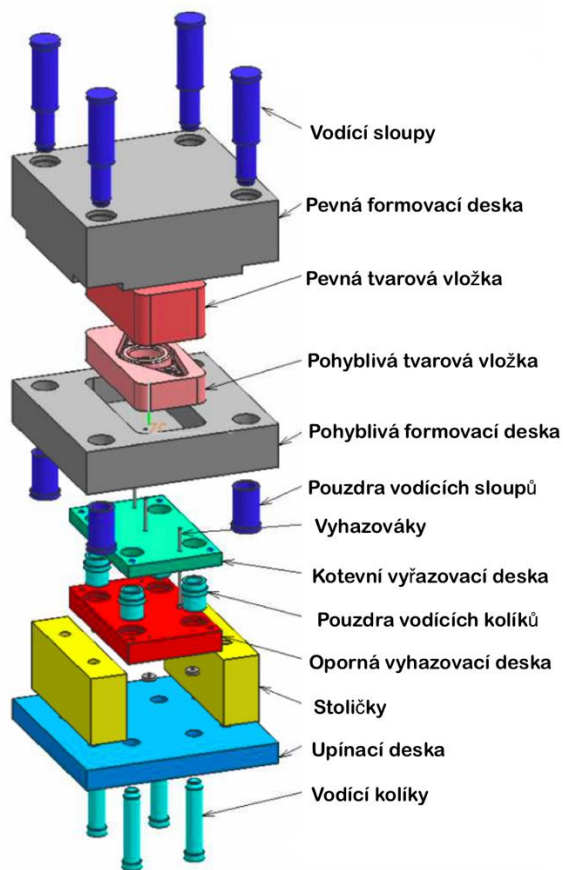
1.4.1 Konstrukce formy pro vysokotlakové lití

Formy pro konvenční vysokotlakové lití hliníkových slitin na strojích se studenou horizontální komorou. Forma se skládá ze dvou částí, pohyblivé a pevné. Tyto dvě části jsou konstruovány tak, aby dosedaly na sebe a vytvářely dutinu, která odpovídá tvaru finálního odlitku. Místa, kde se kov přímo dotýká formy, se nazývají činné nebo pracovní plochy. Každá forma musí být přizpůsobena podmínkám odlévání a geometrii odlitku a vyrobena tak, aby odolala tlaku a teplotám při odlévání. Vytvoření vhodné konstrukce formy je velmi náročný a nákladný proces a po výrobě lze formu upravovat jen ve velmi omezené míře. Proto je třeba během celého procesu návrhu formy striktně dodržovat určité zásady. [1] [2] [7] [9]



Obrázek 6 - Forma bloku spalovacího motoru [9]

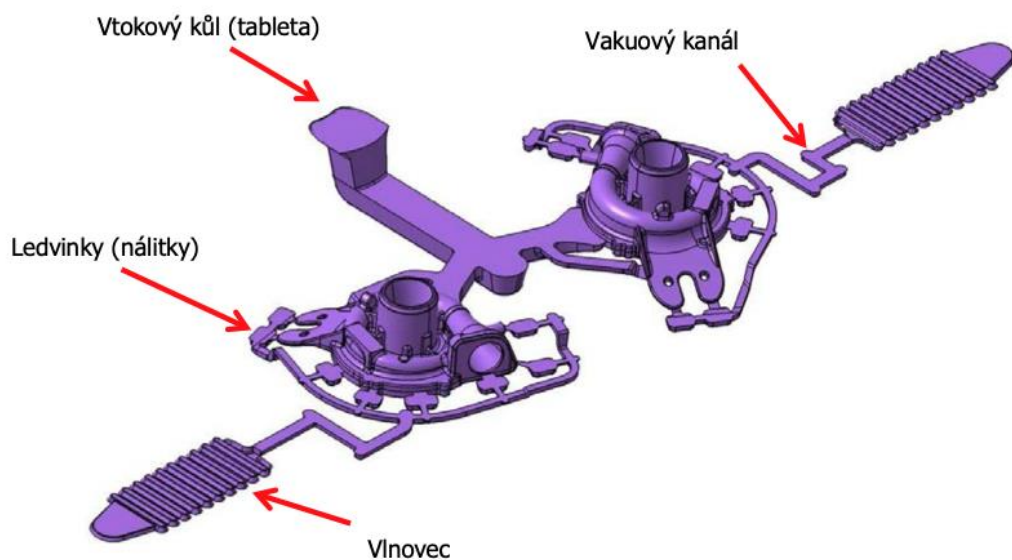
Především je nutné optimalizovat konstrukci odlitku tak, aby nedocházelo k vadám nebo zbytečnému namáhání formy (zaoblení, zkosení, tloušťky stěn). K tomuto účelu se dnes hojně využívají simulační softwary, ve kterých lze virtuálně simulovat celý proces odlévání. Případně optimalizovat tvar odlitku, nebo aktualizovat správný návrh vtokového a odvzdušňovacího systému. Při navrhování je také nutné mít na paměti produktivitu a zvolit vhodný počet forem s ohledem na složitost odlitku, dostupné stroje a sériovost výroby. Velmi důležité je také zohlednit, že odlitek je nutné z formy snadno vyjmout. Je také nutné zvolit vyhazovače tak, aby byl díl vyhozen z formy bez poškození nebo deformace. Části formy pro konvenční tlakové lití hliníkových slitin na strojích se studenou horizontální komorou jsou znázorněny na Obrázek 7. [2] [10] [11]



Obrázek 7 - Jednotlivé části formy pro HPDC [12]

1.4.2 Vtokový systém

Hlavní úlohou vtokového systému je vést roztavený kov z plnicí komory do dutiny formy. V druhé řadě vtokový systém také zajišťuje regulaci tlaku, rychlost plnění nebo udržování toku kovu v pohybu. Požadavky na vtokový systém spočívají v zajištění plynulého plnění dutiny. Spočívají také v tom, aby se v tavenině zbytečně nezadržoval vzduch, a zároveň nedocházelo k předčasnému opotřebení formy. [1] [7] [11] [13]



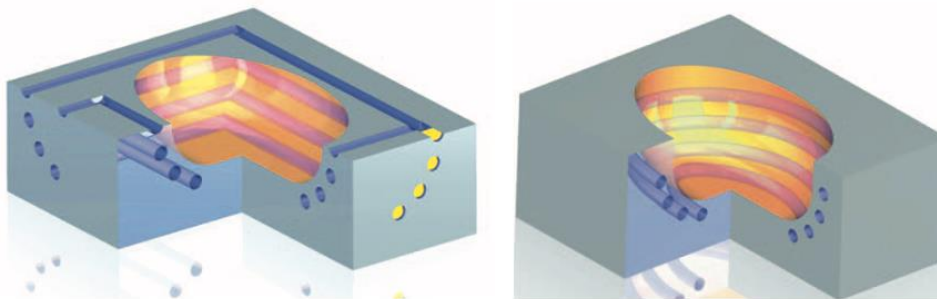
Obrázek 8 - Schéma vtokového systému [1]

Při návrhu vtokového systému, který je zobrazen na Obrázek 8, je vhodné začít definicí požadované úrovně kvality odlitku, protože vtokový systém se upravuje podle toho, zda je kladen důraz na mechanické vlastnosti nebo na kvalitu povrchu. Pokud je prioritou kvalita povrchu, musí být vtok přizpůsoben vyšším vstřikovacím rychlostem a kratším dobám plnění. Výsledkem je odlitek s lepším povrchem, ale horší vnitřní kvalitou. Pokud jsou však kladeny požadavky především na vnitřní kvalitu, pak musí být vtokové ústrojí navrženo tak, aby dosahovalo delších dob plnění a nižších rychlostí. [1] [7] [11] [13]

1.4.3 Temperační a chladicí systém

Během procesu tlakového lití je dutina formy naplněna horkou taveninou, které do ní přivádí velké množství tepla, které musí být následně odváděno skrz tělo formy. Proto je každá forma pro tlakové lití nutně vybavena chladicím systémem, aby se zabránilo zvyšování teploty, a tím nežádoucím jevům, jako je opotřebení formy a jader nebo přilepení kovu ke stěnám formy. Ve stejnou chvíli nesmí být forma příliš studená, protože studená forma by mohla vést k příliš rychlému tuhnutí odlitku a vzniku nežádoucích vad. Chlazení a temperování se standardně provádí navrtáním kanálků do formy, do nichž proudí dané médium, které buď odvádí teplo z formy pryč, nebo ji může ohřívat na předem danou teplotu. [1] [7] [11] [13]

Kanálky pro vedení chladicího média jsou ve většině případů vrtané. V posledních letech jsou ovšem čím dále častěji využívány, kanálky zhotovené inovativními metodami. Nová metodika chladících kanálků umožňuje vedení těchto kanálků mnohem blíže dutině. Konformní chlazení, takový název nese nová metoda zhotovení chladících kanálků, navíc přesně kopíruje tvar dutiny, a proto dosahuje mnohem lepších chladících vlastností. Konformní chlazení, vpravo na Obrázek 9, využívá technologii Direct Metal Laser Sintering (DMLS), dnes známou také jako kovový 3D tisk, která umožňuje vytvořit kanál téměř libovolného tvaru. Výhodou této metody je homogenní odvod tepla z dutiny, což může snížit chladicí cyklus až o 50 %. Konformnímu chlazení se více bude věnovat kapitola dále v práci. [1] [7] [11] [13]



Obrázek 9 - Rozdíl mezi vrtanými chladícími kanálky a konformními chladícími kanálky [14]

Formy se při odlévání hliníkových slitin temperují na 150-300 °C. Zejména funkční části formy, jako je řezná plocha, musí být temperovány, aby mohl tlak působit co možná nejdéle. Na druhou stranu vtokový kůl s tabletou musí být důkladně ochlazen, protože kov tuhne jako poslední, aby se neprodlužovala doba cyklu. [1] [7] [11] [13]

1.4.4 Standardní materiál pro sériovou výrobu nástrojů pro HPDC

Středně legovaná nástrojová ocel pro práci za tepla s velmi dobrou houževnatostí a odolností proti opotřebení za tepla. Nástrojová ocel H11 – 1.2343 je určena pro tvorbu forem se zrcadlově leštěnými povrchy, pro formy a nástroje pracující zatepla. Např. velmi namáhané zápusťky, pro formy na tlakové lití hliníku. Tepelným zpracováním lze u této nástrojové oceli dosáhnout meze pevnosti přes 1800 N/mm². Varianta nástrojové oceli 1.2343 ESU, která je dvakrát přetavovaná ocel 1.2343, je typ oceli velmi často využívané pro výrobu forem. [15]

Tabulka 1 - Chemické složení oceli 1.2343 [15]

| 1.2343 | Chemické složení | | | | | | | |
|-----------|------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| Prvek | C | Mn | Si | P | S | Cr | Mo | V |
| Obsah [%] | 0,33- 0,41 | 0,25- 0,50 | 0,80- 1,20 | max. 0,03 | max. 0,02 | 4,80- 5,50 | 1,10- 1,50 | 0,30- 0,50 |

Z chemického složení v Tabulka 1 vyplívá, že se jedná o chrom-molybdenovou vanadovou ocel, kalitelnou v oleji i na vzduchu s velmi dobrou prokalitelností, houževnatostí, odolností proti vzniku trhlin, a to při normálních i vyšších pracovních teplotách. Vhodná ocel pro nástroje chlazené vodou, která je dobře tvárná, výborně lešitelná a lze ji dobře obrábět. Výhodami této oceli a důvody proč je tato nástrojová ocel využívána i pro výrobu forem ve ŠKODA AUTO a.s. jsou rovnoměrná a dobrá obrobitelnost, pevnost 750 MPa. Tvrdost po zakalení mezi 50–57 HRC. Ocel je také známá jako H11, podle evropské normy X38CrMoV5-1. [15]

2 3D tisk kovových materiálů

Aditivní technologie výroby, pod kterou se 3D tisk plastů i kovů řadí, se začala využívat v 80. letech minulého století především v leteckém průmyslu. Hlavním důvodem bylo snížení potřebného času na výrobu prototypů. Snížení výrobního času znamenalo výrazné ušetření finančních prostředků, a také měsíců práce na vývoji. [16] [17]

Vývoj 3D tisku v následujících letech, který přinesl zlepšení kvality výstupů z 3D tiskáren, znamenal, že se mohly začít využívat i k výrobě konečných výrobků. Základní myšlenka aditivní výroby (additive manufacturing – AM) je tvorba dílu z trojrozměrného modelu vytvořeného pomocí systémů CAD. Podstatou 3D tisku je přidávání materiálů v jednotlivých vrstvách. Každá vrstva je průřezem zadaného CAD modelu. Tenčí vrstva znamená kvalitnější díl s lepšími mechanickými vlastnostmi, ale zároveň větší spotřebu materiálu a s tím spojený nárůst potřebných finančních zdrojů. Jednotlivé technologie aditivní výroby jsou rozlišovány především použitými materiály, způsobem nanášení jednotlivých vrstev a technologií spojování vrstev. [16] [17]



Obrázek 10 - Součást vytvořená technologií kovového 3D tisku [18]

Kovový 3D tisk nejčastěji jako zdroj materiálu využívá prášek, popřípadě drát. Materiál je taven zdrojem tepla a následným chladnutím vzniká výsledný díl. Kovový 3D tisk přináší velké výhody, které začaly přitahovat pozornost především leteckého a automobilového průmyslu. Rychlá tvorba polotovarů, téměř neomezené možnosti v tvorbě výsledného designu, poměrně snadné odlehčení součásti díky technologii topologické optimalizace, to jsou předpoklady, pro implementaci aditivní výroby do

vývoje nových elektromobilů, ale i automobilů se spalovacími motory. Topologicky optimalizovaná součást vytvořena 3D tiskem je na Obrázek 10. [19]

Norma rozděluje aditivní výrobu podle technologie nanášení a spojování materiálu.

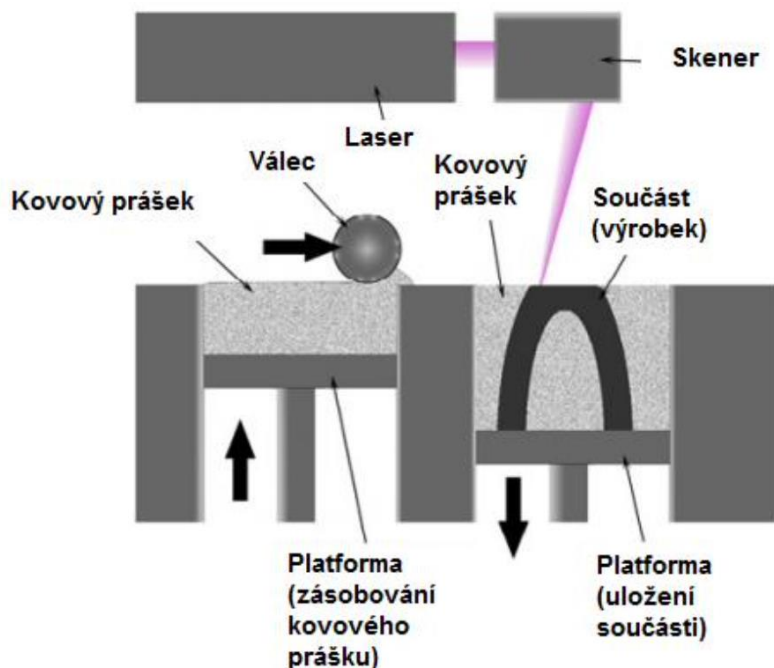
Rozdělení dle normy ISO/ASTM 52900:2015 [20]:

- Powder bed fusion (Spékání v práškovém loži)
- Material extrusion (Vytlačování materiálu)
- Material jetting (Tryskání materiálu)
- Sheet lamination (Laminace plátů)
- Directed energy deposition (Přímé nanášení energií)
- Binder jetting (Tryskání pojiva)
- Vat photopolymerization (3D tisk fotopolymerizací)

Další kapitola je zaměřena na jednu z technologií, která spadá do skupiny Laser Powder Bed Fusion (L-PBF). Jedná se o nejčastěji využívanou technologii pro výrobu 3D tištěných součástí forem pro tlakové lití. Výroba celých forem touto technologií by byla neekonomická a příliš náročná na finanční zdroje, proto se technologií 3D tisku vyrábí nejčastěji pouze vložky těchto forem. [21]

