



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VADY TLAKOVĚ LITÝCH ODLITKŮ ZE SLITIN HLINÍKU

DEFECTS OF HIGH PRESSURE DIE CAST CASTINGS FROM ALUMINUM ALLOYS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Václav Dočekal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Václav Kaňa, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Václav Dočekal**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Slévárenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Václav Kaňa, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

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

Vady tlakově litých odlitků ze slitin hliníku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tlakově lití odlitků ze slitin hliníku má mnoho výhod, a proto patří k široce používaným výrobním technologiím. Jedná se o vysoce produktivní technologii, kde je nutné každý neshodný výrobek rychle detekovat a především stanovit příčinu vzniku neshody, jinak mohou vznikat nemalé ekonomické ztráty. A právě správná identifikace vady a stanovení nápravných opatření jsou zde klíčové.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je popsat základní vady vznikající při tlakovém lití odlitků ze slitin hliníku. V praktické části pak na vybraném neshodném odlitku provést analýzu za účelem klasifikace vady a stanovení vhodných nápravných opatření.

Seznam doporučené literatury:

ROUČKA, J. Metalurgie neželezných slitin. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2004. 148 s. ISBN 80-214-2790-6.

MICHNA, S. a kol. Encyklopedie hliníku, I. vyd. Děčín: ALCAN, 2005. 699 s. ISBN 80-89041-88-4.

BOLIBRUCHOVÁ, D. a kol. Chyby hliníkových odlitků odlevaných metodou vysokotlakového odlievania. Slévárství. 2008, roč. LVI, č. 9-10, s. 422 - 426. ISSN 0037-6825.

FIORESE, E., F. BONOLLO, G. TIMELLI, L. ARNBERG a E. GARIBOLDI. New Classification of Defects and Imperfections for Aluminum Alloy Castings. International Journal of Metalcasting. 2015, 9(1), s. 55 - 66. ISSN 1939-5981.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na vady vyskytující se u výrobků vyrobených tlakovým litím ze slitin hliníku. Teoretická část zahrnuje seznámení s technologií tlakového lití a popisem jednotlivých vad, příčin vzniku a nápravných opatření. Praktická část se zabývá určením vady na předem vybraném odlitku, který je odléván ve slévárně ALW INDUSTRY, s.r.o. Na základě identifikace vady je zde stanoveno nápravné opatření pro snížení jejího výskytu.

Klíčová slova

Vysokotlaké lití, studený spoj a zavaleniny, vady tlakově litých odlitků

ABSTRACT

This thesis is focused on defects occurring in products made by high pressure die casting of aluminum alloys. The theoretical part includes introduction to high pressure die casting technology and description of individual defects, causes and corrective procurations. The practical part focuses on the determination of the defect on the pre-selected casting, which is cast in the foundry ALW INDUSTRY, s.r.o. Based on the identification of the defect, there is a corrective procuration to reduce its occurrence.

Keywords

High pressure die casting, cold joint and cold lap, defect, defects of high pressure die cast castings

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOČEKAL, Václav. *Vady tlakově litých odlitků ze slitin hliníku* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117025>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Václav Kaňá.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne

.....

Bc. Václav Dočekal

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Václavu Kaňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Také děkuji Ing. Zbyňku Kuzmovi a zaměstnancům slévárny ALW INDUSTRY, s.r.o. za poskytnuté rady a odbornou pomoc v průběhu vypracování praktické části. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během mého studia.

OBSAH

ABSTRAKT

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

PODĚKOVÁNÍ

ÚVOD	10
1 VYSOKOTLAKÉ LITÍ	11
1.1 Tlakový stroj s teplou komorou	11
1.2 Tlakový stroj se studenou komorou	12
2 KVALITA ODLITKU	13
3 VADY TVARY ROZMĚRU A HMOTNOSTI (100)	14
3.1 Chybějící část odlitku bez lomu (110).....	14
3.1.1 Nezaběhnutí (111).....	14
3.1.2 Přetryskaný odlitek (115).....	15
3.1.3 Omačkání, potlučení, pohmoždění (116).....	16
3.1.4 Nesprávně odřezaný, obroušený a odstřížený odlitek (117).....	17
3.2 Chybějící část odlitku s lomem (120).....	17
3.2.1 Ulomená část odlitku (121).....	17
3.3 Nedodržení rozměrů, nesprávný tvar (130).....	18
3.3.1 Přesazení (132).....	18
3.3.2 Nevyhovující tvar, zborcení, deformace (134)	19
4 VADY POVRCHU (200)	20
4.1 Připečeníny (210)	20
4.1.1 Drsný povrch (211)	20
4.2 Nárosty (230).....	21
4.2.1 Eroze 234	21
4.3 Zatekliny (260)	21
4.3.1 Zatekliny do dělené formy způsobené netěsností formy (261).....	21
4.3.2 Prasklé jádro, zatekliny do pohybových částí formy (262).....	22
4.3.3 Zatekliny do prasklin ve formě, prasklá forma (263)	23
4.4 Nepravidelnost povrchu (270).....	24
4.4.1 Mapovitý povrch, stopy po proudění a po mazadlech (272).....	24
4.4.2 Zadřeniny (273).....	24
4.4.3 Koroze (274)	25
4.4.4 Odlup, šupina (276).....	25
4.4.5 Nalepování kovu (277).....	26
5 PORUŠENÍ SOUVISLOSTI (300)	27
5.1 Trhliny (310)	27

5.1.1 Povrchové trhliny (311)	27
5.1.2 Vnitřní trhliny (313).....	28
5.2 Praskliny (320)	29
5.2.1 Praskliny způsobené při vyjímání odlitků z formy (322).....	29
5.3 Porušení souvislosti z důvodu nespojení kovu (340)	30
5.3.1 Studené spoje a zavaleniny (341).....	30
6 DUTINY (400)	31
6.1 Bubliny (410).....	31
6.1.1 Bubliny způsobené vodíkem (412)	34
6.1.2 Zahlcený plyn, vzduch, pára (414).....	35
6.2 Staženiny (440).....	36
6.2.1 Otevřené staženiny (441)	36
6.2.2 Vnitřní, uzavřené staženiny (442)	37
6.2.3 Řediny (443).....	38
6.2.4 Staženiny od jader nebo ostrých hran formy (444).....	38
6.2.5 Povrchové propadliny (445).....	39
7 MAKROSKOPICKÉ VMĚSTKY A VADY MAKROSTRUKTURY (500).....	39
7.1 Nekovové vměstky (520)	40
7.1.1 Oxidické pleny, vměstky (524).....	40
7.2 Broky (540)	41
8 VADY CHEMICKÉHO SLOŽENÍ A VLASTNOSTÍ ODLITKŮ (700).....	41
8.1 Nevyhovující chemické složení (710).....	41
8.2 Mechanické vlastnosti (720).....	42
8.2.1 Nevyhovující mechanické vlastnosti (720)	42
9 PRAKTICKÁ ČÁST	43
9.1 Řešený odlitek	43
9.2 Proces výroby řešeného odlitku.....	43
9.3 Analýza vady	46
9.3.1. Mikroskopická analýza	47
9.4 Simulace procesu lití	49
9.4.1 Varianta 1	50
9.4.2 Cyklování formy	50
9.4.3 Varianta 2	57
9.4.4 Varianty startu druhé fáze v nařiznutí.....	63
ZÁVĚRY	65
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	
SEZNAM OBRÁZKŮ	