2.1 Princip technologie Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

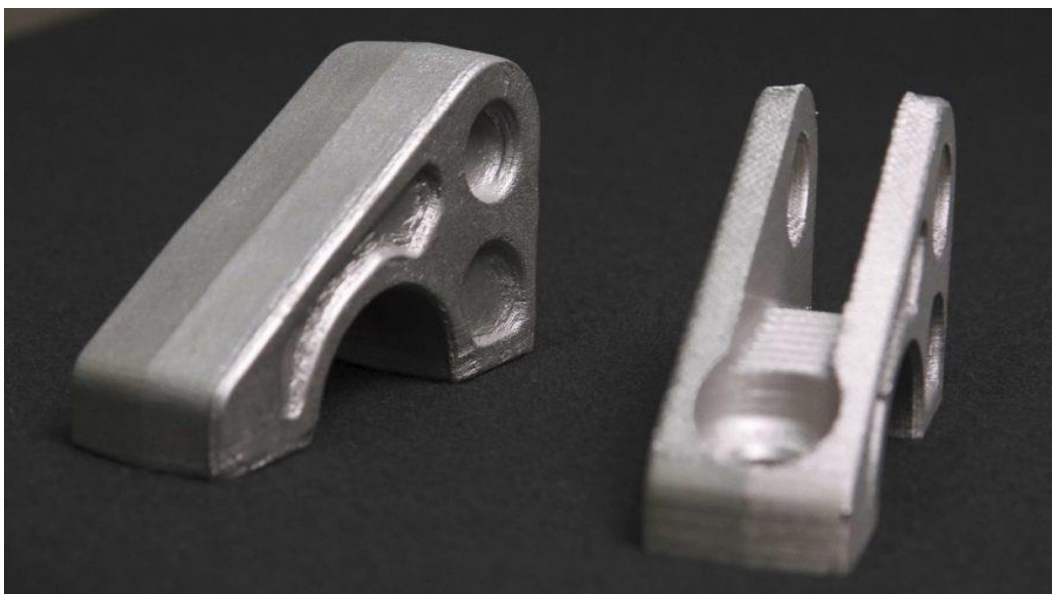
Technologie Direct Metal Laser Sintering – DMLS se používá pro 3D tisk z kovových materiálů, přičemž stejně jako u jiných technologií 3D tisku výrobek nevzniká odebíráním materiálu jako při konvenčních metodách (např. obrábění), ale nanášením tenkých vrstev materiálu zdola nahoru do podoby 3D modelu. Stejně jako při plastovém 3D tisku platí, že vyšší počet vrstev znamená lepší kvalitu a mechanické vlastnosti výsledného produktu. Tuto technologii vyvinula německá společnost EOS, která také v roce 1995 dodala první 3D tiskárnu DMLS a přišla s možností tisku z titanu. Metoda DMLS je podobná procesu Select Laser Sintering – SLS, při němž se materiál ve formě prášku spéká vrstvu po vrstvě pomocí laseru. Hlavním rozdílem je teplota slinování. Polyamid používaný při metodě SLS potřebuje teplotu spékání mezi 160 °C a 200 °C, zatímco kovový prášek používaný při metodě DMLS má teplotu tání mezi 1510 °C a 1600 °C. To znamená, že k dosažení této teploty je zapotřebí vysoce výkonný laser. Obrázek 11 znázorňuje tento princip. [21] [22]



Obrázek 11 - Princip technologie DMLS [23]

Princip technologie DMLS spočívá v tom, že válec rovnoměrně nanese vrstvu kovového prášku na celou platformu a ta je poté na základě 3D dat laserem spékána. Po vytvoření vrstvy laserem se platforma posune ve svislé ose směrem dolů o tloušťku jedné vrstvy a celý proces se opakuje, dokud není vytvořen požadovaný tvar dílu. Po dokončení procesu se musí díl před vyjmutím nechat vychladnout. Pokud byly použity pomocné podpěry, musí se z výsledné součásti ručně odstranit. [21] [22] [23]

Cena dílu již nezávisí na jeho složitosti jako u jiných technologií, což dává konstruktérům větší možnost vytvářet složitější, ale cenově dostupné díly. Mohou se soustředit na vytváření předmětů, aniž by museli přemýšlet o možnostech a složitosti výroby. Součásti jsou mnohem lehčí díky tomu, že jsou vytvořeny pouze z potřebného množství materiálu, což je velmi výhodné zejména pro letecký a automobilový průmysl. Obrázek 12 ukazuje rozdíl mezi dílem vytištěným technologií DMLS (na pravé straně) a dílem vyrobeným konvenční technologií (na levé straně). [21] [22]



Obrázek 12 - Rozdíl mezi výrobou dílu konvekční metodou a metodou kovového 3D tisku [16]

Pomocí technologie DMLS je možné v krátkém časovém úseku vytvořit velice složité součásti, které nelze vyrobit jinými technologiemi výroby kovových dílů. Používají se materiály jako inconel, hliník, nerezová ocel, martenzitická ocel a titan. Díly vytvořené touto technologií jsou pevné, odolné proti opotřebení a žáruvzdorné. Kvalita povrchu je nižší, přibližně Ra 12,5. Technologie DMLS je obzvláště užitečná pro vytváření jedinečných kovových dílů, které jsou plně funkční a rychle dostupné. [21] [22] [23]

2.2 Požadavky na materiál pro 3D tisk nástrojů pro HPDC

Současným trendem pro formy, které jsou používány při technologii tlakové lití hliníkových dílů (HPDC) je zvyšování složitosti konstrukce dílů, snižování hmotnosti a zvětšování velikosti dílů, zejména v automobilovém a leteckém průmyslu. Tyto faktory kladou zvýšené nároky na výkonnost nástrojů používaných pro technologii HPDC. Hlavním požadavkem na tištěné nástroje je zlepšení řízení tepla ve srovnání s konvenčně vyráběnými nástroji. Mezi další požadavky patří zvýšení kvality tištěných dílů, zlepšení životnosti nástrojů, kde jsou důležité zejména mechanické vlastnosti nástrojů nebo kvalita struktury tištěných dílů. Kromě toho se použití aditivně vyráběných nástrojů snaží dosáhnout zkrácení doby vstřikovacího cyklu, zvýšení produktivity a snížení nákladů na vyrobený díl. Samotné vložky forem musí odolávat relativně nepříznivým podmínkám způsobených vysokými teplotními rozdíly. Materiál musí být navržen tak, aby odolával teplotním gradientům a vysokým

napětím. Na výslednou výkonnost nástroje má také zásadní vliv správná volba vhodného materiálu. Důležitým prvkem při výrobě je používat systémový, konstrukční a procesní přístup, a že kritériem výběru je efektivní design konstrukce. Cílem efektivního návrhu by vždy mělo být zlepšení účinnosti a zvýšení výkonnosti nástroje v provozu. To má následně ve výrobě přednosti, jako jsou zkrácení doby cyklu, zamezení prostojů, zlepšení kvality dílů, maximalizace efektivity výroby. Přestože hlavním cílem návrhu je vysoká účinnost a vysoký výkon v provozu, použití efektivních návrhů designu konstrukce vede zároveň k zdatelnému odlehčení vyrobených forem pro HPDC a dalších nástrojů. [24] [25]

Asnafi [25] v experimentu prokázal, že odstranění níže uvedených vad použitím správného materiálu zkrátilo dobu cyklu nejméně o 2,5 % a snížilo množství vyrobených zmetků o 3,4 %. Současně se zvýšila životnost nástroje nejméně o 150 %. Poruchy, kterým je nutné se při návrhu nástroje pro HPDC vyhnout [25]:

- Prasknutí chladicího kanálu – vysoké napětí ve formě na základě špatně navrženého chladicího kanálu.
- Koroze kovu v důsledku chemické interakce mezi Al a nástrojovou ocelí (například vysoký obsah Ni).
- Regulace tepla v důsledku tepelné únavy
- Erozně-mechanickému opotřebení, zejména v důsledku rychlosti taveniny
- Praskání v důsledku mechanického přetížení formy
- Vysoká pórovitost – špatná teplotní vodivost
- Roztavená slitina se nataví na povrch formy

Nástrojová ocel 1.2709

Jeden z nejvíce využívaných materiálů pro kovový 3D tisk nástrojů, ocel 1.2709 je definována jako martenzitický ocelový prášek, který je určen pro vytvrzení v procesu stárnutí. Dle normy Evropské unie je prášek označován jako ocel 1.2709, neboli označení podle DIN X3NiCoMoTi 18-9-5, dále je materiál známý dle označení firem jako jsou EOS MS1, Sandvik 18Ni-300, Böhler W722 AMPO a další. Tento typ oceli se vyznačuje velmi dobrými mechanickými vlastnostmi a po tepelném zpracování v

procesu stárnutí dosahuje vynikající tvrdosti a pevnosti. Chemické složení v Tabulka 2. [26]

Tabulka 2 - Chemické složení prášku 1.2709 [26]

| 1.2709 | Chemické složení | | | | | | | | | | |
|-----------|------------------|-------------|-------------|-------|---------|-------------|---------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Prvek | C | Si | Mn | Ni | Mo | Ti | Co | Al | P | S | Cr |
| Obsah [%] | max. 0,03 | max. 0,1 | max. 0,1 | 17-19 | 4,5-5,2 | max. 0,8 | 8,5-9,5 | max. 0,1 | max. 0,01 | max. 0,01 | max. 0,05 |

Díly vyrobené z tohoto martenzitického ocelového prášku lze po vytištění snadno obrábět a lze je dodatečně kalit na tvrdost vyšší než 50 HRc při 490 °C stárnutím po dobu 6 hodin. V materiálovém listu EOS se uvádí, že díly vyrobené z tohoto prášku lze obrábět, svařovat, leštit a v případě potřeby i povlakovat, a to jak ve vytištěném, tak i tepelně zpracovaném stavu. Jelikož jsou díly tištěny ve vrstvách, mají v důsledku toho určitou anizotropii, kterou lze vhodným tepelným zpracováním snížit nebo odstranit. Mechanické vlastnosti v Tabulka 3. [26] [27]

Tabulka 3 - Mechanické vlastnosti oceli 1.2709 [27]

| 1.2709 | DP Andronov [27] | |
|-------------------------|------------------|------------------|
| | 3D tisk | Konvenční výroba |
| Rp _{0,2} [MPa] | 1789 | 1739 |
| Rm [MPa] | 1847 | 1844 |
| A [%] | 4,19 | 8,4 |

3 Moderní trendy v oblasti HPDC

V současné době se automobilový průmysl pokouší implementovat technologii HPDC do výroby jednotlivých částí automobilů v maximální míře. Důvodem jsou především poměrně nové trendy, kterých lze v HPDC v kombinaci s aditivní výrobou dosahovat. Výroba a technické vlastnosti forem umožnily velký pokrok v celé technologii vysokotlakého lití, hlavně díky moderní technologii 3D tisku, strukturálním dílům a jiným inovacím v dané oblasti. Např. společnost Tesla, vyrábějící nejprodávanější elektromobily, je tak přesvědčena o úspěšném využití této technologie při výrobě elektromobilů, že investovala do největšího lisu pro tlakové lití. Tento „Giga press“ je schopen v jednom kroku vyhotovit zadní část podvozku. Následně jeden takto vyrobený díl dokáže nahradit původních 70 dílů, které byly dříve potřebné. [28]

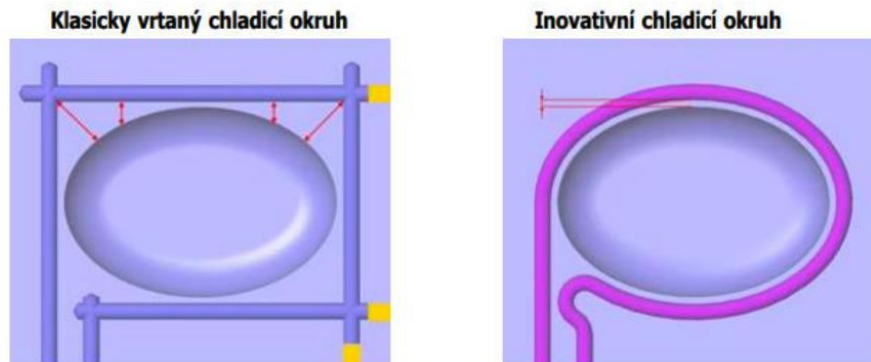
3.1 Využití aditivní výroby

3.1.1 Konformní chlazení

V dnešní době se pro formy na lití kovů a vstřikolísování plastů stále využívají především klasické vrtané chladicí kanály. Tento způsob výroby má ovšem svá úskalí hlavně kvůli technologii vrtání, která umožňuje vytvořit pouze lineární chladicí kanály. V mnoha případech bylo proto nemožné realizovat chladicí kanály, které by dokázali optimálně chladit formu během celého procesu lití. U odlitků složitých tvarů jednoduše nebylo možné vytvořit chladicí kanály v dostatečné blízkosti dutiny. [29] [30]

Technologie konformního chlazení byla představena už v roce 1997 profesorem Sachsem na konferenci Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF). Konformní chlazení využívá výrobní možnosti 3D tisku, a především technologie DMLS, která umožňuje vytvořit chladicí soustavu, která kopíruje povrchový tvar výsledného odlitku. [29] [30]

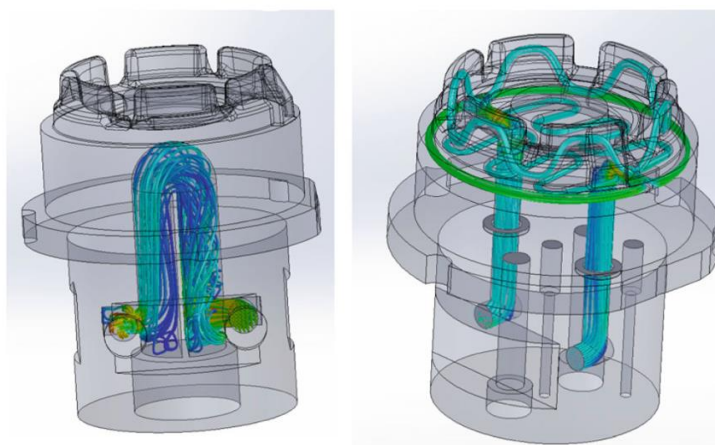
Technologie DMLS odbourává omezení výrobní technologie vrtání. Konformní chlazení (Conformal Cooling) je chladicí okruh umístěn v nejkratší možné vzdálenosti od povrchu a kopíruje jeho tvar. To umožňuje proudění chladicího média v těsné blízkosti dutiny, což má za následek mnohonásobně kvalitnější chladicí účinek. [29] [30]



Obrázek 13 - Klasický vrtaný chladicí okruh (vlevo) x konformní chlazení (vpravo) vytvořený DMLS [1]

Technologie DMLS nám v oblasti chlazení forem otevírá naprosto nové možnosti. Díky konformnímu chlazení, Obrázek 13 (vpravo), jsme schopni snížit dobu chladicího cyklu až o 50 %. U plastových vylisků konformní chlazení výrazně snížit riziko deformace. [29] [30]

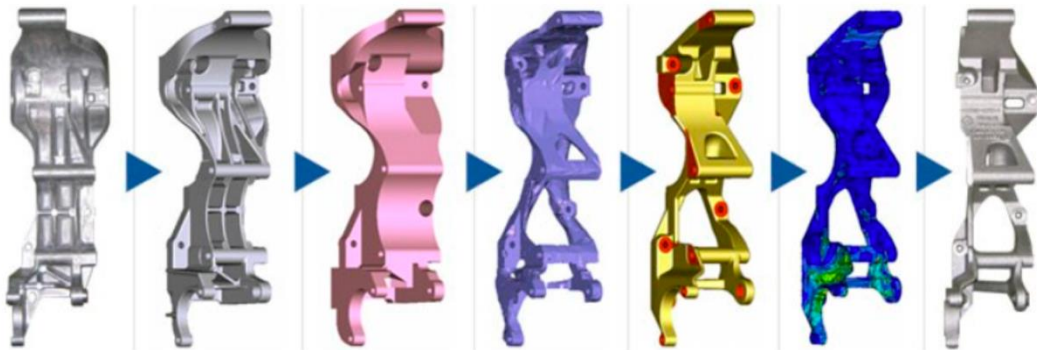
Dále nám konformní chlazení dovoluje optimalizovat chladicí okruh, jako je na Obrázek 14, pro jednotlivé odlitky a dosáhnout tak nejen homogenního odvodu tepla, ale také maximalizování potenciálu výroby. V neposlední řadě už při návrhu chladicího systému není omezující dostupná výrobní technologie, proto je možné díly neustále optimalizovat a dosáhnout požadovaných výrobních hodnot i časů. [29] [30]



Obrázek 14 - Konformní chlazení [31]

3.1.2 Topologická optimalizace

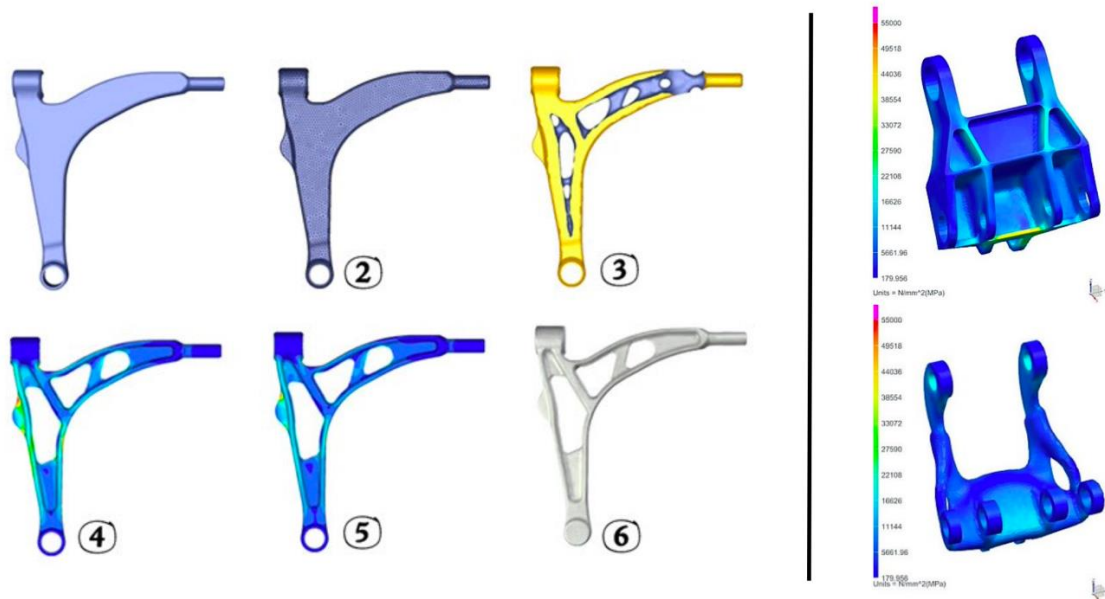
Jak již bylo zmíněno, zejména v automobilovém a leteckém průmyslu je snaha o maximální snížení hmotnosti konstrukčních celků, aniž by byly ohroženy jejich mechanické a konstrukční funkce. Jedním ze způsobů, jak těchto požadavků dosáhnout, je využití strukturální a topologické optimalizace součástí ve výpočtových programech. Tato optimalizace je založena na metodě konečných prvků (MKP), a spočívá v odstranění nepotřebného (nadbytečného) materiálu při zachování správné funkce modelované součásti. Výsledkem je optimalizovaná geometrie, obvykle tzv. bionického tvaru, který lze vyrobit díky technologiím aditivní výroby. Bionické konstrukce jsou podobné biologickým strukturám, které nelze vyrobit konvenčními metodami. [32] [33] [34]



Obrázek 15 - Optimalizační proces držáku kompresoru OptiStruct [35]

Na Obrázek 15 je zobrazen postup topologické optimalizace držáku kompresoru OptiStruct, ten obsahuje řešení topologické optimalizace příhradových konstrukcí se zaměřením na požadované vlastnosti (namáhání, vzpěr, výchylky a frekvence). [32] [33] [34]

Příkladem je úchyt v pravé části Obrázek 16 - vpravo nahoře je původní tvar (odlitek) a vpravo dole optimalizovaná bionická geometrie. [32] [33] [34]



Obrázek 16 - Ukázka topologické optimalizace [34]

Levá část Obrázek 16 ukazuje postup topologické optimalizace součásti. V tomto konkrétním případě se jedná o spodní rameno podvozku automobilu. Původní konstrukce byla optimálně zasíťována (2), poté byly stanoveny okrajové podmínky a ve vybrané oblasti byla provedena topologická optimalizace (3). Okrajovými podmínkami jsou především uložení a silové napětí součásti. Poté byla upravena, ověřena geometrie součásti (4) a redukce napětí (5). Výsledkem je optimalizovaná geometrie, která splňuje zadané podmínky a odlehčuje součást (6). Pro provádění topologických optimalizací je k dispozici řada softwarů, například: Abaqus, Altair, Ansys, Femap, Genesis, MSC Nastran, OptiStruct, ProTOp, Simulia (Tosca Structure) nebo SolidThinking Inspire. [32] [33] [34]

Topologická optimalizace však nemusí vždy vést k optimální geometrii s ohledem na možnosti aditivní výroby. Topologicky optimalizované návrhy mohou výrazně zvýšit množství podpůrných struktur, potřebných pro aditivní výrobu, což vede ke zvýšení výrobních nákladů a nákladů na následné zpracování. Proto je nutné, aby konstruktér myslel nejen na maximální úsporu hmotnosti součásti, ale také na efektivitu a ekonomickou rentabilitu výroby. Přidání podpůrných struktur zvyšuje výrobní čas a náklady na materiál. Výrobní náklady jsou nejvíce ovlivněny náklady na výrobní stroj, následují náklady na materiál. Podpůrné konstrukce lze obtížně odstranit a mohou se také nacházet na nepřístupných místech. To zvyšuje náklady na postprocessing. [32] [33] [34]

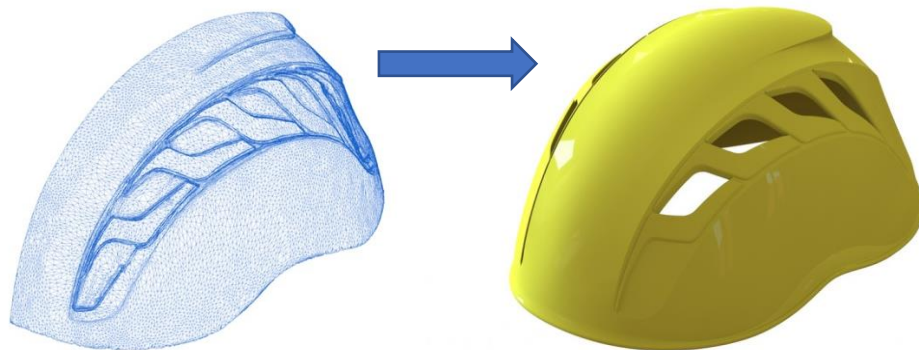


Obrázek 17 - Forma pro výrobu součástky do zavazadlového prostoru auta [36]

Topologická optimalizace ocelové formy je na Obrázek 17. Speciální software, který dopočítává nutné množství použitého materiálu v různých částech modelu, umožnil zkrátit výrobu formy pro výrobu součástky do zavazadlového prostoru automobilu ze čtyř měsíců na měsíc. Další možností odlehčení dílů je použití tzv. vnitřních struktur. Jedná se o strukturální mřížky, které umožňují výrobu pórovitých odlehčených oblastí. U běžně dutých struktur lze zesílení provést zavedením klasických vnitřních struktur. Aby bylo možné odstranit přebytečný neutěsněný prášek z vnitřních prostorů, kde byly vytvořeny struktury, jsou v součásti navrženy malé otvory pro jeho odstranění. Praktickým příkladem je odlehčená zkušební verze finálních výrobků. [32] [33] [34] [36]

3.1.3 Reverzní inženýrství

Jedním ze způsobů, jak urychlit proces vývoje, je reverzní inženýrství. Zkratka RE pochází z originálního názvu v anglickém jazyce Reverse engineering. V dnešním vysoce konkurenčním prostředí na světovém trhu je vyvíjen neustálý tlak na hledání nových způsobů, jak zkrátit vývoj nových složitých součástí, aby bylo možné uspokojit poptávku. Masivně se investuje především do technologií využívající softwaru CAD/CAM a velký rozvoj zažívá také rapid prototyping (technologie pro zrychlenou výrobu prvních prototypů pomocí 3D tisku). Reverzní inženýrství nachází uplatnění v různých oblastech, od výroby drahých komerčních dílů, nebo například v medicíně a letectví. Důležitou aplikací RE je oprava poškozených dílů bez výkresové dokumentace. Na rozdíl od tradičního procesu vývoje součástí, kdy vývoj začíná nápadem, pokračuje návrhem a končí finálním výrobkem, reverzní inženýrství začíná přesně opačně již existujícím výrobkem. Klasické inženýrství se na rozdíl od RE zaměřuje na kreativitu a originalitu. V případech, kdy nemáme k dispozici výrobní dokumentaci nebo jinou podpůrnou dokumentaci, nemáme jinou možnost než zkopírovat existující díl, počítačový model, software, nebo celou sestavu dílů. Důležitou součástí reverzního inženýrství je získání technické dokumentace výrobku a také analýza, měření a kontrola původního výrobku s cílem určit a sestavit původní výrobní postup. [37] [38]

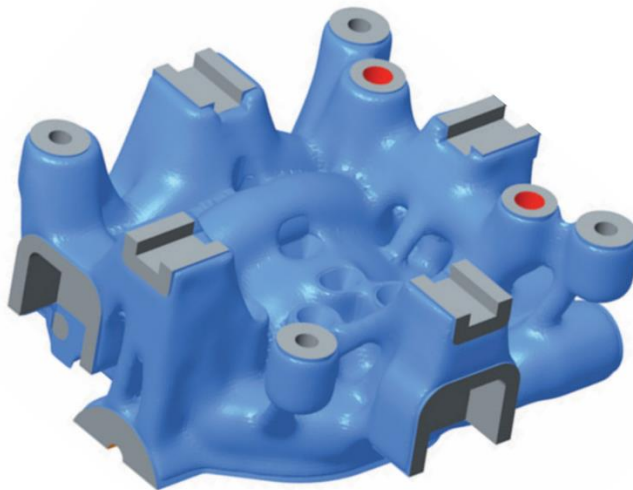


Obrázek 18 - Ukázka reverzního inženýrství [39]

Reverzní inženýrství lze také definovat jako získání modelu CAD z 3D bodů získaných skenováním povrchu součásti kontaktními nebo bezkontaktními metodami skenování, příklad na Obrázek 18. [37] [38]

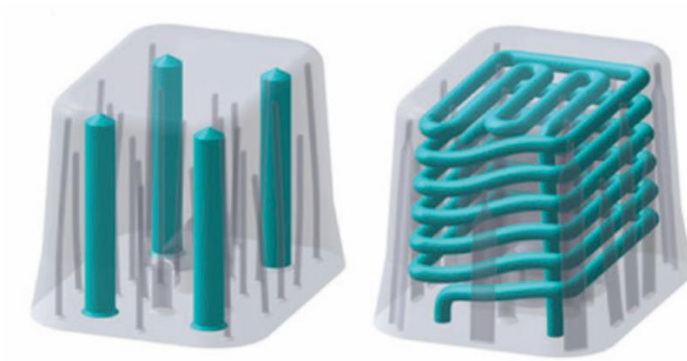
3.1.4 3D tisk částí forem

Aditivní technologie, v anglické literatuře Additive manufacturing– AM, přináší do celého procesu tlakového lití nespočet nových procesů a výhod. Nové trendy se dotýkají i vývoje a výroby forem, které jsou během tlakového lití využívány. Především nové požadavky z automobilového průmyslu jsou důvodem, proč je kladen na vývoj této technologie a využívání AM při návrhu licích forem velký důraz. [40]



Obrázek 19 - Topologicky optimalizovaná forma pro HPDC [40]

3D tisk forem technologií DMLS, která nám umožňuje využít a integrovat konformní chlazení, to je podrobněji popsáno v Kapitola 3.1.1 a zobrazeno na Obrázek 20. Výhody, proč se pro technologii 3D tisku při výrobě forem rozhodují velké automobilky je také možná topologická optimalizace vložky formy, ta byla popsána v Kapitola 3.1.2 je zobrazena na Obrázek 19. [40] Formy, zhotovené technologií DMLS, dosahují výrazně vyšší životnosti. 3D tištěné formy jsou schopné zkrátit dobu cyklu lití. Odlitky mají vyšší kvalitu nejen povrchu, ale i vnitřní struktury. Další značnou výhodou je možné zhotovení mnohem komplexnějších tvarů, to umožňuje vytvářet formy, kterých by jiným způsobem nebylo možné dosáhnout. Ovšem nevýhodou jsou vyšší výrobní náklady oproti konvenčním způsobům. [40]



Obrázek 20 - Příklad konformního chlazení formy pro HPDC [40]

Materiály pro výrobu forem technologií kovového 3D tisku jsou nyní vyvíjeny i přímo pro formy na tlakové lití. Například ocel L-40, která je popsána v Kapitola 3.1.5 byla speciálně vyvinuta pro technologii HPDC. Chemické složení této oceli bylo speciálně upraveno, aby ocel dosahovala správných mechanických vlastností pro maximální funkčnost forem. [40]

3.1.5 Nové materiály pro HPDC

Nástrojová ocel H13 - 1.2344

Díly z nástrojové oceli 1.2344 jsou známé svou vysokou tvrdostí v kombinaci s dobrou tažností. Díky legujícím prvkům lze selektivním tavením dosáhnout vynikajících vlastností materiálu. Prášek 1.2344 se používá především pro aditivní výrobu forem a nástrojů. Chemické složení v Tabulka 4. Díky svým charakteristickým vlastnostem je prášek vhodný pro použití v oblastech vystavených vysokému namáhání, protože odolává oděru při vysokém namáhání. Materiál má téměř homogenní strukturu a následným tepelným zpracováním lze vlastnosti dílů upravit tak, aby vyhovovaly požadavkům. Využívá se pro technologie 3D tisku při výrobě metalurgického nářadí, konkrétně při výrobě tlakových licích forem pro slitiny hliníku ve ŠKODA AUTO a.s. [41] [42]

Tabulka 4 - Chemické složení prášku 1.2344 [41]

| 1.2344 | Chemické složení | | | | | | | | |
|-----------|------------------|---------------|---------------|---------------|-------|------|------|---------------|---------------|
| Prvek | C | Cr | Mn | Mo | Ni+Cu | P | S | Si | V |
| Obsah [%] | 0,32- 0,45 | 4,75- 5,50 | 0,20- 0,60 | 1,10- 1,75 | 0,75 | 0,03 | 0,03 | 0,80- 1,25 | 0,80- 1,20 |

Nevýhodou tohoto materiálu jsou náročnější tisknutelné vlastnosti jako například u ocelového prášku 1.2709. Tato nevýhoda je způsobena relativně vysokým obsahem uhlíku v oceli, což vede k problémům, jako jsou vnitřní vady, pórovitost a tepelné trhliny. Tisk materiálu 1.2344 vyžaduje složité nastavení parametrů, například ohřev komory, což ne každý stroj umožňuje. Ocel je také známá jako H13, podle evropské normy X40CrMoV5-1. Stejně jako ostatní oceli je využíváno mnoho firemních označení, jako je například Böhler W302. Ve ŠKODA AUTO a.s. se používá značení dle evropské normy EN 1.2344 nebo značení americkou organizací AISI H13. Tato ocel se pro své dobré mechanické vlastnosti používá k výrobě forem pro tlakové lití a nástrojů pro lisování za tepla. [41]

SLM solutions nabízí ocelový prášek 1.2344 o velikosti částic 10-45 μm a přibližné hustotě 8 g/cm^3 . Výsledky mechanických vlastností, Tabulka 5, vycházejí z testování vzorků vytištěných na strojích SLM s výkonem laseru 400 W a tloušťkou vrstvy 30 μm . Zkoušky byly provedeny na vytištěných vzorcích bez tepelného zpracování a na vzorcích, které byly tepelně zpracovány následujícím způsobem: žhání při 750 °C po dobu 2 hodin, poté austenitizace při 1050 °C po dobu 15 minut a kalení v zahřátém oleji (přibližně 60 °C). Po ochlazení byly vzorky ihned dvakrát temperovány při teplotě 300 °C po dobu 2,5 hodiny s mezidobím ochlazení na pokojovou teplotu. [41] [42]