ÚVOD

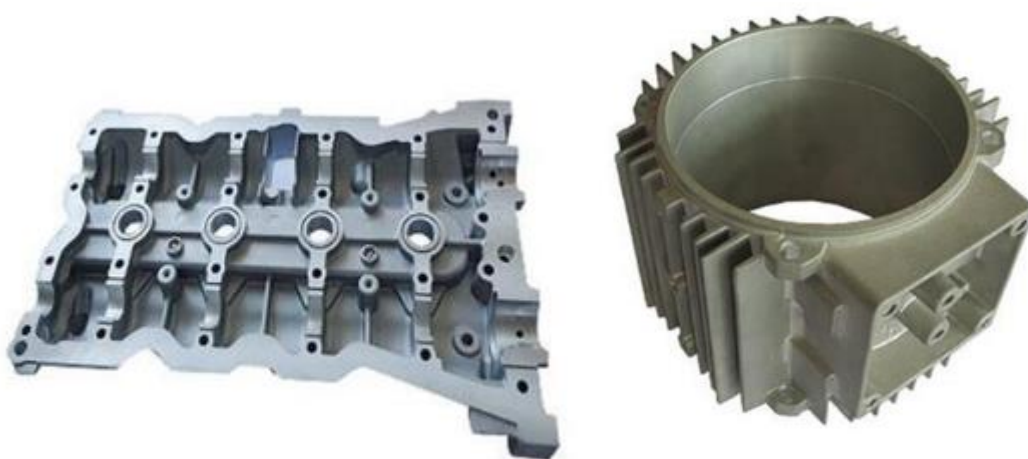
Technologie tlakového lití se řadí mezi ekonomicky nejproduktivnější technologie výroby odlitků z hliníkových slitin. Mezi výhody této technologie můžeme zařadit rychlou výrobu odlitků se složitým tvarem a s vysokou přesností. Odlitky vyrobené touto technologií mají velmi dobrou jakost povrchu, proto nevyžadují téměř žádné úpravy a některé odlitky nevyžadují obrábění na konečný tvar. [1,2]

Nevýhodami technologie tlakového lití jsou vysoké náklady na zhotovení licí formy. Z tohoto důvodu se tato technologie využívá výhradně pro velkosériovou a hromadnou výrobu. Další nevýhodou této technologie je vliv mnoha parametrů na výslednou kvalitu odlitků. Jedná se především o parametry licího stroje, postřík a teploty tlakové formy, průběh tavení odlévané slitiny, konstrukce formy a jiné. [2]

Vlivem těchto parametrů se u odlitků litých technologií vysokotlakého lití vyskytují vady. Tak tomu je i u odlitku chladiče u automobilového osvětlení, který je odléván ve firmě ALW INDUSTRY, s.r.o. a tato práce se jím bude zabývat.

Hlavním úkolem této práce bude charakterizovat a popsat vady vyskytující se u technologie vysokotlakového lití a provést analýzu vady u vybraného odlitku. Na základě této analýzy je také cílem navrhnout vhodná nápravná opatření, která povedou k eliminaci vad na vybraném odlitku.

Při řazení vad je vycházeno z prací prof. Tomáše Elbela a jeho kolektivu. Jedná se o řazení do tříd, skupin a druhů vad. Některé vady, které se vyskytují u ocelí nebo litin nebo vady související s jinou než kovovou formou, byly vynechány.



Obr. 1 Odlitky vyrobené technologií vysokotlakého lití [3]

1 VYSOKOTLAKÉ LITÍ

Vysokotlaké lití je rychlý, spolehlivý a ekonomicky efektivní výrobní proces pro výrobu kovových součástí ve velké sérii. Princip výroby spočívá v podstatě ve vstřikování roztavené kovové slitiny pod vysokým tlakem do ocelové formy, ve které rychle tuhne. [4]

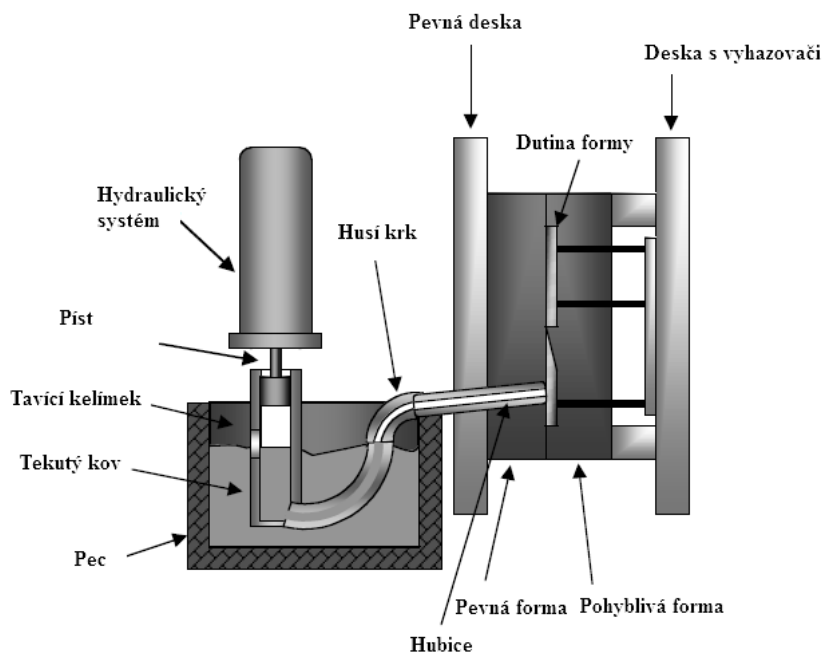
Technologie vysokotlakého lití se používá zejména pro odlitky menších rozměrů a hmotností, ale dnes se touto technologií vyrábějí i větší strukturální odlitky vyšších rozměrů a hmotností zejména pro automobilový průmysl. Existuje také široká škála slitin, které lze použít pro tuto výrobní technologii. Jedná se především o slitiny hliníku, zinku nebo hořčíku. [5]

Vlivem disperzního plnění se u této technologie vyskytuje v kovu určitý podíl vzduchu. Proto odlitky vyrobené vysokotlakým litím dosahují menších mechanických vlastností, než je dosahováno při výrobě gravitačním nebo nízkotlakým litím. [4]

Stroje pro vysokotlaké lití se skládají především ze systému pro vstřikování kovu, systému uzavírání formy a systému pro vyhození odlitku po ukončení cyklu. Z hlediska typu vstřelovacího systému pro dopravu tekutého kovu do formy se dělí na vysokotlaké lící stroje s teplou komorou a vysokotlaké lící stroje se studenou komorou. [4]