Tabulka 5 - Mechanické vlastnosti oceli 1.2344 [42]

| 1.2344 | SLM Solutions [42] | | |
|-------------------------|--------------------|-------------------|-------------|
| | Poloha tisku: | As built (bez TZ) | Vzorky s TZ |
| Rp _{0,2} [MPa] | Horizontální | 1244 ± 106 | 1719 ± 239 |
| | Vertikální | 1360 ± 86 | 1720 ± 99 |
| Rm [MPa] | Horizontální | 987 ± 39 | 1528 ± 32 |
| | Vertikální | - | - |
| A [%] | Horizontální | 2,00 | 4,00 |
| | Vertikální | 1,00 | 9,00 |

Ocel L-40

Ocel L-40 je jedním z nejnovějších produktů ve vývoji nástrojových materiálů. Byla patentována společností Nanosteel a v současné době je licencována společností Formetrix. Ocel L-40 byla navržena jako vysoce výkonná ocel, která poskytuje vysokou tvrdost v kombinaci se zvýšenou tažností bezprostředně po procesu tisku. Ocel L-40 byla rovněž přizpůsobena tak, aby se dala tisknout bez trhlin při pokojové teplotě. Zejména tato vlastnost přináší výhodu v porovnání proti méně výkonným maragingovým ocelím a obtížně tisknutelným nástrojovým ocelím, jako je například ocel H13. Cílem vývoje L-40 bylo poskytnout práškový materiál L-PBF pro výrobu nástrojů, zápusťek, forem a speciálních součástí. [43] [44]

Ocel L-40 je distribuována ve formě prášku. Specifikace velikosti prášku je upřesněna jako $D_{10}=20\ \mu\text{m}$, $D_{50}=33,4\ \mu\text{m}$ a $D_{90}=54,2\ \mu\text{m}$. Chemické složení L-40 uvádí Formetrix pouze v přibližných hodnotách, protože přesné a detailní složení je firmou chráněno. Specifikované chemické složení je shrnuto v Tabulka 6. [44]

Tabulka 6 - Chemické složení prášku L-40 [44]

| L-40 | Chemické složení | | | | | | |
|-----------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Prvek | Cr | Ni | Mo | Cu | Nb | C | N |
| Obsah [%] | max. 10,5 | min. 5,0 | min. 5,0 | min. 1,0 | min. 1,0 | min. 1,0 | min. 1,0 |

Obsah uhlíku bude u oceli L-40 mnohem nižší než u typických nástrojových ocelí H13 nebo H11 (podle tisknutelnosti za pokojové teploty). L-40 je založena na nižším obsahu uhlíku, což obvykle vede k tvorbě trhlin v tisku. Hlavním legujícím prvkem je chrom, který je velmi vhodný a typický pro oceli při práci za tepla (tepelná odolnost). Jedná se o práškovou slitinu železa s konečnou tiskovou tvrdostí do 70 HRc. Tepelné zpracování je volitelné, především na základě požadavků konečného využití. Parametry pro tepelné zpracování nejsou standardizovány. Pro tepelně zpracovaný stav je pevnost v tahu 1650 MPa v kombinaci s 10 % tažností. Ve stavu, v jakém je vyroben, je deklarována pevnost v tahu 1500 MPa s prodloužením minimálně 14 %. Tvrdost je pro stav po výrobě stanovena v rozmezí 46 až 48 HRc a po tepelném zpracování 50 až 52 HRc. Fyzikální vlastnosti v kombinaci s mechanickými vlastnostmi

byly speciálně navrženy pro použití v nástrojích. Například tepelná vodivost je velmi důležitá při vysokotlakém lití, protože materiál formy může rychle předávat teplo chladicí kapalině v chladicích kanálech. [45]

Při vysokotlakém lití hliníku (HPDC) se forma chladí pomocí chladicích kanálů umístěných uvnitř formy. Hliník při použití technologie HPDC může v kapalném stavu dosáhnout rychlosti až 200 km/h. Je zřejmé, že materiál formy se tímto procesem silně deformuje, aby se předešlo všem uvedeným vadám a byla splněna požadovaná životnost lící formy, je nutné dosáhnout všech požadavků na materiál výsledné formy. Požadavky jsou zmíněné v Kapitola 2.2. Aditivní výroba přinesla do výroby forem zcela nové možnosti. Jak již bylo zmíněno, AM umožňuje dosáhnout téměř každého požadovaného tvaru. Chladicí kanály mohou být umístěny téměř v každé oblasti formy s variabilitou průměru a zejména blíže k povrchu. To přináší výhody v podobě nižších provozních teplot (zejména povrchových), nižší doby cyklů a údržby. Uvedená myšlenka pokročilého chlazení se nazývá konformní chlazení, důkladnější popis této technologie je zmíněný v Kapitola 3.1.1. [45]

Nástrojová ocel M789 AMPO

Nástrojová ocel pro vysoce pevné formy a nástroje s vynikající odolností proti korozi, která ve svém chemickém složení (Tabulka 7) neobsahuje kobalt. M789 kombinuje vysokou tvrdost s vynikající odolností proti korozi. Tato nástrojová ocel je speciálně optimalizovaná pro procesy laserového tavení v práškovém loži. Patentovaná slitina kombinuje snadnou tisknutelnost maragingové oceli s korozní odolností. Slitina M789 AMPO nevyžaduje během tisku žádný předehřev a jednoduchým tepelným zpracováním může dosahovat tvrdosti 52 HRC. Vakuové indukční tavení a atomizace v inertním plynu zajišťují nejvyšší kvalitu výrobku. V závislosti na požadavcích konkrétního použitého procesu AM může ocelový prášek poskytnout vhodnou velikost částic v rozmezí 15-150 μm . [46]

Tabulka 7 - Chemické složení prášku M789 [46]

| M789 | Chemické složení | | | | | |
|-----------|------------------|-------|-------|------|------|------|
| Prvek | C | Cr | Ni | Mo | Al | Ti |
| Obsah [%] | min. 0,02 | 12,20 | 10,00 | 1,00 | 0,60 | 1,00 |

Tento materiál navíc vykazuje vynikající leštitelnost, je tedy vhodný pro výrobu vložek s konformním chlazením do forem pro vstřikování plastů a při jakémkoliv dalším způsobu použití, kde je vyžadována vysoká tvrdost a odolnost vůči korozi. [47]

Nástrojová ocel W360 AMPO

Ocel patří svým chemickým složením do skupiny ocelí vhodných pro práci za tepla. Po kalení a popouštění může W360 AMPO dosáhnout tvrdosti až 57 HRC s velmi dobrými houževnatými vlastnostmi. Materiál se vyznačuje vysokou odolností proti opotřebení, tepelnou odolností a houževnatostí. Nejčastěji se používá k tisku dílů s konformním chlazením pro tlakové lití, jako ochranná vrstva proti opotřebení jiných materiálů nebo pro opravy forem technologií navařování. W360 AMPO se musí tisknout při zvýšených teplotách nad 200 °C kvůli speciálnímu složení slitiny. [24] [48]

Výrobce uvádí dosažitelné mechanické vlastnosti vzorků W360 AMPO po tepelném zpracování. Materiál dosahuje poměrně vysoké tvrdosti až 57 HRC, pevnosti v tahu 1970-2010 MPa a meze kluzu 1500-1670 MPa. Výrobce testované vzorky byly vytištěny na dvou různých strojích s různými teplotami předehřevu 230 °C a 400 °C. Chemické složení v Tabulka 8. [24] [48]

Tabulka 8 - Chemické složení oceli W360 [48]

| W360 | Chemické složení | | | | | | |
|-----------|------------------|------|------|------|------|------|--------------|
| Prvek | C | Si | Mn | Cr | Mo | V | Co |
| Obsah [%] | 0,50 | 0,20 | 0,25 | 4,50 | 3,00 | 0,55 | max. 0,10 |

Další materiálový list od společnosti Böhler zaměřený na W360 AMPO naznačuje, jak zacházet s designem při návrhu nástrojů pro HPDC, a následné tiskové strategie navržené pro jejich materiál. Böhler W360 AMPO byl vytvořen jako prémiový materiál

speciálně určený pro tisk HPDC dílů. Při vývoji byl kladen důraz na to, aby v těchto aplikacích předčil tradiční oceli, jako jsou 1.2709, 1.2343 ESR (H11) a 1.2344 ESR (H13). Opět jsou zde zmíněny hlavní výhody tohoto materiálu, jako je vysoká houževnatost, vysoká odolnost proti mechanickému a tepelnému opotřebení a poměrně vysoká tvrdost. [49]

Heatvar

Nový materiál vhodný pro vysokotlaké tlakové lití hliníku. Heatvar je primárně určen pro technologie práškového tisku. Při vývoji se společnost Uddeholm zaměřila především na dva požadavky, a to na dobrou tisknutelnost a dobré vlastnosti pro použití v HPDC. Jedná se o precipitačně vytvrditelnou ocel s vysokou pevností. Materiál má vynikající vlastnosti, jako je vysoká tvrdost a pevnost za tepla, odolnost proti korozi, odolnost proti tepelné únavě, odolnost proti opotřebení a vysoká odolnost proti zpětnému rázu atd. Chemické složení je zobrazeno v Tabulka 9 [24] [50]

Tabulka 9 - Chemické složení prášku Heatvar [50]

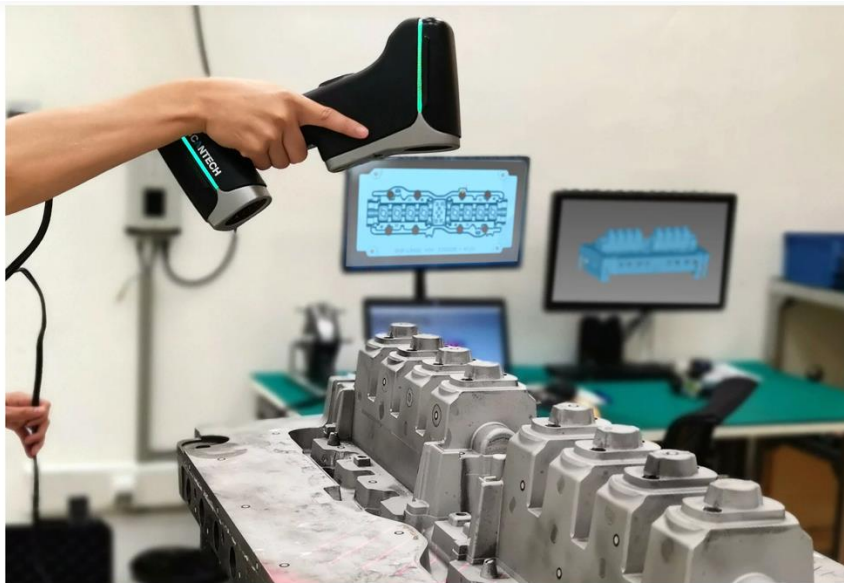
| Uddeholm Heatvar | Chemické složení | | | | | | |
|------------------|------------------|-------|------|------|------|-------|-------|
| Prvek | C | Co | Mo | Cr | Ni | P | S |
| Obsah [%] | 0,02 | 12,00 | 8,00 | 5,00 | 2,00 | 0,002 | 0,002 |

Studie [24] a [51] zkoumají materiál Uddeholm Heatvar. Vzorky byly testovány ve třech fázích, přímo po tisku, tepelně zpracované žháním a tepelně zpracované stárnutím. Po 4 hodinách stárnutí při 630 °C dosáhla slitina maximální pevnosti v tahu 1980 MPa a tvrdosti 52 HRC. Dalším testovaným vzorkem byl díl tepelně zpracovaný při 950 °C po dobu 0,5 h, čímž bylo dosaženo zlepšení tažnosti na 15 % ze 4 % a maximální pevnosti v tahu 1369 MPa. Bylo také zkoumáno, že při vystavení teplotě 620 °C po dobu 100 h klesne tvrdost slitiny Heatvar pouze z 52 HRC na 50 HRC, na základě čehož lze usuzovat, že je slitina vhodná pro použití v tepelně nepříznivých podmínkách. [24] [51]

Prášek byl dodán přímo společností Uddeholm a byl vyroben plynovou atomizací s rozsahem velikosti 15-45 μm . Vzorky byly vytištěny na zařízení EOS M290 s výkonem 200-250 W a tloušťkou vrstvy 30 μm . Autoři provedli tahové zkoušky, zkoušky tvrdosti a Charpyho zkoušky. Vzorky v základním stavu a stárnuící vzorky vykazovaly křehký lom, zatímco žíhané vzorky vykazovaly houževnatý lom. [51]

3.1.6 Opravy a modifikace forem

Nedílnou součástí výzev v tlakovém lití je i opravování a modifikace licích forem. Opravy tvarových ploch začínají porovnáním 3D dat, které jsou získány například 3D skenováním (Obrázek 21) s fyzickým dílem. Výstupem jsou data potřebná k posouzení náročnosti oprav, a také jako základ pro případné navařování chybějícího materiálu. Během modifikací licích forem je postup velice podobný, probíhá nejprve kontrola nových dat a jejich porovnání s fyzickým dílem, pro správné určení způsobu modifikace. [52]



Obrázek 21 - Ruční 3D laserové skenování [52]

Technologie DMLS našla uplatnění také při opravách forem. Pokud je rozsah poškození tak velký, že již nelze použít laserové svařování, a je třeba doplnit určitý objem chybějícího materiálu, je tato technologie ideální. V základním stavu může mít doplněný materiál mezní pevnost 1100 MPa a povrchovou tvrdost 36 až 39 HRC. Pokud se však materiál tepelně zpracuje, je možné dosáhnout mezní pevnosti až 1950

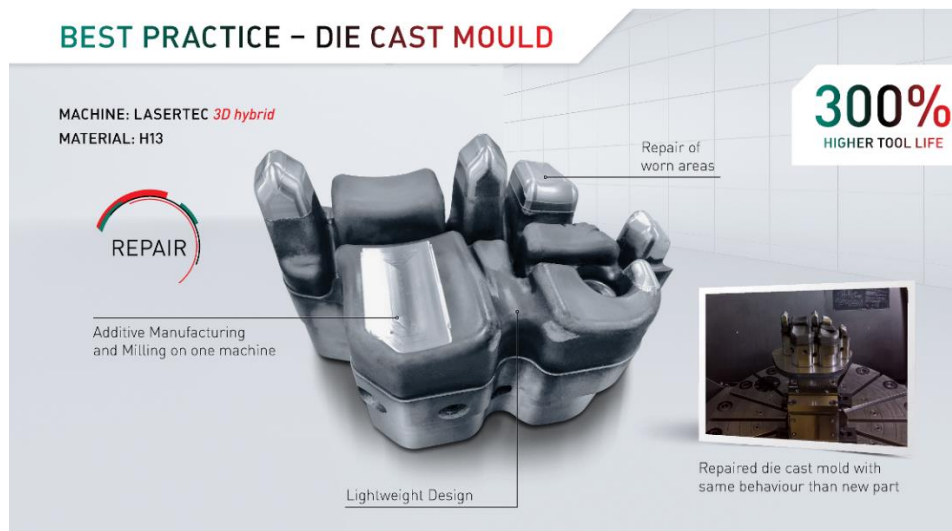
MPa a tvrdosti 50 až 54 HRC. Při použití relativně nízké teploty zůstává povrchová tvrdost původního dílu nezměněna a přidaný materiál má požadovanou tvrdost. [52]

Jak bylo již zmíněno, součástí oprav a modifikací forem je často navařování chybějícího materiálu, a následné opracování navařeného povrchu. Pro jemné navařování poškozených hran u dělicí roviny formy nebo pro šetrné navařování hran u nástrojů pro zpracování plechu se používá navařování laserem. Podle vlastností materiálu navařovaného dílu se zvolí vhodný typ návarového drátu a provede se nanesení návaru. Při potřebě nanesení větší, hrubé vrstvy materiálu se používá metoda TIG. Hrubé návary se potom opracovávají třískovým obráběním nebo elektroerozí, popřípadě kombinací těchto technologií. Jemné návary vždy nutně nevyžadují strojní opracování. Navaření chybějícího materiálu na formě pro HPDC je zobrazena na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**Obrázek 22 a Obrázek 23. [52]



Obrázek 22 - Navařování chybějícího materiálu na formu pro HPDC [52]

Pro navařování chybějícího materiálu na lící formu se používá například stroj DMG MORI Lasertec 65 nebo 125 DED (Direct Energy Deposition) hybrid, který kombinuje navařování laserem a 5osé frézování v jednom. Stroj umožňuje 5osé nanášení materiálu koaxiální tryskou pro homogenní distribuci prášku, nezávisle na směru laserového navařování. Výhodou je například Selektivní nanášení materiálů s tvrdostí více než 60 Rockwell, pro vyhnutí se procesům tepelného zpracování. [53]