1.1 Tlakový stroj s teplou komorou

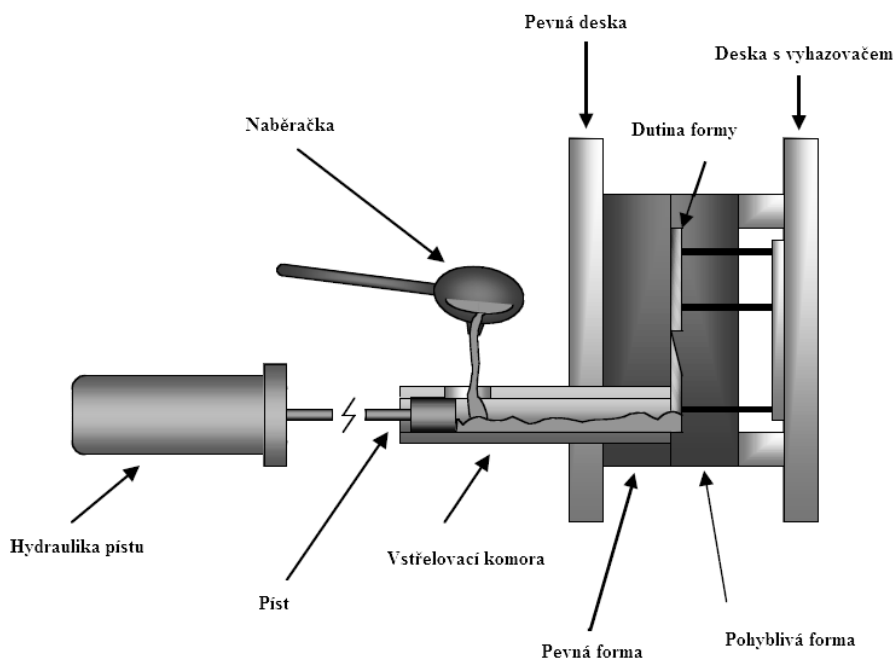
Stroj s teplou komorou obsahuje hydraulický systém pro pohyb pístu, tlakové komory, husího krku a vstřelovací hubice. Píst se nachází na začátku cyklu v horní poloze, roztavený kov nateče otvorem do tlakové komory. Až se uzavře forma, tak se píst postupně posunuje dolů a dochází k uzavření vtokového otvoru. Potom je tedy roztavený kov hnán pístem přes husí krk a hubici do dutiny formy. Když odlitek ztuhne, tak je pomocí vyhazovačů vyhozen z formy a začíná další cyklus. K výrobě odlitků stroji s teplou komorou se používají slitiny, které se vyznačují nízkou teplotou tavení. Jsou to například slitiny zinku, které se používají převážně u strojů s teplou komorou. Slitiny, které mají vyšší teplotu tavení, způsobují rychlou degradaci vstřelovacího systému, proto se například odlitky hliníkových slitin nevyrábí tímto typem stroje. Na obr. 2 je schéma tlakového stroje s teplou komorou. [5]



Obr. 2 Schéma tlakového stroje s teplou komorou [5]

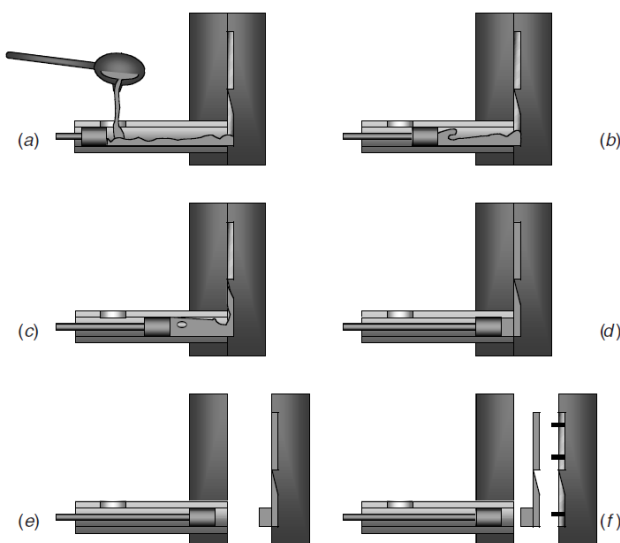
1.2 Tlakový stroj se studenou komorou

Tento typ tlakového stroje se používá především pro výrobu odlitků ze slitiny hliníku. Na rozdíl od stroje s teplou komorou je kov se vstřikovacím systémem v kontaktu pouze krátkou dobu. Na obr. 3 je schéma tlakového stroje se studenou komorou. [4]



Obr. 3 Schéma tlakového stroje se studenou komorou [5]

Na obrázku 4 je znázorněn cyklus výroby odlitku na stroji se studenou komorou. Na začátku se dávkuje tekutý kov do vstřelovací komory (a), který je potom okamžitě hnán pístem (b) přes vtokovou soustavu (c) až do dutiny formy (d). Během tuhnutí se slitina udržuje pod vysokým tlakem. Když dojde k úplnému ztuhnutí, forma se otevře (e) a dochází k vyhození odlitku pomocí vyhazovačů (f). [5]



Obr. 4 Cyklus lití na stroji se studenou komorou [5]

2 KVALITA ODLITKU

Řízení kvality odlitků ve slévárně je velmi důležité. Protože díky správné a rychlé diagnostice vady můžeme velmi snížit náklady ve slévárně. Vadou odlitku označujeme odchylky od vzhledu, tvaru, rozměru, hmotnosti, struktury, celistvosti nebo od sjednaných podmínek a norem. [6]

Vady odlitků mohou být [6,7]:

- a) Zjevné – zjevná vada znamená, že ji lze detekovat při prohlídce neobrobeného odlitku prostým okem, nebo jednoduchými pomocnými měřidly
- b) Skryté – tyto vady lze zjistit až po obrobení odlitku nebo detekci vady vhodnými přístroji a zařízeními

Každá odchylka může být podle ustanovení příslušných norem nebo sjednaných technických podmínek někdy vadou přípustnou, jindy vadou nepřipustnou, ale i opravitelnou nebo odstranitelnou. Z tohoto hlediska vady odlitků jsou [6,7]:

- c) Přípustná vada - je taková odchylka od příslušných norem nebo sjednaných technických podmínek, kterou tyto dokumenty připouštějí, bez toho aby požadovaly její odstranění (nesmí být výslovně zakázána)
- d) Nepřípustná vada – tato vada je většinou jmenovitě uvedena a její výskyt znamená, že takový odlitek je označen jako neshodný
- e) Opravitelná vada – jedná se o vadu, jejíž oprava vhodným způsobem je sjednanými technickými podmínkami nebo příslušnými normami povolena, nebo není výslovně zakázána
- f) Odstranitelná vada – touto vadou se rozumí, že ji je možno odstranit po dohodě se zákazníkem jen zvláštními úpravami nepředpokládanými původním výrobním postupem

Vady, které se vyskytují u odlitků litých technologií vysokotlakého lití, ovlivňuje řada faktorů. Mezi tyto faktory se řadí konstrukce lící formy, tlakový lící stroj, druh odlévané slitiny, metalurgické zpracování odlévané slitiny, technologické parametry a samozřejmě také obsluha stroje. Vliv těchto parametrů na vady u tlakově litých odlitků znázorňuje Savenův diagram (obr. 5). [8]



Obr. 5 Savenův diagram příčin vzniku vad při tlakovém lití [8]

Dále budou uvedeny jednotlivé třídy, skupiny a druhy vad s uvedením jejich popisu, příčin vzniku a také hlavních opatření pro zamezení vzniku.

3 VADY TVARU, ROZMĚRU A HMOTNOSTI (100)

Aby odlitek mohl být považován za vyhovující, musí mimo celistvosti, vnitřní a povrchové jakosti a požadovaných mechanických hodnot odpovídat také rozměrovým požadavkům, které vychází z výkresové dokumentace. Požadavek na přesnost musí brát konstruktér v úvahu při konstrukci formy. Z pohledu konstrukčního řešení formy a způsobu zaformování mají odlitky rozměrové odchylky, které jsou zapříčiněny tím, že rozměry přes dělicí rovinu nelze udržet v úzké toleranci. Systém chlazení a ohřevu formy musí také respektovat vliv na rozměrové odchylky odlitku. Chybně navržená hodnota smrštění odlitku vzhledem k druhu slitiny a také deformace formy (prohnutí) vzniklá nedostačujícím dimenzováním částí formy, můžou zapříčinit vznik odchylky od požadovaného rozměru. Rozměrové odchylky také souvisí s technologií lití. [8]

3.1 Chybějící část odlitku bez lomu (110)

Tyto vady vznikají při plnění dutiny formy tekutým kovem a jsou zjistitelné velmi brzy (vizuálně ihned po vytažení odlitku z formy). Lze velmi rychle stanovit nápravná opatření, proto lze tyto vady minimalizovat ihned na začátku výrobního procesu a nevznikají tak vysoké škody. [6]

3.1.1 Nezaběhnutí (111)

Jedná se o vadu, při které nejsou některé části odlitku úplně vyplněny. Nezaběhnutí vzniká většinou na rozích, žebrech nebo jiných tenkostěnných oblastech odlitku. Vzniká také ale v posledních místech plnění odlitku, protože předčasně ztuhlo čelo proudu kovu. Nezaběhnutí se vyznačuje hladkými zaoblenými rohy nebo hranami. [6,8,9]

Identifikace vady probíhá vizuální kontrolou. Tuto vadu nelze opravit. [10]

Příčiny:

Tato vada vzniká obvykle v místech, která nejsou dostatečně odvzdušněna nebo jsou do nich proudícím kovem zaneseny zbytky mazadel, které nebyly odvedeny do přetoků. Zaformování odlitku a umístění i nasměrování vtokového nařiznutí má vliv na vznik nezaběhnutí. Snahou je minimalizovat narážení kovu přímo na stěnu, a to zejména při ústí nařiznutí, ale v některých případech lze náraz využít k dokonalejšímu vyplnění hlubšího tvaru. Jedná se především o vzdálenější místa. Nedolití může také souviset s nízkou teplotou kovu a formy, nedostatečným tlakem, nedostatečnou rychlostí v nařiznutí. Vada vzniká taktéž v důsledku nedostatečné rafinace kovu a dlouhé doby plnění. [2,8,10,11]

Opatření proti vzniku:

K potlačení vzniku této vady jsou důležité zkušenosti a znalosti technologa i konstruktéra. Jedná se především o znalosti zásad proudění a tuhnutí kovu ve formě, k čemuž je dnes často využíváno počítačové simulace. Pokud je forma správně konstrukčně řešena, pak úplné vyplnění dutiny formy zajistíme optimálním nastavením technologických parametrů. K zamezení vady také může vést zlepšení rafinace kovu a snížení množství mazadla. [8,10]



Obr. 6 Nezaběhnutí [12]

3.1.2 Přetryskaný odlitek (115)

Jedná se o chybějící, smetené a neostré tvary odlitků způsobené tryskacím médiem. Odlitek je podle druhu a způsobu působení tryskacího prostředku buď celkově přetryskán, nebo je deformován v určitých místech (např. při dlouhodobém působení tryskacího prostředku na jednom místě). [9]

Určení vady probíhá vizuální kontrolou nebo pomocí drsnoměru. Jedná se o neopravitelnou vadu. [10]

Příčiny:

Příčinou této vady může být dlouhá doba tryskání, vysoký tlak tryskacího média, špatný úhel nastavení metacích kol a špatný výběr metacího média. [9,10]

Opatření proti vzniku:

K vyvarování se této vady je důležité dodržení předepsané doby tryskání. Ke snížení zmetkovitosti vlivem této vady vede také snížení tlaku tryskacího média, změna nastavení metacích kol a změna tryskacího prostředku nebo jeho granulometrie. [9,10]



Obr. 7 Přetryskaný odlitek [10]

3.1.3 Omačkání, potlučení, pohmoždění (116)

Tuto vadu lze popsat jako změnu tvaru a rozměrů odlitku vlivem mechanického poškození. Toto poškození se projevuje náhlým porušením obrysu odlitku (především prohlubně na povrchu, potlučené hrany, atd.). [6]

Identifikace této vady probíhá vizuální kontrolou odlitku. Možností opravy odlitku je zabroušení a otryskání. [10].

Příčiny:

Porušení vzniká při transportu odlitků, při odstřížení vtokové soustavy vlivem nečistot v ostříhovacím nástroji a při balení odlitků. [6,10]

Opatření proti vzniku:

K eliminaci této vady je důležité dodržení technologické kázně při manipulaci s odlitkem, vhodný způsob balení. Důležité je také čištění, případně úprava ostříhovacího nástroje. [10]



Obr. 8 Omačkaný a potlučený odlitek [10]

3.1.4 Nesprávně odřezaný, obroušený a odstřížený odlitek (117)

V tomto případě se jedná o změnu tvaru a rozměrů odlitku způsobenou při odstraňování vtokové soustavy, zateklin a projevuje se porušením obrysu odlitku. [9]

Tato vada se zjišťuje pomocí vizuální kontroly. Vada může být opravena pomocí tryskání a broušení, ale v některých případech se může jednat také o vadu neopravitelnou. [10]

Příčiny:

Příčinou vzniku této vady může být špatná poloha odlitku v nástroji, provádějícím ostříh a špatné seřízení ostříhovacího nástroje. Tato vada může také vzniknout technologickou nekázní při broušení odlitků. [10]

Opatření proti vzniku:

Pro snížení výskytu této vady můžeme seřídit nástroj, upravit zakládání do ostříhovacího stroje v programu robota a dodržet technologickou kázeň při broušení. [10]



Obr. 9 Nesprávně odstřížený odlitek [10]

3.2 Chybějící část odlitku s lomem (120)

U těchto vad se jedná o změnu tvaru a rozměrů odlitku, které byly způsobeny mechanickým poškozením a projevují se porušením obrysu odlitku. [9]

3.2.1 Ulomená část odlitku (121)

Vadu lze popsat jako chybějící část odlitku, která byla odlomena. V případě, že došlo k ulomení části odlitku za studena, je lomová plocha kovově čistá. Pokud dojde k lomu za tepla, můžeme na lomové ploše pozorovat přítomnost oxidů. [6]

Identifikace probíhá vizuální kontrolou a jedná se o neopravitelnou vadu. [10]

Příčiny:

Nejčastějšími příčinami této vady jsou poškozený povrch formy, velká drsnost povrchu formy, nedostatečné ošetření líce formy, nedostatečný úkos nebo tloušťka žebra odlitku a předčasné vyjímání odlitku. Čas cyklu i čas potřebný pro ošetření formy by měl být volen dostatečně dlouhý s ohledem na zamezení ulomení části odlitku. [10,13]

Opatření proti vzniku:

Opravením formy, upravením ošetření formy, změnou tvaru odlitku, prodloužením času tuhnutí lze předejít vzniku této vady.