Obrázek 23 - Příklad opravy formy z materiálu H13 metodou DED [54]

3.2 Strukturální díly

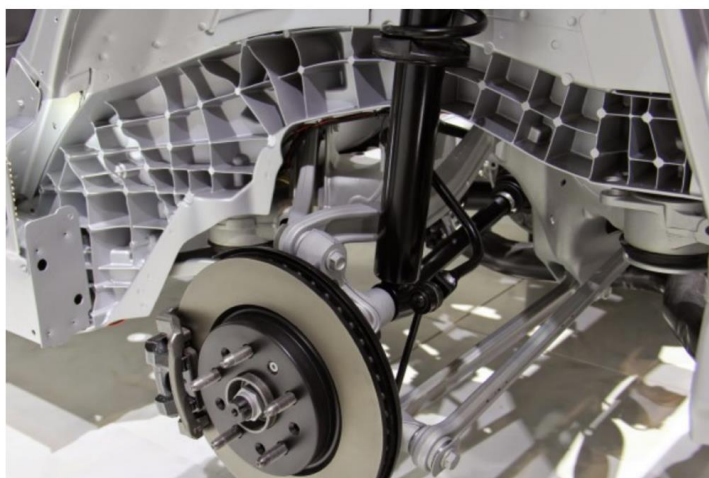
Automobilový průmysl čelí mnoha výzvám především kvůli požadavkům na snižování hmotnosti automobilů nejen ve spojitosti se snižováním emisí u automobilů se spalovacími motory, ale i s rozvojem hybridních aut a elektromobilů. I přesto, že požadavky na jednotlivé díly stále rostou se díky pokroku, vývoji nových slévarenských materiálů a zvládnutí metalurgických a technologických procesů umožnilo proniknutí odlitků do této oblasti. [3]



Obrázek 24 - Vyznačené strukturální díly na voze Cadillac CT6 [3]

Strukturální díly (často také strukturní díly) jsou v automobilovém průmyslu takové díly, které nesou hmotnost automobilu, absorbují rázy od nerovnosti vozovky, absorbují a přenášejí energii nárazu, jsou součástí ochrany pasažérů při nárazu, určují tvar karoserie nebo drží motor. Strukturální díly, zobrazeny na Obrázek 24, jsou na automobilu takové díly, které mají klíčovou roli v provozu automobilů a bezpečnosti pasažérů. Jmenovitě se jedná zejména o díly karoserie a podvozku, držáky motoru a platformy montáže jednotek řízení a náprav. V současné době se pro elektromobily pokouší automobilky aplikovat technologii strukturálních dílů i například na držáky baterií. [3]

Před dvaceti lety se strukturální díly začaly využívat v závodních automobilech. V té době se jednalo především o slitiny hořčíku. Bezpečnostně-hygienické problémy související s výrobou hořčíkových dílů, včetně problematické recyklace, však neumožnily proniknutí hořčíku do výroby sériových řad automobilů. Revoluci pro strukturální díly znamenal nástup slitin hliníku. V naprosté většině se jedná o díly plošné s malou tloušťkou stěny, v rozmezí 2 – 2,5 mm, jen ve výjimkách se jedná o díly vyšší tloušťky. Strukturální díly v sériové výrobě automobilového průmyslu dělíme na deformační, kde je sledována především tažnost, a díly pevnostní, kde je rozhodující mez kluzu a mez pevnosti v tahu. Dalším charakteristickým znakem je časté výrazné odlehčení strukturálních dílů. Odlehčení ovšem nesmí být na úkor maximální tuhosti. Strukturální díly jsou proto často žebrované do značných hloubek, jako na Obrázek 25. [3]

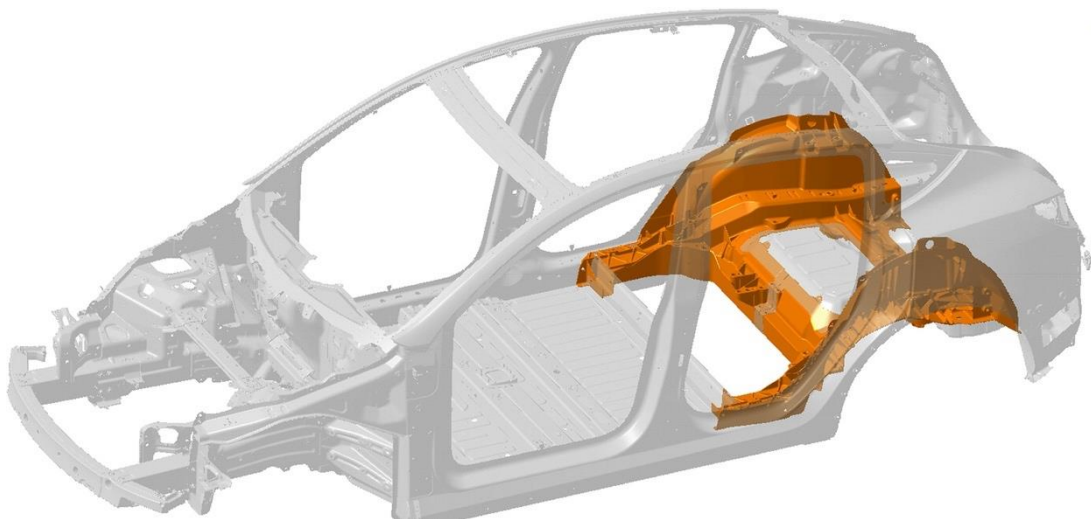


Obrázek 25 - Strukturální díl na voze Cadillac CT6 [3]

Slitiny pro strukturální díly jsou speciálně vyvíjeny, aby jejich složení maximálně zvýšilo mechanické vlastnosti. Ve slitinách se potlačuje obsah křemíku. Po odlití jsou slitiny nejčastěji komplexně tepelně zpracovány. Toto tepelné zpracování je složeno z rozpouštěcího žíhání a umělého stárnutí. Vzhledem k častému plošnému charakteru strukturálních dílů bývají odlitky často po tepelném zpracování rovnány. To se děje pomocí speciálních přípravků k uchycení dílu s následným, většinou rázovým dosažením plastické deformace k zajištění potřebného tvaru. [3]

3.2.1 Zadní část konstrukce podvozku vozu Tesla Model Y

Společnost Tesla představila novou strategii pro výrobu strukturálních dílů. Výrobce elektromobilů investuje do největšího stroje na tlakové lití hliníku na světě, který bude vyrábět celé zadní struktury podvozku. Hliník a jeho slitiny jsou ve většině současných referenčních bodů automobilového inženýrství synonymem pro "úsporu hmotnosti". Kromě několika málo aplikací, jako například zejména u pickupů Ford řady F, jsou hliníkové díly používány převážně tam, kde lze ocel snadno nahradit bez ztráty výkonu, nebo pro relativně malé komponenty, které přinášejí relativně malé úspory hmotnosti a výrobních procesů. [28]

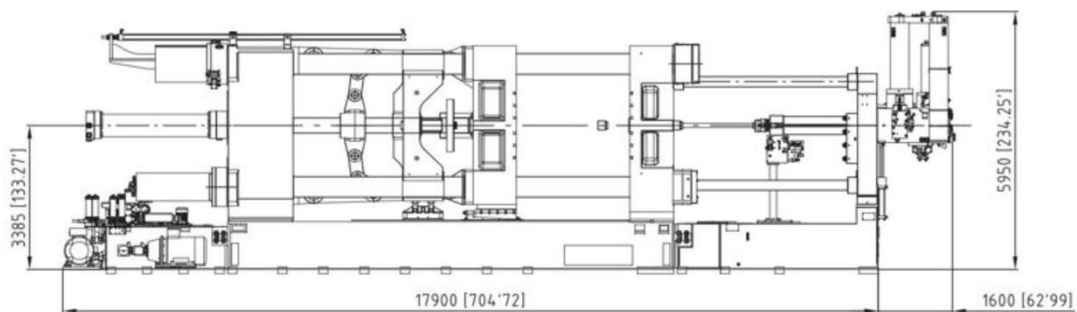


Obrázek 26 - Ukázka umístění odlitku v Modelu Y [28]

Výrobce elektromobilů Tesla však připravuje další krok v používání hliníkových strukturálních dílů. Krok, který se účinně vyrovná přístupu Fordu, když začíná vyrábět masivní kus konstrukčního tlakově litého hliníku pro zadní spodní část nedávno uvedeného crossoveru Model Y, Obrázek 26. Tato nová aplikace hliníku znamená radikální krok pro jeho konstrukční a výrobní výhody a potenciál odlehčení. [28]

V případě zadní podvozkové části Modelu Y odlévané pod tlakem, při využití největšího tlakového lisu „Giga Press“, který má odborný název OL 6200 CS. Pro společnost Tesla tento lis navrhla a vyrobila italská společnost IDRA Group. Jedná se o naprosto nový pohled, jak vyrábět velké strukturální díly. Současná verze Modelu Y má v podstatě dva velké hliníkové odlitky z vysokotlakého odlitku (HPDC), které jsou spojené, a je k nim ještě připojena řada dalších dílů. Další verze Modele Y by měla obsahovat už pouze jeden odlitek, který bude tvořit základnu celého podvozku, do něhož budou integrovány i zadní ochranné lišty. [28] [55]

"Giga Press" - OL 6200 CS společnosti IDRA měří na délku přibližně 19,5 m a na výšku 5,9 m. Spolu s vyšší upínací silou je maximální hmotnost "broku" z hliníkové slitiny 104,6 kg. Výstupem OL6100 mohou být lehké odlitky, ale samotný stroj váží více než 410 tun. "Giga Press" je zobrazen na Obrázek 27 [56]



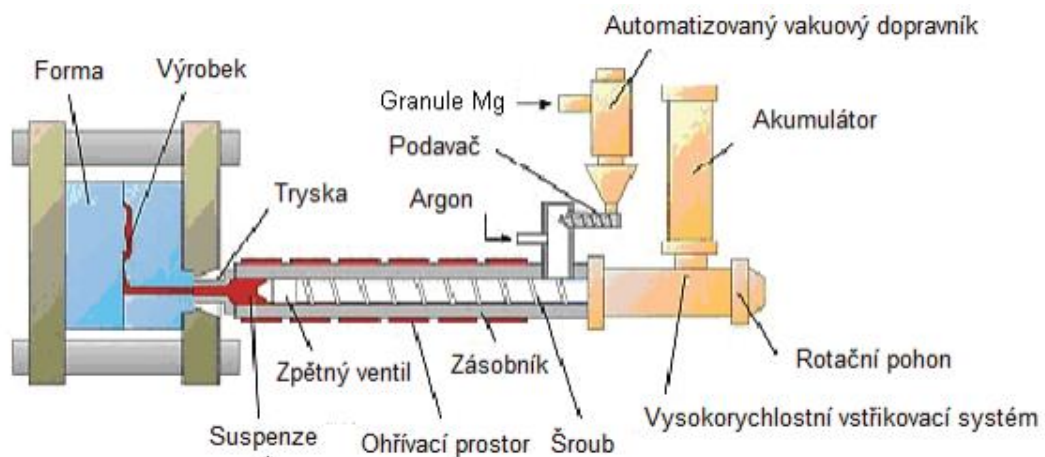
Obrázek 27 - Technický výkres stroje OL 6200 CS [56]

Jednodílný odlitek pro Model Y nahradí přibližně 70 výlisků a odlitků, které v současné době tvoří stejnou vyráběnou sestavu v Modelu 3, na kterém je podvozek Modelu Y založen. Elon Musk, zakladatel společnosti Tesla, prohlásil, že společnost Tesla očekává úspory ve výši 20 % na pracovní sílu. Ještě zásadnější by měla být úspora plochy ve výrobních halách, odhadem přinese 30% snížení velikosti karosárny. [28]

3.3 Semi-solid metal casting

Semi-solid metal casting, dále už jen SSM je proces na mimořádně vysoké úrovni, který umožňuje dosahovat vynikajících výsledků a je vhodný pro velmi specifické výrobní linky. [57] [58]

Proces SMM je vlastně variantou vysokotlakého tlakového lití a je založen na využívání neželezných kovů (hořčík, měď a hliník). Efektivně propojuje výhody slévání a kování. [59]



Obrázek 28 - Schéma výrobního zařízení pro Thixomoulding [59]

Základním principem této technologie je, že nedochází k úplnému roztavení odlévané slitiny, aby bylo možné tohoto stavu dosáhnout je zapotřebí využívat velmi přísně řízené procesy ohřevu. Tyto procesy jsou nastaveny tak, aby se roztavilo až 60 % kovu; zbývajících 40 % zůstává v pevném stavu. Tím se změní mikrostruktura a materiál získá velmi nízkou odolnost vůči smykové deformaci, což je patrné zejména u hliníkových slitin, kde je standardní dendritická struktura nahrazena zaoblenější, kulovitou mikrostrukturou. Tento polotuhý kov se pak přivádí do tvářecího stroje, kde je vtlačen, vstříknut nebo vytlačen do kovové formy. Výsledná součást má velmi vysoké mechanické vlastnosti díky velmi jemné mikrostruktuře a téměř úplné absenci pórovitosti. [57] [59]

Klíčem k tomuto systému odlévání je řízený ohřev slitiny. První ze tří metod, Thixocasting, začíná zahříváním pevných tyčí slitiny, která má být odlita, v teplotním rozmezí mezi solidem a liquidem. Druhá metoda, Rheocasting, zahrnuje ochlazení kapalně slitiny na teplotu mezi solidem a liquidem. Třetí metoda, Thixomolding, která je popsána na Obrázek 28, spočívá v podávání granulovaného materiálu do vyhřívaného vstřikovacího stroje poháněného šroubovitým dopravníkem. První dvě metody se používají především pro hliníkových slitiny, třetí metoda se častěji používá u hořčíkových slitin. Díly z odlévaných hliníkových slitin SSM mají lepší mechanické vlastnosti než běžné lité díly. Díly jsou také pevnější a přesnější. [57] [58]



Obrázek 29 - Řídící rameno pro Ford GT [58]

Konstrukční aplikace tohoto výrobního postupu byla do současné doby omezena na malou řadu dílů pro speciální a závodní vozidla vyráběných v krátkých sériích, především kvůli vysokým nákladům spojeným s materiálem a výrobními zařízeními. Jedním z příkladů využití jsou řídicí ramena pro Ford GT. Příklad řídicího ramena můžete vidět na Obrázek 29. [58] [59]

3.4 Shrnutí teoretické části a stanovení cílů

V rešeršní části byly nalezeny a popsány moderní trendy v HPDC. Moderní trendy naznačují tendenci např. společnosti Tesla ve vývoji technologických postupů pro velké díly zhotovené technologií HPDC, kde pro tento účel využívá Tesla stroj „Giga Press“. Dalšími moderní trendy v HPDC je využívání strukturálních dílů v konstrukci automobilů. Strukturální díly snižují časové nároky spojené s výrobou a montáží, a zároveň mají strukturální díly ze slitin hliníku velice nízkou hmotnost. Rešerše moderních trendů ukázala jako rozvíjející se odvětví semi-solid casting. Dále oblast aditivní výroby jako velice moderní oblasti, které je potřeba z důvodů vysokých požadavků, jako jsou nároky na mechanické vlastnosti, ekologii, a především cenu dílů, nutně věnovat.

V návaznosti na výzkum realizovaný ČVUT bylo rozhodnuto o analýze, zkoumání a porovnání prémiových materiálů pro kovový 3D tisk nástrojů pro vysokotlaké lití. Praktická část navazuje na studie Andronov [27], Kubíková [42], Kment [45] a Stárek [24], kteří se ve svých pracích také zabývali nástrojovými materiály pro 3D tisk. V praktické části byl zkoumáný prémiový prášek L-40 a pro porovnání výsledků i prémiový materiál konvenční výroby W360. Následně byly všechny materiály seřazeny do přehledu materiálů, který byl vytvořen v Kapitola 4.5.

4 Praktická část

Tato kapitola práce navazuje na Kapitola 3.1.5, kde jsou popsány nové materiály pro kovový 3D tisk, které jsou ve velkém využívány pro tisk částí forem pro HPDC. V této kapitole budou provedeny zkoušky mechanických vlastností získaných vzorků z materiálů, které jsou považovány za prémiové a za budoucnost v oblasti spojení AM a HPDC. Pro analýzu vybraných materiálů, kterými jsou tištěné vzorky oceli L-40 a vzorky W360 vyrobené konvenčně válcováním, bude provedena zkouška tahem a zkouška rázem v ohybu metodou Charpy.