Obr. 10 Ulomená část odlitku [10]

3.3 Nedodržení rozměrů, nesprávný tvar (130)

U těchto vad odlitků se jedná o nedodržení rozměrů, tvarů, hmotnosti nebo jeho borcení. Tyto vady vznikají také vlivem nepřesností při konstrukci a výrobě forem. [8,9]

3.3.1 Přesazení (132)

Přesazení je posunutí jedné části obrysu odlitku oproti druhé, nebo posunutí dutin odlitku oproti vnějšímu tvaru. Povolené odchylky pro přesazení odlitku společně s dalšími odchylkami přesáhly meze, které jsou stanoveny normou nebo výkresovou dokumentací. [6,9]

Ke zjištění vady dochází pomocí vizuální a rozměrové kontroly odlitků. Vadu lze v určité míře opravit pomocí zabroušení. V některých případech se však jedná o vadu neopravitelnou [10]

Příčiny:

Tato vada může vzniknout vlivem špatně slícované formy a také poškozením formy. Přesazení může také vzniknout při nepřesném vedení pohyblivé poloviny formy vodícími sloupy. [10]

Opatření proti vzniku:

K zabránění výskytu této vady je potřeba oprava formy a vodících sloupů. [10]



Obr. 11 Přesazený odlitek [10]

3.3.2 Nevyhovující tvar, zborcení, deformace (134)

Jedná se o změnu tvaru a rozměru odlitku oproti výkresu nebo překročení přípustných odchylek. Bývá způsobena často při manipulaci s odlitkem a konstrukcí formy. [8,9]

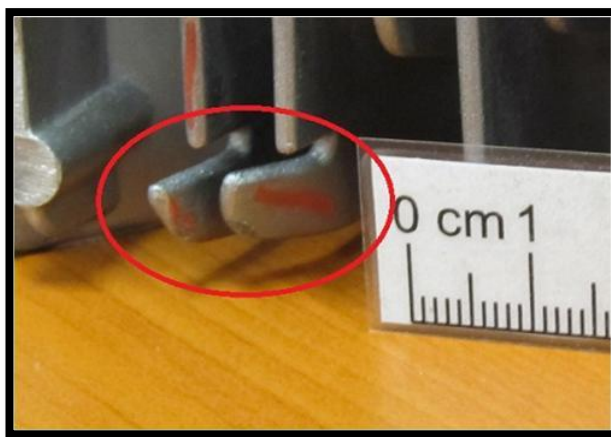
Identifikace probíhá vizuální kontrolou a měřením tvaru a rozměrů odlitku. Pokud je část odlitku mírně ohnuta, lze tuto vadu opravit rovnáním. [10]

Příčiny:

Velmi častými příčinami jsou technologická nekázeň při manipulaci s odlitkem, nesprávné nebo nedostatečné zabalení odlitku, nesprávné založení odlitku do ostříhovacího nástroje a poškozený střížník nebo zakládací plocha v ostříhovacím nástroji. Příčinou může být také malý nános separačního prostředku, krátký čas cyklu, příliš nízký obsah železa v odlévané slitině nebo namáhání odlitku během otevírání formy. Nedostatečně velké úkosy a nevhodný chladicí systém formy vedou taktéž ke vzniku deformací. K deformaci může dojít vlivem vyhazovačů (špatně rozmístěné vyhazovače s nedostatečnou tlačnou plochou, příliš málo vyhazovačů a delší vyhazovače než je potřeba). [8,10,13]

Opatření proti vzniku:

K prevenci vzniku této vady je nutné dodržení technologického postupu určeného pro manipulaci s odlitkem a vhodné balení odlitku. Vliv může mít také úprava programu robota a to jak při vyjímání odlitku z formy, tak i při zakládání odlitku do ostříhovacího nástroje. K eliminaci této vady vedou také úprava zakládací i střížné plochy v ostříhovacím nástroji, změna chladicího systému, kontrola velikosti a rozmístění vyhazovačů, zvětšení úkosů, optimalizace jak postřiku formy, tak i vyjímání odlitku vedou také k eliminaci této vady. [8,10,13]



Obr. 12 Nevyhovující tvar odlitku [10]

4 VADY POVRCHU (200)

Mnohé z těchto vad jsou opravitelné, ale opravy bývají časově náročné, proto se snažíme vyvarovat se jich. Vlivem zvýšených nároků odběratelů na jakost povrchů odlitků se musí přizpůsobovat technologie i management kvality sléváren. [6]

4.1 Připečení (210)

Obecně vady tohoto typu vznikají především vlivem nečistot uvnitř dutiny formy. Vlivem těchto nečistot nastává zhoršení kvality povrchu odlitku, který je nutné ve většině případů opravit. [9]

4.1.1 Drsný povrch (211)

Drsný povrch odlitku vzniká vlivem nečistot a nepřesností v dutině formy, jejíž povrch je kopírován tekutým kovem. [6]

Vada se identifikuje vizuálně a odstranit ji lze po dohodě se zákazníkem omíláním, přetryskáním, nebo přebroušením. [10]

Příčiny:

Drsný povrch odlitku může vzniknout vlivem nedostatečného nahřátí formy před počátkem práce, opotřebované formy, přítomností nečistot a oxidů na povrchu dutiny formy. Povrch dutiny formy může být zoxidován při jejím tepelném zpracování. Tato vada může také vzniknout v případě, kdy se odlévaná slitina lepí na povrch dutiny formy. Toto lepení může být někdy zapříčiněno vlivem nižšího obsahu železa v odlévané slitině. Příčinou vzniku může být také nedostatečný separační postřik formy. [2,10]

Opatření proti vzniku:

K omezení výskytu této vady lze vyměnit formu nebo vložku formy pokud se jedná o výraznější drsnost povrchu. V případě, kdy tato vada není tak markantní, stačí přeleštit vložku ve formě, upravit nanesení separátoru nebo upravit teplotu formy. Pomocí může také zvýšit obsah železa v odlévané slitině. [2,10]



Obr. 13 Drsný povrch odlitku [10]

4.2 Nárosty (230)

Jedná se o výstupky, hrbolky na povrchu odlitku. Většinou se jedná o opravitelnou vadu, ale jedná se o pracnou opravu. [6]

4.2.1 Eroze 234

V případě eroze se jedná o nárost v blízkosti vtokového naříznutí ve směru proudícího kovu. [13]

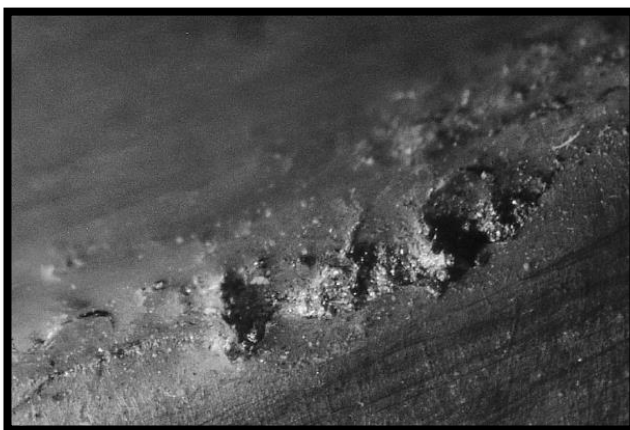
Vadu lze detekovat vizuálně a lze ji opravit broušením odlitku. [14]

Příčiny:

Eroze formy může vzniknout vlivem vysoké rychlosti kovu a dlouhého času plnění. Také může vzniknout vlivem přítomnosti bublin, zvýšeného množství oxidů a křemíku v tekutém kovu. [13,14]

Opatření proti vzniku:

K zamezení výskytu eroze můžeme snížit rychlost kovu při plnění dutiny formy, zkrátit čas plnění, snížit obsah oxidů a křemíku v tavenině nebo provedením důkladnějšího odplynění taveniny. [13]



Obr. 14 Vada vzniklá erozí formy (zvětšení 10x) [13]

4.3 Zatekliny (260)

Vady v této skupině jsou snadno identifikovatelné. Zatekliny jsou v podstatě výronky kovu, které mají různý průměr a tloušťku. Výskyt této vady je v místech veškerých netěsností, které vznikají při úpravě jader a forem. [6,9]

4.3.1 Zatekliny do dělené formy způsobené netěsností formy (261)

Jedná se o zatečení nežádoucího kovu do dělicí roviny. Tyto zatekliny jsou dobře viditelné a ve většině případů nejsou důvodem pro vyřazení a zmetkování. [9]

Vada se detekuje vizuální kontrolou odlitku. Zatekliny lze odstranit ostřížením, olámáním nebo zabroušením. [5,10]

Příčiny:

Zateklina do dělicí roviny vzniká díky nečistotě v dělicí rovině, malé uzavírací síle stroje, vysoké teplotě taveniny nebo deformací formy. Důvodem mohou být také nesprávné výrobní vůle mezi pevnou a pohyblivou částí formy a nevhodně zvolený materiál dílů formy. Nesprávná vůle mezi pevnou a pohyblivou částí může být způsobena opotřebením formy. [5,10,13]

Opatření proti vzniku:

Pro eliminaci této vady je vhodné vyčistit dělicí rovinu formy, zkontrolovat uzavírací sílu stroje a snížit lící teplotu. K zabránění vzniku zateklin do dělicí roviny vedou také pravidelná kontrola geometrie formy, vhodné výrobní tolerance dílů formy a vhodné materiály dílů formy. [10]



Obr. 15 Zateklina do dělicí roviny [10]

4.3.2 Prasklé jádro, zatekliny do pohybových částí formy (262)

Může se jednat o kruhový otřep, který se nachází na odlitku v místě, kde je pomocí vyhazovače vyjímán odlitek z formy. Nebo jde o výčnělek v dutinách odlitku, které vznikají zatečením kovu do praskliny v jádře. [15]

Identifikování zateklin do pohybových částí forem probíhá pomocí vizuální kontroly. Tuto vadu lze odstranit ostřížením, olámáním nebo zabroušením. [10]

Příčiny:

Nejčastějšími příčinami této vady jsou vysoká teplota kovu i formy. Dále tato vada může vzniknout v případě, že vyhazovač má velkou vůli nebo je příliš krátký. Příčinou této vady může být také prasklé jádro. [10,15]

Opatření proti vzniku:

Nápravná opatření k zamezení této vady jsou úprava chlazení formy, snížení teploty kovu, výměna vyhazovače a oprava či výměna prasklého jádra. [10,15]



Obr. 16 Zateklina do vyhazovačů [10]

4.3.3 Zatekliny do prasklin ve formě, prasklá forma (263)

Praskliny ve formě vznikají tepelnou únavou materiálu. Do těchto prasklin zatéká kov, což má negativní vliv na výsledný povrch odlitků. [13]

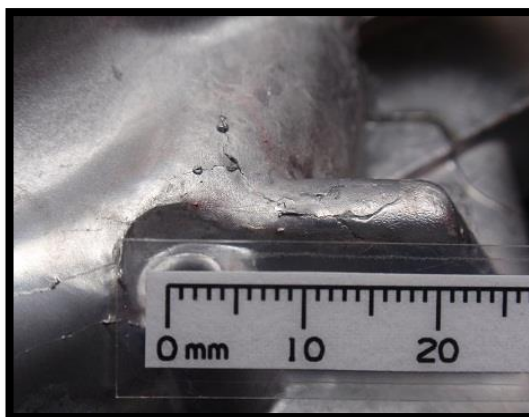
Tato vada se určuje pomocí vizuální kontroly. Odlitky lze opravit apretací pouze tehdy, když se zatekliny nenachází na pohledové ploše. Potom se jedná o neopravitelnou vadu. [10]

Příčiny:

Pokud dojde ke vzniku této vady, jedná se nejčastěji o překročení životnosti formy, která je ovlivněna tepelnou únavou materiálu. Ke vzniku této vady může také dojít volbou nevhodného materiálu formy a nedostatečným ošetřením separačním prostředkem. [10,13]

Opatření proti vzniku:

K zamezení vzniku této vady přispěje vhodná volba materiálu formy a dostatečné ošetření formy separačním prostředkem. Také můžeme provést nápravná opatření tím, že opravíme již vzniklé praskliny ve formě zavařením nebo použijeme vhodnější materiál pro formu. [10,13]



Obr. 17 Zateklina do prasklin ve formě [10]

4.4 Nepravidelnost povrchu (270)

Tyto vady mohou vznikat při nedodržení technologické kázně během odlévání, ale také vlivem nevhodného skladování odlitků. [10]

4.4.1 Mapovitý povrch, stopy po proudění a po mazadlech (272)

Velmi často se jedná se o povrchovou vadu a v mnoha případech jde o stopy po mazadlech. Někdy tato vada může vzniknout při přerušovaném proudění kovu. [13,16]

Identifikování vady probíhá vizuální kontrolou. V některých případech lze tuto vadu odstranit z odlitku tryskáním. [2,16]

Příčiny:

Tato vada může vzniknout při nastavení velké rychlosti v naříznutí, jejímž následkem dochází k přerušování proudu kovu. Vliv může mít také nízká teplota formy i kovu, dlouhá doba plnění odlitku, oxidy a struska uzavřené v odlitku a velmi často mazadla v dutině formy. Netěsnosti u temperování formy, nevhodný dělicí prostředek nebo jeho velké dávkování můžou vést také k zapříčinění mapovitého povrchu. [2,15]

Opatření proti vzniku:

Opatřením se rozumí zkontrolování licích parametrů, dávkování mazání pístů, rafinace slitiny, teploty kovu i formy, čistota taveniny, temperační systém a dávkování separačního prostředku. [15,16]



Obr. 18 Mapovitý povrch odlitku [10]

4.4.2 Zadřeniny (273)

Zadřeniny jsou třpytivě lesklá stopa po vytažení odlitku z formy nebo po odstřížení jeho vtokové soustavy. [13,15]

Vadu lze zjistit pomocí vizuální kontroly. [15]

Příčiny:

Příčinou výskytu zadřenin může být nedostatečný úkos, vysoká teplota formy, poškození formy nebo jader, malá dávka dělicího prostředku a nalepování slitiny na formu (viz vada 277). [2,13,15]

Opatření proti vzniku:

Zadřeny lze eliminovat upravením vtoku, zvětšením úkosů stěn, efektivnějším ošetřením formy separačním prostředkem a opravou formy či jader. [2,15]

4.4.3 Koroze (274)

Původ vzniku koroze může být atmosférický nebo chemický. U hliníkových slitin se nevyskytuje tato vada tak často jako u slitiny železa a uhlíku. [9,10]

Koroze se identifikuje vizuálně a lze ji opravit tryskáním nebo chemickým čištěním. [10]

Příčiny:

Vznik této vady je zapříčiněn nevhodným skladováním ve vlhkém prostředí. Odolnost odlitků vůči korozi snižuje měď. [10]

Opatření proti vzniku:

Opatřením proti vzniku koroze je vhodné skladování odlitků v suchém prostředí, případně vhodná volba materiálu odlitku (bez obsahu mědi).[10]