Vzorky oceli W360, které byly v počtu 3 vzorky na zkoušku tahem a 3 vzorky pro zkoušku rázem v ohybu metodou Charpy, byly vyrobeny konvenční technologií dle výkresové dokumentace. Vzorky z oceli L-40 byly vytištěny na tiskárně TRUMPF TruPrint 1000 (maximální výkon laseru 200 W), prášek oceli L-40 byl dodán společností Formetrix. Vzorky byly vytištěné, stejně jako ve studii Kment [45], s procesními parametry níže uvedenými.

Procesní parametry:

- Výška vrstvy 40 μm .
- Výkon laseru 175–200 W.
- Rychlost skenování 400–900 mm/s.
- Poloha vzorku na platformě 90° = vertikálně.

4.1 Metodika testování

Přestože norma pro zkoušku tahem ČSN EN ISO 6892-1 a norma pro zkoušku rázem v ohybu metodou Charpy ČSN EN ISO 148-1:2017 stanovují minimální počet vzorků pět kusů, v práci jsem z ekonomických důvodů mohl využít pouze tři vzorky pro každou zkoušku. Pouze pro ocel L40 se podařilo zařídit 5 testovacích vzorků.

4.2 Zkouška tahem

Jedná se o statickou zkoušku, která spočívá v postupném zatěžování zkušební tyče rostoucí tahovou silou, obvykle až do úplného selhání zkušební vzorku. Účelem zkoušky je zjistit pevnost a charakteristiku plasticity materiálu. Během zkoušky se zaznamenává závislost zatěžující síly na prodloužení. Pomocí extenzometru nebo tenzometru se sleduje prodloužení zkušební tyče. Sestrojený diagram může mít dvě podoby. První, pracovní diagram, je závislost síly na prodloužení. Druhou podobou je smluvní diagram, kde se zaznamenává závislost napětí na deformaci. Zkouška se provádí za účelem získání hodnot, jako je napětí na mezi kluzu, napětí na mezi pevnosti a celkové prodloužení materiálu. [60]

Zkouška byla prováděna v Ústavu strojírenské technologie na Fakultě strojní ČVUT na zařízení LabTest 5.100SP1, které je zobrazeno na Obrázek 30. Zkouška probíhala dle normy ČSN EN ISO 6892-1.



Obrázek 30 - Zařízení LabTest 5.100SP1 [24]

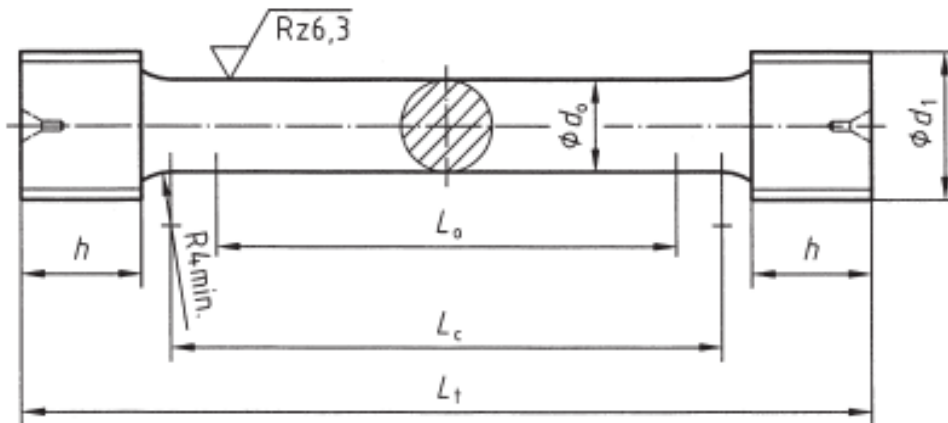
Parametry, nastavené na stroji při provádění tahové zkoušky jsou zobrazeny na Obrázek 31.

| | |
|-----------------------------|--|
| Zkušební norma: | Tahová zkouška kovu - DIN EN ISO 6892-1 |
| Typ stroje: | 48/17 |
| Snímač síly: | 100kN |
| Průtahoměr: | extenzome |
| Upínací přípravek: | ne |
| Zkušební prostor: | Spodní zkušební prostor |
| Rozměry vzorku: | $h = 1 \text{ mm}$; $m = 1 \text{ g}$ |
| Zadání délek: | $L_e = 32,18 \text{ mm}$; $L_c = 50 \text{ mm}$; $L_0 = 50 \text{ mm}$ |
| Zkušební rychlosti: | $V_0 = 1,5 \text{ mm/min}$; $V_1 = 1,5 \text{ mm/min}$ |
| Přepínací body: | $F_0 = 100 \text{ N}$ |
| Kriterium ukončení zkoušky: | Síla = 85000 N; $dF = 85 \%$ |

Obrázek 31 - Nastavené parametry při zkoušce Tahem [vlastní archiv]

4.2.1 Zkušební tělesa

Tvar a rozměr zkušebních tyčí jsou dány normami a zobrazeny na Obrázek 32. Vzorky byly vyrobeny podle normy DIN 50125-2, které se používají pro testování ve ŠKODA AUTO a.s. Tyče jsou do měřicího stroje upínány pomocí závitu, který je normou označen jako typ B. [61]



Obrázek 32 - Výkres zkušební tyče pro zkoušku tahem

Pro zkoušku bylo využito celkem čtrnáct vzorků. Z toho devět vzorků byly vyhotoveny z oceli Böhler W360. Ve skupinách po třech vzorcích byla první skupina bez tepelné úpravy, druhá skupina obsahovala vzorky s tvrdostí 50 HRC a poslední skupina obsahovala vzorky s tvrdostí 57 HRC. Druhý materiál využitý pro tahovou zkoušku byla ocel L40.

4.2.2 Naměřené hodnoty

Získané hodnoty při zkoušce tahem jsou zaznamenány v tabulkách níže. Během zkoušky byly zaznamenány následující údaje: smluvní mez kluzu, smluvní mez pevnosti a celková tažnost. Teplota okolního vzduchu v laboratoři během zkoušky byla 20 °C.

Nejdříve jsou zde uvedeny tři tabulky (Tabulka 10, Tabulka 11, Tabulka 12), kde každá z těchto tabulek obsahuje naměřené hodnoty pro různé tepelné úpravy oceli Böhler W360. Tabulka 13 obsahuje naměřené hodnoty pro ocel L40.

Tabulka 10 - Výsledky zkoušky tahem pro ocel Böhler W360 (bez tepelného zpracování)

| Böhler W360 | Vlastní práce | | | |
|-------------------------|---------------|-------|-------|-----------------------|
| Bez tep. Úpravy | BT-V1 | BT-V2 | BT-V3 | ∅BT-V |
| R _{p0,2} [MPa] | 341 | 329 | 345 | 338,33 ± 6,79 |
| R _m [MPa] | 596 | 582 | 570 | 582,67 ± 10,63 |
| A [%] | 24 | 21,05 | 23,89 | 22,98 ± 1,37 |

Tabulka 11 - Výsledky zkoušky tahem pro ocel Böhler W360 (50 HRC)

| Böhler W360 | Vlastní práce | | | |
|-------------------------|---------------|-------|-------|------------------------|
| 50 HRC | 50-V1 | 50-V2 | 50-V3 | ∅50-V |
| R _{p0,2} [MPa] | 1670 | 1577 | 1731 | 1659,33 ± 63,32 |
| R _m [MPa] | 1902 | 1873 | 1918 | 1897,67 ± 18,63 |
| A [%] | 4,87 | 4,96 | 4,83 | 4,89 ± 0,05 |

Tabulka 12 - Výsledky zkoušky tahem pro ocel Böhler W360 (57 HRC)

| Böhler W360 | Vlastní práce | | | |
|-------------------------|---------------|-------|-------|-------------------------|
| 57 HRC | 57-V1 | 57-V2 | 57-V3 | ∅57-V |
| R _{p0,2} [MPa] | 1561 | 1218 | 1786 | 1521,67 ± 233,55 |
| R _m [MPa] | 2025 | 2062 | 2046 | 2044,33 ± 15,15 |
| A [%] | 6,53 | 7,04 | 6,20 | 6,59 ± 0,35 |

Tabulka 13 - Výsledky zkoušky tahem pro ocel L40

| L40 | Vlastní práce | | | | | |
|-------------------------|---------------|------|------|------|------|----------------------|
| | L-V1 | L-V2 | L-V3 | L-V4 | L-V5 | ∅L-V |
| R _{p0,2} [MPa] | 764 | 902 | 846 | 762 | 764 | 807,6 ± 57,04 |
| R _m [MPa] | 1023 | 1102 | 1121 | 1004 | 1022 | 1054,4 ± 47,5 |
| A [%] | 1,20 | 1,11 | 1,25 | 1,04 | 1,10 | 1,14 ± 0,08 |

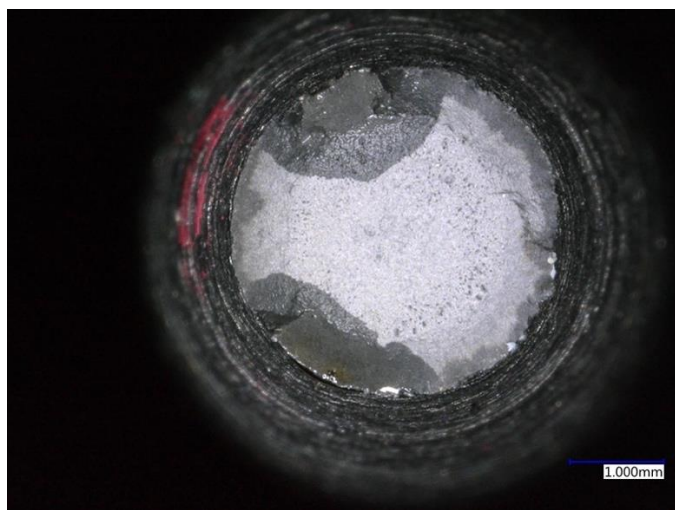
Získané hodnoty při tahové zkoušce vykazují určité odchylky. Pro eliminaci chyb a upřesnění hodnot pro závěrečné zhodnocení je nutné zavést aritmetický průměr a jeho směrodatnou odchylku. Tyto hodnoty jsou obsaženy v Tabulka 14.

Tabulka 14 - Aritmetické průměry výsledků zkoušky tahem

| | Vlastní práce | | | |
|-----------------------|----------------|-----------------|------------------|---------------|
| | ∅BT-V | ∅50-V | ∅57-V | ∅L-V |
| ∅R _p [MPa] | 338,33 ± 6,79 | 1659,33 ± 63,32 | 1521,67 ± 233,55 | 807,6 ± 57,04 |
| ∅R _m [MPa] | 582,67 ± 10,63 | 1897,67 ± 18,63 | 2044,33 ± 15,15 | 1054,4 ± 47,5 |
| ∅A [%] | 22,98 ± 1,37 | 4,89 ± 0,05 | 6,59 ± 0,35 | 1,14 ± 0,08 |

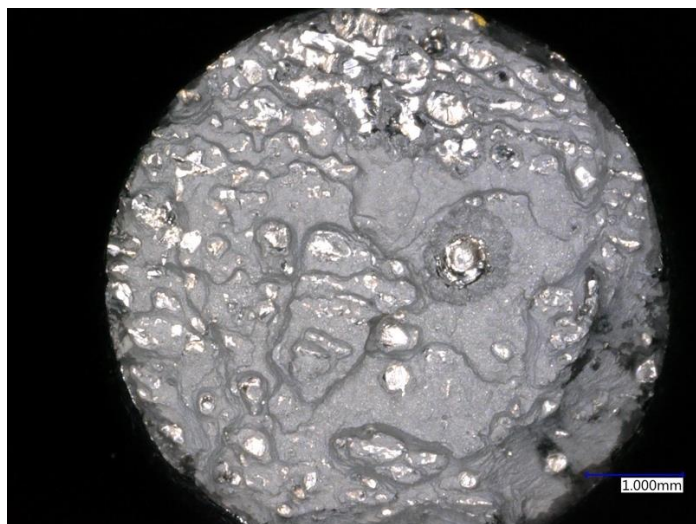
4.2.3 Analýza lomových ploch

Pro analýzu lomové plochy byly vybrány vzorky BT-V2, který je z oceli W360 bez tepelného zpracování, a vzorek L-V5 z ocelového prášku L-40.



Obrázek 33 - Detail zkušebního tělesa BT-V2 [vlastní archiv]

Na Obrázek 33, je snímek vzorku BT-V2 je vidět částečně houževnatý lom. Vzorek bez tepelného zpracování dosáhl nižších hodnot meze kluzu a meze pevnosti, měl ovšem mnohonásobně vyšší hodnoty tažnosti.



Obrázek 34 - Detail zkušebního tělesa L-V5 [vlastní archiv]

Na Obrázek 34 je zobrazen snímek vzorku L-V5, který byl vytisknutý z ocelového prášku L-40. Tažnost byla u vzorku naměřena nižší, než bylo uvedeno výrobcem, příčinou mohou být částičky spečeného prášku, které jsou na obrázku viditelné, další možné příčiny jsou uvedeny v kapitole 4.4.

4.3 Zkouška rázem v ohybu

Dynamická zkouška rázem v ohybu metodou Charpy je zkouška, kde zjišťujeme hodnotu rázové houževnatosti. Jedná se o destruktivní zkoušku, kde zkušební těleso opatřené vrubem nejčastěji tvaru V, případně U, je umístěno na podpěrách vrubem otočeným směrem od kladiva a je přeraženo kladivem opatřeným břitem. Před začátkem měření je potřeba celé zkušební těleso řádně změřit. Především je nutné změřit výšku a šířku pod vrubem. Tyto údaje budou použity pro dopočítání plochy a pro výsledný výpočet vrubové houževnatosti. Při samotné zkoušce se totiž odečítá absorbovaná energie [J] daného materiálu. Vrubová houževnatost se následně dopočítává z vzorce. [60]

$$KCV = \frac{KV}{S} [J/cm^3]$$

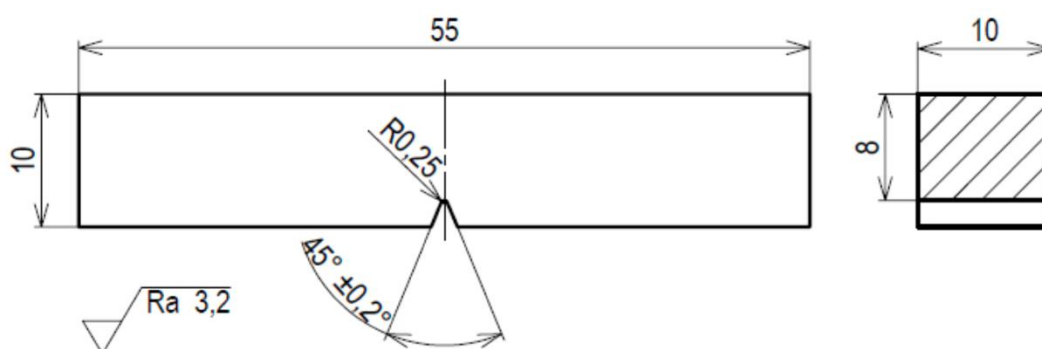
Zkouška byla prováděna na Ústavu strojírenské technologie na Fakultě strojní. Zkouška probíhala dle normy ČSN EN ISO 148-1:2017. Pro zkoušku bylo použito kladivo s energií 150 J, které je zobrazeno na Obrázek 35.



Obrázek 35 - Kladivo Charpy [vlastní archiv]

4.3.1 Zkušební tělesa

Pro zkoušku byly vyrobeny standardní vzorky dle normy ČSN ISO 148-1:2017 s vrubem V, Obrázek 36. Norma také předepisuje přesné rozměry měřených vzorků. Šířka profilu musí být 5; 7,5 nebo 10 mm. Drsnost povrchu obrobeného vzorku je předepsána 3,2 μm .



Obrázek 36 - Výkres zkušebního tělesa pro zkoušku rázem

Pro zkoušku bylo využito celkem čtrnáct vzorků. Z toho devět vzorků bylo vyhotoveno z oceli Böhler W360. Ve skupinách po třech vzorcích byla první skupina bez tepelné úpravy, druhá skupina obsahovala vzorky s tvrdostí 50 HRC a poslední skupina

obsahovala vzorky s tvrdostí 57 HRc. Druhý materiál využitý pro tahovou zkoušku byla ocel L40.