Obr. 19 Koroze na povrchu odlitku [10]

4.4.4 Odlup, šupina (276)

Jedná se o typickou povrchovou vadu, ale v některých případech se může jednat o vnitřní vadu. Na povrchu odloupenutého materiálu můžeme najít tenkou vrstvu oxidů. [14]

Tuto vadu lze identifikovat vizuální kontrolou a měřením rozsahu odloupenutí lze pomocí ultrazvuku nebo metalografického výbrusu. Odlitek lze opravit mechanickým odstraněním odlupu případně přetrykáním. [10,14]

Příčiny:

Vznik této vady může být zapříčiněn nesprávným charakterem plnění formy, příliš drsným povrchem formy, nedostatečným postřikem formy nebo nevhodnými parametry tryskání. Ke vzniku odloupenutí materiálu přispívá také nesprávná teplota kovu nebo formy. [10]

Opatření proti vzniku:

K odstranění výskytu této vady může vést kontrola vstřikovacích parametrů (rychlejší čas plnění), správná teplota formy, stálá teplota formy v kritické oblasti, upravení parametrů tryskání, úprava povrchu a ošetření formy a změna teploty kovu. [10,13]



Obr. 20 Odloupnutá vrstva materiálu [10]

4.4.5 Nalepování kovu (277)

Jedná se o interakci mezi tekutým kovem a formou, při které se odlévaný kov lepí na povrch formy nebo jádra. Vlivem této interakce dochází k vytržení vrstvy materiálu z odlitku. [13,15]

Nalepování lze detekovat vizuální kontrolou, případně metalografickým výbrusem. [14]

Příčiny:

Nalepování kovu může vzniknout díky narážení teplého kovu při vstupu do dutiny na díl formy, vysoké teplotě formy, vysoké rychlosti kovu v naříznutí, nevhodnému ošetření formy (nevhodný prostředek nebo jeho nedostačující dávkování), špatnému stavu povrchu formy i krátké doby cyklu. Příčinou může být také nízký obsah železa v odlévané slitině. [1,2,15]

Opatření proti vzniku:

Pro minimalizaci této vady se provádí kontrola teploty částí formy, kde se na ní kov nalepuje. V této oblasti se také zvyšuje postřik formy. Zvýšení času cyklu, snížení rychlosti kovu v naříznutí nebo změna jeho polohy vedou k eliminaci nalepování kovu na povrch formy. Provádí se také úprava chemického složení odlévané slitiny. [1,2,13]



Obr. 21 Vytržená vrstva materiálu z odlitku vlivem nalepení kovu na formu [13]

5 PORUŠENÍ SOUVISLOSTI (300)

V podstatě jde o vady, kterými jsou trhliny a praskliny. Dále se jedná o porušení souvislosti z důvodu nespojení kovu. V české slévárenské terminologii se pojmem trhlina označuje vada vzniklá při vysokých teplotách a prasklina vada, která vzniká při nízkých teplotách. Zatímco v zahraniční literatuře se pro obě vady užívá termín trhlina za studena nebo za tepla. [9]

5.1 Trhliny (310)

Trhlina je definována jako porušení souvislosti materiálu, které se šíří po hranicích dendritů. Interkrystalický lom, kterým trhlina vzniká, je jednou z indicií pro určení, zda se jedná o trhlinu nebo nikoliv. Dalším důkazem pro identifikaci trhliny je její křivolaký průběh. [17]

Vady typu trhliny vznikají po ztuhnutí odlitku a to ještě při vysokých teplotách (okolí solidu) a jsou namáhány v tahu. [9,17]

5.1.1 Povrchové trhliny (311)

Jedná se o pouhým okem viditelné natržení nebo roztržení odlitku, které je charakteristické svým křivolakým průběhem a zoxidovaným povrchem. Tento křivolaký průběh je vyvolán tím, že trhlina probíhá po hranicích dendritů při teplotách v blízkosti teploty solidu. [6]

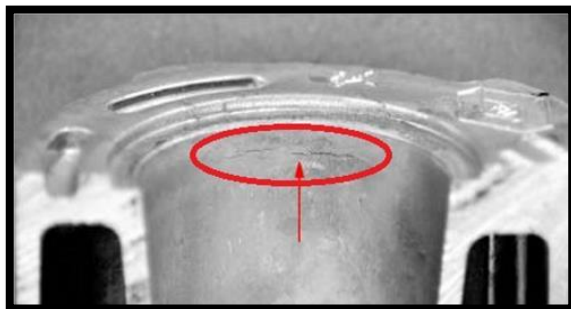
Povrchové trhliny lze identifikovat pomocí ultrazvuku, kapilární zkoušky nebo vizuální kontroly. Jedná se o neopravitelnou vadu. [10]

Příčiny:

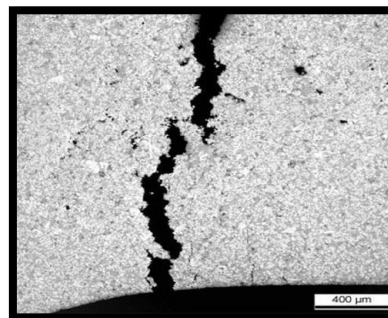
Trhlina vzniká krátce po ztuhnutí odlitku, kdy je tažnost a pevnost materiálu ještě velice nízká a kdy i poměrně malé síly mohou vyvolat trhlinu v odlitku. Výskyt této vady se také projevuje u odlitků s různými tloušťkami stěn. Vliv na vznik povrchových trhlín má také nevhodné teplotní pole formy, velký obsah železa a mědi. [2,10]

Opatření proti vzniku:

K odstranění této vady vede změna geometrie odlitku, změna teplotního pole formy nebo změna typu slitiny. [10]



Obr. 22 Povrchová trhlina [10]



Obr. 23 Metalografický výbrus povrchové trhliny [10]

5.1.2 Vnitřní trhliny (313)

Vnitřní trhliny se vyznačují vnitřním porušením souvislosti materiálu. Jedná se o porušení, která kopírují hranici dendritů. [5,15]

Vada se identifikuje pomocí RTG, CT, ultrazvuku a metalografického výbrusu. Vnitřní trhliny jsou neopravitelnou vadou. [10]

Příčiny:

Příčinou vnitřního porušení souvislosti materiálu je vnitřní tahové napětí v odlitku a tepelné pnutí. Tato pnutí vznikají u velkých rozdílů tloušťek stěn odlitků a neusměrněným průběhem tuhnutí. Vnitřní trhliny vznikají také při vysoké teplotě kovu nebo formy. [6,10]

Opatření proti vzniku:

K zamezení vzniku vnitřních trhlin vede změna konstrukce odlitku (zmenšení rozdílů tloušťky stěn), dostatečné chlazení formy a snížení teploty kovu nebo formy. [10]



Obr. 24 Vnitřní trhlina [10]



Obr. 25 Metalografický výbrus vnitřní trhliny [10]

5.2 Praskliny (320)

Při vzniku vnitřních poruch souvislosti materiálu se nejdříve řeší problém související s vnitřním pnutím v odlitku. Vnitřní pnutí souvisí se smršťováním v tuhém stavu vlivem nestejnomyšerného chladnutí, jedná se o pnutí tepelné. Souvisí také s mechanickým odporem forem a jader vůči smrštění, jedná se o smršťovací pnutí. Během ochlazování se hodnoty pnutí mění a po vychladnutí zůstávají v odlitku zbytková pnutí. Pokud má odlitek poddajnou konstrukci, může se část pnutí uvolnit plastickou deformací, dojde tedy k borcení odlitku. Pokud má odlitek tuhoun konstrukci, nedojde k uvolnění pnutí plastickou deformací a jestli pnutí dosáhne meze pevnosti materiálu, nastane porušení materiálu. [6,9]