4.3.2 Naměřené hodnoty

Hodnoty získané při zkoušce rázem v ohybu metodou Charpy jsou zaznamenány v Tabulka 15. Hodnoty rázové houževnatosti jsou dopočítány podle vzorce zmíněného v kapitole 4.3. Teplota vzduchu při průběhu zkoušky byla naměřena 20 °C.

Tabulka 15 - Výsledky zkoušky rázem pro ocel Böhler W360 a prášek L-40

| Böhler W360 | Vlastní práce | | | | | |
|--------------------------|---------------|-------|-------|------------------|------|------------------|
| Bez tepelné úpravy | BT-O1 | BT-O2 | BT-O3 | øBT-O | | |
| KV [J] | 49 | 46 | 42 | 46 ± 2,87 | | |
| KCV [J/cm ²] | 58 | 54 | 50 | 54 ± 3,42 | | |
| 50 HRc | 50-O1 | 50-O2 | 50-O3 | ø50-O | | |
| KV [J] | 13 | 13 | 14 | 13 ± 0,47 | | |
| KCV [J/cm ²] | 16 | 16 | 17 | 16 ± 0,55 | | |
| 57 HRc | 57-O1 | 57-O2 | 57-O3 | ø57-O | | |
| KV [J] | 10 | 7 | 9 | 9 ± 1,25 | | |
| KCV [J/cm ²] | 12 | 8 | 11 | 10 ± 1,45 | | |
| L-40 | L-O1 | L-O2 | L-O3 | L-O4 | L-O5 | øL-O |
| KV [J] | 14 | 12 | 11 | 9 | 11 | 11 ± 1,63 |
| KCV [J/cm ²] | 17 | 14 | 13 | 11 | 13 | 13 ± 1,93 |

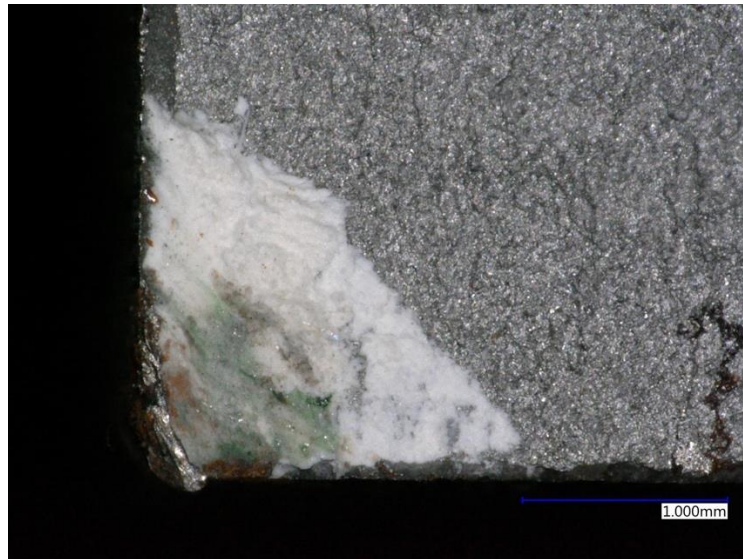
Hodnota výšky pod vrubem v_1 byla dopočítána jako rozdíl výšky vzorku b a hloubky vrubu v . Plocha pod vrubem byla dopočítána jako součin výšky pod vrubem v_1 a tloušťky vzorku a . Protože pro dopočítání hodnoty KCV je nutný rozměr plochy v cm², je tento součin vydělen 100. Výsledky se u jednotlivých vzorků lehce liší, proto opět zavedeme aritmetický průměr naměřených hodnot, ten pomůže při eliminaci chyb měření. Získané hodnoty jsou v Tabulka 16

Tabulka 16 - Aritmetické průměry výsledků zkoušky rázem

| | Vlastní práce | | | |
|---------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | øBT-O | ø50-O | ø57-O | øL-O |
| øKV [J] | 46 ± 2,87 | 13 ± 0,47 | 9 ± 1,25 | 11 ± 1,63 |
| øKCV [J/cm ²] | 54 ± 3,42 | 16 ± 0,55 | 10 ± 1,45 | 13 ± 1,93 |

4.3.3 Analýza lomových ploch

Tato analýza slouží k vyhodnocení zkoušky metodou Charpy a pro určení druhu lomu. Na Obrázek 37 lze pozorovat křehký lom a nejspíše určitou nehomogenitu materiálu v levém rohu vzorku. Roh má jasně odlišný vzhled než zbytek lomové plochy. Zájmovostí je, že porucha neměla žádný vliv na hodnotu vrubové houževnatosti.



Obrázek 37 - Detail zkušebního tělesa 50--03 [vlastní archiv]

U vzorku L-01 z prášku L-40 je možné na Obrázek 38 pozorovat křehký lom. Stejně jako u vzorků tisknutých pro tahovou zkoušku lze pozorovat spečený prášek. Základní procesní parametry tisku jsou uvedeny v Kapitola 4.



Obrázek 38 - Detail zkušebního tělesa L-01 [vlastní archiv]

4.4 Porovnání naměřených hodnot s hodnotami z rešerše

Naměřené a dopočítané hodnoty pro ocel L-40 budou porovnány s hodnotami mechanických vlastností získaných ze studie Kment [45] a naměřené a dopočítané hodnoty pro ocel W360 s hodnotami, které byly uvedeny v materiálovém listu.

Tabulka 17 - Porovnání mechanických vlastností prášku L-40

| L-40 | Mechanické vlastnosti | |
|--------------------------|-----------------------|---------------|
| | BP Kment [45] | Vlastní práce |
| Rp _{0,2} [MPa] | - | 807,6 ± 57,04 |
| Rm [MPa] | 1182,0 ± 81,0 | 1054,4 ± 47,5 |
| A [%] | 5,00 ± 1,4 | 1,14 ± 0,08 |
| KV [J] | 10 ± 0,50 | 11 ± 1,63 |
| KCV [J/cm ²] | - | 13 ± 1,93 |

Hodnoty tažnosti získané v naší práci se značně rozcházejí od hodnot naměřených ve studii Kment [45]. Rozdílné hodnoty jsou zobrazeny v Tabulka 17. Nejpravděpodobnější příčinou rozdílů v mechanických vlastnostech se zdá být to, že vzorky byly tištěny z prášku, který byl již několikrát použit pro dřívější tisky. Dalšími příčinami by mohla být poloha vzorků na platformě, nebo strategie skenování Chessboard, která je v u tiskárny TruPrint 1000 doporučena pro tisk nástrojových ocelí, ovšem dodavatel vzorků tvrdí, že pozorovali zhoršené mechanické vlastnosti v případě využití právě této strategie. Nedá se vyloučit ani vliv způsobu provedení zkoušky tahem. Dále byly pozorovány nedokonalosti v podobě pórů na lomových plochách.

Vzhledem k rozporu v získaných hodnotách, byly do závěrečného přehledu zahrnuty údaje, získané ve studii Kment [45] a zároveň i této práce.

4.5 Přehled materiálů

Tento přehledy obsahuje informace o materiálech získaných v praktické části a zároveň to bylo porovnáno s hodnotami z analyzovaných studií.

V Tabulka 18 jsou uvedeny mechanické vlastnosti materiálů, přičemž jsou vždy vybrány nejlepší dosažitelné hodnoty udávané výrobcem, případně doplněné o informace ze studií, pokud byly vzorky zpracovány stejným způsobem. Chybějící údaje jsou v rámečcích přeškrtnuty. Bohužel nejsou uvedeny výrobcem a nebyly zpracovány v žádné studii.

Tabulka 18 - Přehled materiálů a mechanických vlastností

| Materiál | R _{Po,2} [MPa] | | R _m [MPa] | | A [%] | | KCV [J/cm ²] | |
|----------------------|-------------------------|-----------------|----------------------|-----------------|--------------|-------------|--------------------------|-----------|
| | As built | Po TZ | As built | Po TZ | As built | Po TZ | As built | Po TZ |
| 1.2709 [26] | 1100 ± 100 | 2013 ± 16 | 1200 ± 100 | 2094 ± 7 | 12 ± 4 | 5,2 ± 0,8 | - | 10 |
| 1.2344 [41] | 987 ± 39 | 1528 ± 32 | 1244 ± 106 | 1719 ± 239 | 2 | 4 | - | - |
| L-40 [45] | - | - | 1182,0 ± 81,0 | - | 5,00 ± 1,4 | - | - | - |
| L-40 [vlastní práce] | 807,6 ± 57,04 | - | 1054,4 ± 47,5 | - | 1,14 ± 0,08 | - | 13 ± 1,93 | - |
| M789 [47] | 843 ± 17 | 1720 ± 50 | 1019 ± 17 | 1850 ± 50 | 16 ± 2 | 6 ± 2 | 14,3 ± 6 | 10 ± 4 |
| W360 AMPO [48, 49] | - | 1500 - 1670 | - | 1970 - 2010 | - | 6,6 - 8,1 | - | 8 - 14 |
| W360 [vlastní práce] | 338,33 ± 6,79 | 1659,33 ± 63,32 | 582,67 ± 10,63 | 1897,67 ± 18,63 | 22,98 ± 1,37 | 4,89 ± 0,05 | 54 ± 3,42 | 16 ± 0,55 |
| Heatvar [51] | - | 1660 ± 18 | - | 1980 ± 20 | - | 2 ± 1 | - | - |

Závěr

Záměrem této bakalářské práce bylo popsat moderní trendy ve vysokotlakém lití s ohledem na aditivní výrobu.

V teoretické části byla popsána technologie vysokotlakého lití. Konkrétně byl popsán princip technologie, výhody a nevýhody HPDC, typy strojů a konstrukce formy. Dále byly popsány základní části konstrukce formy, a následně podrobně problematika vtokového systému a chladících, nebo temperančních kanálů. Poté byl uveden a popsán standardní materiál na výrobu forem pro HPDC, nástrojová ocel 1.2343. V druhé kapitole byl popsán kovový 3D tisk, konkrétně byla definována technologie Direct Metal Laser Sintering patřící do skupiny Laser Powder Bed Fusion (dle ISO/ASTM 52900:2015). Tato technologie je nejčastěji využívána pro výrobu nástrojů licích forem pomocí aditivní výroby. Také zde byly popsány požadavky na materiál pro 3D tisk nástrojů pro HPDC. V rámci toho byla popsána i standardní nástrojová ocel pro kovový 3D tisk, precipitačně vytvrditelná ocel typu maraging, 1.2709.

Poslední kapitola teoretické části byla zaměřena na moderní trendy v HPDC. Nejdříve byla popsána aditivní výroba a následně benefity, které oblast AM přináší. Z těchto benefitů bylo popsáno konformní chlazení, které bylo vysvětleno a porovnáno s konvenčně vyrobeným chlazením. Jako další byla popsána technologie topologické optimalizace a reverzního inženýrství. Reverzní inženýrství je využíváno i při opravách a modifikacích forem. Do moderních trendů byly zahrnuty i nové materiály pro 3D tisk části forem pro HPDC. Byla zde popsána nástrojová ocel 1.2344, L-40, M789, W360 a Heatvar. K vybraným materiálům byly nalezeny odborné studie, které zkoumaly mechanické vlastnosti, chemické složení, využití a charakteristický rysy daných materiálů. Tato část rešerše byla následně využita při vyhodnocení výsledků získaných v praktické části.

Praktická část se zabývala zkoumáním mechanických vlastností zkušebních těles vyrobených z prémiového materiálu W360 vyrobeného válcováním a ocelového prášku L-40 pro 3D tisk. Pro analýzu byly zhotoveny vzorky pro zkoušku tahem probíhající dle normy DIN EN ISO 6892-1 a zkoušky rázem v ohybu metodou Charpy

dle normy ČSN ISO 148-1:2017. Vzorky oceli W360 byly zpracovány třemi způsoby, první várka vzorků byla bez tepelného zpracování, druhá várka byla vytvrzena na 50 HRc a třetí várka vzorků W360 byla vytvrzena na 57 HRc. Ze zkoušky tahem bylo možné konstatovat, že tepelné zpracování má velký vliv na hodnotu tažnosti, která byla pro vzorky bez tepelného zpracování $22,98 \pm 1,37$ %, pak ale pouze $4,89 \pm 0,05$ % pro vzorky s tvrdostí 50 HRc a $6,59 \pm 0,35$ % pro vzorky tvrdosti 57 HRc. Naopak mez pevnosti se zvýšila z $582,67 \pm 10,63$ MPa u vzorků bez tepelného zpracování na hodnotu $1897,67 \pm 18,63$ MPa u vzorků tvrdosti 50 HRc a na hodnotu $2044,33 \pm 15,15$ MPa u vzorků tvrdosti 57 HRc. Tahová zkouška zkušebních těles z prášku L-40 přinesla neočekávaně nízkou hodnotu tažnosti, pouze $1,14 \pm 0,08$ %. Nejpravděpodobnější příčinou rozdílů v mechanických vlastnostech se zdá být to, že vzorky byly tištěny z prášku, který byl již několikrát použit pro dřívější tisky. Dalšími příčinami by mohla být poloha vzorků na platformě, nebo strategie skenování Chessboard, která je v u tiskárny TruPrint 1000 doporučena pro tisk nástrojových ocelí, ovšem dodavatel vzorků tvrdí, že pozorovali zhoršené mechanické vlastnosti v případě využití právě této strategie. Ze zkoušky rázem v ohybu metodou Charpy byla zjištěna hodnota KCV $54 \pm 3,42$ J/cm² pro vzorky z oceli W360 bez tepelného zpracování, KCV $16 \pm 0,55$ J/cm² pro vzorky tvrdosti 50 HRc a KCV $10 \pm 1,15$ J/cm² pro vzorky tvrdosti 57 HRc. Vytvrzené vzorky měly křehký druh lomu, ovšem vzorky oceli W360 bez tepelného zpracování lom houževnatý. Vrubová houževnatost u vzorků z prášku L-40 dosáhla hodnoty $13 \pm 1,93$ J/cm², výsledky pro ocel L-40 byly porovnány se studií Kment [45]. V závěru byla vytvořena tabulka s přehledem materiálů pro 3D tisk forem a nástrojů.

Všechny cíle bakalářské práce byly splněny.

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obrázek 1 - Díl uchycení tlumiče [3] | 10 |
| Obrázek 2 - Princip pracovního postupu tlakového licího stroje [1] | 11 |
| Obrázek 3 – Strukturální díl vyráběný technologií HPDC [3]..... | 12 |
| Obrázek 4 - Schéma stroje s teplou licí komorou [6] | 14 |
| Obrázek 5 - Schéma stroje se studenou licí komorou [8] | 15 |
| Obrázek 6 - Forma bloku spalovacího motoru [9]..... | 16 |
| Obrázek 7 - Jednotlivé části formy pro HPDC [12] | 17 |
| Obrázek 8 - Schéma vtokového systému [1] | 18 |
| Obrázek 9 - Rozdíl mezi vrtanými chladicími kanálky a konformními chladicími kanálky [14] | 19 |
| Obrázek 10 - Součást vytvořená technologií kovového 3D tisku [18] | 21 |
| Obrázek 11 - Princip technologie DMLS [23] | 23 |
| Obrázek 12 - Rozdíl mezi výrobou dílu konvekční metodou a metodou kovového 3D tisku [16]..... | 24 |
| Obrázek 13 - Klasický vrtaný chladicí okruh (vlevo) x konformní chlazení (vpravo) vytvořený DMLS [1]..... | 28 |
| Obrázek 14 - Konformní chlazení [31]..... | 28 |
| Obrázek 15 - Optimalizační proces držáku kompresoru OptiStruct [35] | 29 |
| Obrázek 16 - Ukázka topologické optimalizace [34] | 30 |
| Obrázek 17 - Forma pro výrobu součástky do zavazadlového prostoru auta [36]..... | 31 |
| Obrázek 18 - Ukázka reverzního inženýrství [39]..... | 32 |
| Obrázek 19 - Topologicky optimalizovaná forma pro HPDC [40] | 33 |
| Obrázek 20 - Příklad konformního chlazení formy pro HPDC [40]..... | 34 |
| Obrázek 21 - Ruční 3D laserové skenování [52] | 40 |
| Obrázek 22 - Navařování chybějícího materiálu na formu pro HPDC [52]..... | 41 |
| Obrázek 23 - Příklad opravy formy z materiálu H13 metodou DED [54] | 42 |
| Obrázek 24 - Vyznačené strukturální díly na voze Cadillac CT6 [3] | 42 |
| Obrázek 25 - Strukturální díl na voze Cadillac CT6 [3] | 43 |
| Obrázek 26 - Ukázka umístění odlitku v Modelu Y [28] | 44 |
| Obrázek 27 - Technický výkres stroje OL 6200 CS [56] | 45 |
| Obrázek 28 - Schéma výrobního zařízení pro Thixomoulding [59] | 46 |
| Obrázek 29 - Řídící rameno pro Ford GT [58]..... | 47 |
| Obrázek 30 - Zařízení LabTest 5.100SP1 [24] | 50 |
| Obrázek 31 - Nastavené parametry při zkoušce Tahem [vlastní archiv] | 51 |
| Obrázek 32 - Výkres zkušební tyče pro zkoušku tahem | 51 |
| Obrázek 33 - Detail zkušebního tělesa BT-V2 [vlastní archiv] | 53 |
| Obrázek 34 - Detail zkušebního tělesa L-V5 [vlastní archiv] | 54 |
| Obrázek 35 - Kladivo Charpy [vlastní archiv]..... | 55 |
| Obrázek 36 - Výkres zkušebního tělesa pro zkoušku rázem | 55 |
| Obrázek 37 - Detail zkušebního tělesa 50--O3 [vlastní archiv]..... | 57 |
| Obrázek 38 - Detail zkušebního tělesa L-O1 [vlastní archiv] | 57 |

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tabulka 1 - Chemické složení oceli 1.2343 [15] | 20 |
| Tabulka 2 - Chemické složení prášku 1.2709 [26] | 26 |
| Tabulka 3 - Mechanické vlastnosti oceli 1.2709 [27] | 26 |
| Tabulka 4 - Chemické složení prášku 1.2344 [41] | 34 |
| Tabulka 5 - Mechanické vlastnosti oceli 1.2344 [42] | 35 |
| Tabulka 6 - Chemické složení prášku L-40 [44] | 36 |
| Tabulka 7 - Chemické složení prášku M789 [46]..... | 38 |
| Tabulka 8 - Chemické složení oceli W360 [48] | 38 |
| Tabulka 9 - Chemické složení prášku Heatvar [50] | 39 |
| Tabulka 10 - Výsledky zkoušky tahem pro ocel Böhler W360 (bez tepelného zpracování) | 52 |
| Tabulka 11 - Výsledky zkoušky tahem pro ocel Böhler W360 (50 HRc) | 52 |
| Tabulka 12 - Výsledky zkoušky tahem pro ocel Böhler W360 (57 HRc) | 52 |
| Tabulka 13 - Výsledky zkoušky tahem pro ocel L40 | 53 |
| Tabulka 14 - Aritmetické průměry výsledků zkoušky tahem | 53 |
| Tabulka 15 - Výsledky zkoušky rázem pro ocel Böhler W360 a prášek L-40..... | 56 |
| Tabulka 16 - Aritmetické průměry výsledků zkoušky rázem..... | 56 |
| Tabulka 17 - Porovnání mechanických vlastností prášku L-40..... | 58 |
| Tabulka 18 - Přehled materiálů a mechanických vlastností..... | 60 |

Seznam použité literatury

- [1] HYNEK, Martin. TLAKOVÉ LITÍ HLINÍKU. *Tlakové lití* [online]. 2014, (1), 1-30 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_01_publikace/KA01-Tlakove-liti-hliniku.pdf
- [2] MURRAY, M.T. a M. MURRAY. 9 - High pressure die casting of aluminium and its alloys. In: *Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering*. Woodhead Publishing, 2011, s. 217-261. ISBN 978-1-84569-654-2. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1533/9780857090256.1.217>
- [3] BRYKŠÍ STUNOVÁ, Barbora. Cast structural parts – structural, metallurgical and technological aspects of manufacture. *Slévárenství*. 2017, , 218-220.
- [4] SADEGHI, Mohammad. *Optimization product parts in high pressure die casting process*. Sweden, 2015. Mälardalen University Sweden.
- [5] CAMPBELL, John. Casting: the new metallurgy of cast metals. *Metallurgy and materials science series*. Second edition. Amsterdam, 2003, **2003**(1), -. 9780750647908.
- [6] *Hot Chamber Die Casting* [online]. Dynacast: Dynacast, 2019 [cit. 2022-07-11]. Dostupné z: <https://www.dynacast.com/hot-chamber-die-casting>
- [7] LAUKLI, Hans. *High Pressure Die Casting of Aluminium and Magnesium Alloys - Grain Structure and Segregation Characteristics*. Trondheim, 2004. Disertační práce. Orwegian University of Science and Technology.
- [8] *Cold Chamber Die Casting* [online]. Dynacast: Dynacast, 2019 [cit. 2022-07-11]. Dostupné z: <https://www.dynacast.com/cold-chamber-die-casting>
- [9] *Tlaková lící forma pro odlitek bloku motoru* [online]. Praha: AV Engineering, A.S., 2008 [cit. 2022-07-11]. Dostupné z: <http://old.aveng.cz/galerie/awards-2008/konstrukce-nastroju-a-vyrobnihozarizeni/6.aspx>
- [10] *Latest Resource Explores Advancements in Die Casting* [online]. Arlington Heights: NADCA Design, 2016 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://www.diecastingdesign.org/blog/advancements-in-die-casting/>
- [11] Konstrukce formy pro tlakové lití. *Fakulta strojní ČVUT*. Ústav strojírenské technologie ČVUT, 2010, (-), -. Dostupné z: doi:Konstrukce formy pro tlakové lití
- [12] PROCHÁZKA, V. *Koncepční návrh konstrukce vysokotlakých forem na hliník s použitím CAD system*. Brno, 2006. Diplomová práce. VUT.
- [13] KRŇÁVEK, Václav. Konstrukce forem pro odlitky lité pod tlakem a její vliv na výskyt vad. *Slévárenství*. 2007, **207**(-), -.
- [14] MAYER, Siegfried. DMLS: der Weg zur optimierten Werkzeugtemperierung für hochqualitative, kostenoptimierte, spritzgegossene Teile. *EOS GmbH Electro Optical Systems*. 2007, (-), 1-10.

- [15] Produktový list 1.2343. *Materiálový list oceli 1.2343*. bogner.cz, 2020, -(1), 1-2.
- [16] *ODVAHA DĚLAT VĚCI JINAK. NAKOUKNĚTE DO VÝZKUMNÉHO CENTRA NISSANU V JAPONSKU*. [online]. Praha: Nissan, - [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: https://www.nissan.cz/experience-nissan/nissan-ceska-republika-newsroom/Odvaha_delat_veci_jinak_Nakouknete_do_vyzkumneho_centra_Nissanu_v_Japonsku.html
- [17] GIBSON, Ian a David ROSEN. Additive Manufacturing technologies. *Second edition*. New York: Springer, 2015, -(), -. ISBN 978-1-4939-2112-6.
- [18] *Výroba koncových dílů* [online]. Mohelnice: ONE3D, 2022 [cit. 2022-07-11]. Dostupné z: <https://www.one3d.cz/sluzby/vyroba-koncovych-dilu/>
- [19] *Metal 3D Printing* [online]. -: Materialise, 2020 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: https://www.materialise.com/en/manufacturing/3d-printing-technology/metal-3d-printing?gclid=CjwKCAjww0-WBhAMEiwAV4dybQ-ZQ05ute8Z0LxIVJoZWosORXd5D5exO5ODIhgXwaLYC0Z0oj1GyhoCqJ8QAvD_BwE
- [20] ISO/ASTM 52900:2015. *Additive manufacturing: General principles*. Terminology. EU: ISO, 2015.
- [21] *The Direct Metal Laser Sintering Process* [online]. -: Total Materia, 2017 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=ES&NM=488>
- [22] *Začínáme s 3D tiskem kovů #2: Technologie 3D tisku kovů (SLM)* [online]. Konstrukter: Nová média, 2016 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>
- [23] *Informace o technologiích 3D tisku* [online]. EasyCNC: EasyCNC, 2022 [cit. 2022-07-11]. Dostupné z: <https://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiech-3d-tisku/>
- [24] DAVID, Stárek. *Přehled a analýza nástrojových materiálů používaných v aditivní výrobě*. Praha, 2021. Bakalářská práce. České vysoké učení technické.
- [25] ASNAFI, Nader. Tool and Die Making, Surface Treatment, and Repair by Laser-based Additive Processes. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*. 2021, **166**(5), 225-236. ISSN 0005-8912. Dostupné z: doi:10.1007/s00501-021-01113-2
- [26] *EOS MaragingSteel MS1: Material data sheet*. EOS: EOS GmbH - Electro Optical Systems [online]. -: EOS, 2011 [cit. 2022-07-17]. Dostupné z: https://cdn0.scrvt.com/eos/04f875d5141d28f7/8ecee6ee388d/MS-MS1-M270-M280_200W_Material_data_sheet_05-14_en.pdf
- [27] ANDRONOV, Vladislav. *Využití technologie DMLS při výrobě forem a nástrojů*. Praha, 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické.
- [28] *Tesla casts a new strategy for lightweight structures* [online]. SAE International: SAE International, 2020 [cit. 2022-07-11]. Dostupné z: <https://www.sae.org/news/2020/06/tesla-model-y-big-castings>

- [29] *Konformní chlazení* [online]. Jaroměř: Konformní chlazení, 2017 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <http://www.konformni-chlazení.cz/#vice-informaci-o-konformnim-chlazení-a-dmls>
- [30] R. BERGER, Gerald, David ZORN a Walter FRIESENBICHLER. Efficient Cooling of Hot Spots in Injection Molding. A Biomimetic Cooling Channel Versus a Heat-Conductive Mold Material and a Heat Conductive Plastics. *POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE*. 2017, (118), 180-188. Dostupné z: doi:10.1002/pen
- [31] BARREIRO, P., G. ARMUTCU, S. PFRIMMER a J. HERMES. Quality improvement of an aluminum gearbox housing by implementing additive manufacturing. *Forschung im Ingenieurwesen*. 2021. ISSN 1434-0860. Dostupné z: doi:10.1007/s10010-021-00541-3
- [32] MIRZENDEHDEL, Amir a Krishnan SURESH. Support structure constrained topology optimization for additive manufacturing. *Computer-Aided Design*. 2016, **81**, 1-13. ISSN 0010-4485. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.cad.2016.08.006>
- [33] BERROCAL, Laura, Rosario FERNÁNDEZ, Sergio GONZÁLEZ et al. Topology optimization and additive manufacturing for aerospace components. *Progress in Additive Manufacturing*. 2019, **4**(2), 83-95. ISSN 2363-9520. Dostupné z: doi:10.1007/s40964-018-0061-3
- [34] PAGÁČ, Marek. *Začínáme s 3D tiskem kovů #3: Předvýrobní etapa (topologická optimalizace)* [online]. Konstruktér.cz: Konstruktér.cz, 2017 [cit. 2022-07-11]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-3-predvyrobní-etapa-topologicka-optimalizace/>
- [35] *Integrating Topology Optimization with CAD* [online]. Brigham: Brigham Young University, 2012 [cit. 2022-07-26]. Dostupné z: <http://www.drcgjensen.com/wp-content/uploads/2012/01/Topology-Optimization-2.pdf>
- [36] *Slévárna Beneš Lát vyvinula unikátní 3D tisk ocelových forem* [online]. B4I: Brain4industry, 2022 [cit. 2022-07-12]. Dostupné z: <https://www.brain4industry.cz/technologie-a-znalosti/>
- [37] WANG, Wego. Reverse engineering: technology of reinvention. *Boca Raton*. CRC Press, 2011, (-), -. ISBN 978-1-4398-0630-2.
- [38] TESAŘ, Matouš. *Reverzní inženýrství jako zdroj dat pro aditivní technologie výroby*. Praha, 2021. Diplomová práce. České vysoké učení technické.
- [39] *Reverse Engineering* [online]. Jaroměř: Innomia, 2012 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <http://www.old.innomia.cz/sluzby/reverse-engineering>
- [40] 3D TISK KOVOVÝCH MATERIÁLŮ. *Žijeme technikou*. BENEŠ a LÁT a.s., 2020, **1**(1), 1-2.
- [41] *Material Data Sheet Tool Steel 1.2344/A681 H13/H13*. -. Lubeck, Německo: SLM Solutions, .
- [42] KUBÍKOVÁ, Kristýna. *Využití technologie 3D tisku k výrobě metalurgického nářadí: Using 3D printing technology to produce metallurgical tools*. Liberec, 2017. Bakalářské práce. Technická univerzita v Liberci.

- [43] *THE HENRY FORDS OF METAL POWDER FOR 3D PRINTING* [online]. MASUCH, Thomas: Fromnext magazine, 2019 [cit. 2022-07-17]. Dostupné z: <https://fonmag.de/highlight-stories/2019/formetrix/?L=1>
- [44] *L-40 Tool Steel Powder for Metal 3D Printing: High-Performance Tool Steel for Powder Bed Fusion Platforms* [online]. Formetrix, 2019 [cit. 2022-07-17]. Dostupné z: <https://www.formetrixmetals.com/wp-content/uploads/2019/11/Formetrix-PRODUCT-DATA-SHEET-L-40-Fall-2019.pdf>
- [45] TOMÁŠ, Kment. *Print process parameters development for tool steel L-40 in Laser Powder Bed Fusion*. Praha, 2020. Diplomová práce. Czech technical university in Prague.
- [46] *Certified M789 (A)* [online]. -: 3D Systems, 2021 [cit. 2022-07-25]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/sites/default/files/2021-08/3d-systems-certified-m789%28a%29-datasheet-usen-2021-08-27-a-print.pdf>
- [47] Böhler M789 Ampo. *Material Böhler M789 Ampo*. 2020, -(1), 1-2.
- [48] Böhler W360 AMPO. *Böhler*. 2018, -(1), 1-2.
- [49] From concept to component. *Böhler*. Germany, 2020, -(1).
- [50] Udeholm additive manufacturing. *Vom Pulver zum bauteil*. Voestalpine, 2019, -(1), 1-2.
- [51] TIAN, Yuan, Kanwal CHADHA, Sang Hoon KIM a Clodualdo ARANAS. Strengthening mechanisms in a heatvar hot work tool steel fabricated by laser powder bed fusion. *Materials Science and Engineering: A*. 2021, **805**. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2021.140801
- [52] *3D technologie pro reverzní inženýrství* [online]. CZ: Mepac, 2022 [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/3d-technologie-pro-reverzni-inzenyrstvi>
- [53] *LASERTEC 125 DED hybrid* [online]. -: DMG Mori, 2022 [cit. 2022-07-27]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/aditivni-vyroba/praskova-tryska/lasertec-125-ded-hybrid>
- [54] *B2B PORTAL for technical and commercial foundry management* [online]. Pfronten, Germany: B2B PORTAL, 2020 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://www.foundry-planet.com/d/increase-in-productivity-and-service-life-for-the-repair-and-new-production-of-die-casting-molds/>
- [55] *Tesla Model Y Will Gain Single Rear Casting Thanks To IDRA Group* [online]. -: Insideevs, 2020 [cit. 2022-07-21]. Dostupné z: <https://insideevs.com/news/427179/tesla-model-y-casting-machine-idra-group/>
- [56] *BEHOLD THE GIGA PRESS: WORLD'S LARGEST DIE CASTING MACHINE* [online]. -: Sunrise metal, 2022 [cit. 2022-07-21]. Dostupné z: <https://www.sunrise-metal.com/tesla-giga-press-die-casting-machine/>
- [57] *Semisolid metal processing* [online]. -: -, 2002 [cit. 2022-07-12]. Dostupné z: http://www.brunel.ac.uk/__data/assets/pdf_file/0006/295143/Semi-solid-metal-processing.pdf
- [58] ATTIA, Mohamed, Khaled A. RAGAB, Mohamed BOUAZARA a X.-Grant CHEN. *Fatigue Cycles and Performance Evaluation of Accelerating Aging Heat Treated Aluminum Semi Solid Materials Designed for Automotive Dynamic Components*. 2020, . ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app10093008

- [59] *New-materials* [online]. Neue Materialien: Furth, 2013 [cit. 2022-07-12]. Dostupné z: <http://www.new-materials.de/en/hauptnavigation/frth/fields-of-activity/injectionmolding-of-magnesium-parts/injection-molding-of-magnesium-partsthixomolding.html>
- [60] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. Perspektivní materiály. *České vysoké učení technické*. 3. 2008, ISBN 978-80-01-04167-3.
- [61] DIN 50125. *Test pieces for tensile testing of metallic materials*. -. Německo: -, 2004.