Pnutí je úměrné smrštění, modulu pružnosti a rozdílu teplot [17]:

$$\sigma_0 = \alpha \cdot E \cdot \Delta T \text{ [Mpa]} \quad (5.1)$$

σ_0 ... vnitřní tepelné tahové napětí [MPa]

α ...součinitel tepelného smrštění [$1/^\circ\text{C}$]

E ...modul pružnosti materiálu [MPa]

ΔT ...teplotní gradient [$^\circ\text{C}$]

5.2.1 Praskliny způsobené při vyjímání odlitků z formy (322)

Tato vada vzniká během chladnutí odlitku a oproti trhlinám se vyznačuje nezoxidovaným povrchem a rovným průběhem. Na rozdíl od trhlín vznikají také praskliny v teplotní oblasti, kde převládají pružné deformace, tedy při nižších teplotách. [13,17]

Identifikace vady probíhá vizuální kontrolou nebo pomocí kapilární zkoušky. Praskliny lze definovat jako neopravitelnou vadu. [10]

Příčiny:

Tato vada vzniká také vlivem mechanického namáhání, které vzniká při otvírání formy, při vyjímání odlitku z formy i vlivem ostříhu vtokové soustavy. Na vznik prasklin jsou náchylné také odlitky s různou tloušťkou stěn a při nedostatečném ošetření formy [9,13].

Opatření proti vzniku:

Omezit výskyt této vady lze navrhováním odlitků pokud možno se stejnými tloušťkami stěn, omezení míst koncentrujících napětí (přidání rádiusů všude kde je to možné), upravit dobu vyjmutí i ošetření formy separačním postříkem. Také úprava úkosů (pro snadnější vyjímání) přispívá k eliminaci vzniku prasklin. [9,13]



Obr. 26 Prasklina vzniklá při vyjímání odlitku z formy [10]

5.3 Porušení souvislosti z důvodu nespojení kovu (340)

Vadami tohoto typu jsou typické rýhy, prohlubně nebo zvrásnění se zaoblenými okraji, které se objevují na povrchu odlitku. Vznikají převážně u kovů s vysokou oxidací povrchu během odlévání (vytváří se oxidické pleny s vysokou teplotou tavení) a vznikají také u odlitků tvarově složitějších, u nichž dochází k intenzivnímu ochlazení povrchu kovu. [6,9]

5.3.1 Studené spoje a zavaleniny (341)

Proud slitiny se rozdělí na více proudů. Tyto proudy jsou ochlazeny, ztratí tlak nebo čelo proudu zoxiduje a předáním tepla se natuhlé proudy již nespojí (viz obr. 27). Další možností vzniku této vady je, že ve formě je vzduchový polštář, který svým odporem rozdělí proud slitiny. Můžeme pozorovat směry proudění a tím i vzniklé nerovnosti. Vzhled studeného spoje se mění od malých čar přes větší rýhy až k prohlubním, které nazýváme zavaleniny. Zavaleniny vznikají tak, že teplý proud kovu narazí na studené dřívě vzniklé vrstvy kovu. [2,15]

Identifikace této vady může probíhat vizuální kontrolou odlitku, pomocí metalografického výbrusu, nebo kapilární zkouškou. Tato vada je neopravitelná. [10,16]

Příčiny:

Studené spoje a zavaleniny vznikají díky nízké teplotě kovu, nízké rychlosti kovu, která způsobuje dlouhou dobu plnění. Nízká teplota formy taktéž způsobuje tuto vadu a je způsobena dlouhou dobou cyklu, nadměrným postřikem dělicího prostředku a nadměrným chlazením chladícím médiem. Tato vada může vznikat i vlivem nepříznivé polohy nařiznutí, z čehož plyne dlouhá dráha proudu kovu, dále vlivem nedostatečného odvzdušnění formy, uzavřeného plynu nebo vody ve formě a špatně navrženého nařiznutí (nízká rychlost kovu v nařiznutí). [10,15,16]

Opatření proti vzniku:

K zamezení výskytu studeného spoje a zavaleniny lze zvýšit licí tlak, změnit umístění vtokového naříznutí, zlepšit nebo vyčistit odvodušňovací systém, upravit parametry plnění, zvýšit licí teplotu kovu. Další prevencí výskytu této vady může být zabránění uzavírání plynu nebo vody v dutině formy a zvýšení teploty formy pomocí zkrácení doby cyklu, snížení postřiku formy, snížení chlazení a zvýšení temperace formy. [2,10,13]



Obr. 27 Studený spoj [10]

6 DUTINY (400)

Odličky, které obsahují vady z této třídy, se obvykle považují za neopravitelné. Tyto vady jsou způsobeny přítomností plynů v kovu nebo ve formě a také objemovými změnami při tuhnutí kovu. [6]

6.1 Bubliny (410)

Vodík je jediným plynem rozpustným v hliníku a jeho slitinách. Tekutý hliník reaguje se vzdušnou vlhkostí za vzniku oxidů hliníku a vodíku podle vztahu [1,18]:



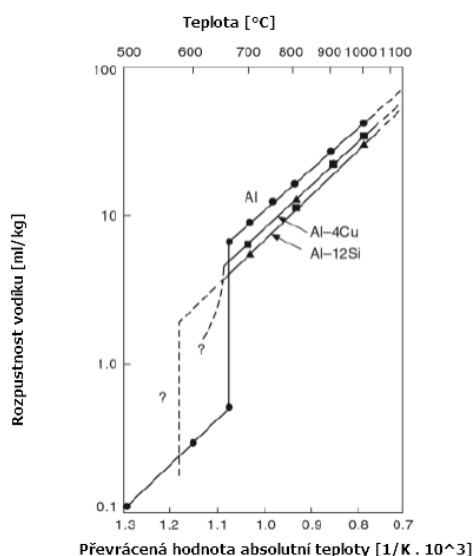
Rozpustností vodíku rozumíme maximální množství vodíku, které je možno za rovnovážných podmínek v kovu určitého složení rozpustit. Rozpustnost vodíku se určuje podle vztahu [1]:

$$\log S = \frac{1}{2} \log p_{\text{H}_2} - \frac{A}{T} + B \quad (6.2)$$

kde : S – rozpustnost vodíku v tavenině [$\text{cm}^3/100 \text{ g}$]
 p_{H_2} – parciální tlak vodíku v okolní atmosféře [kPa]
 T – teplota kovu [K]
 A, B – konstanty pro daný kov [-]

Ze vztahu (6.2) lze vyvodit, že rozpustnost vodíku závisí na teplotě kovu, parciálním tlaku vodíku, chemickém složení slitiny a rychlosti ochlazování. Vliv teploty kovu je zobrazen na obr. 28. Zde lze pozorovat rozdíl v rozpustnosti vodíku, když je daná slitina buď v tekutém, nebo tuhém stavu. Při tuhnutí taveniny dochází vlivem tohoto rozdílu k vylučování

přebytečného vodíku, který nelze ve slitině dále rozpustit. Tento přebytečný vodík se nejčastěji vyloučí ve formě bublin. [19]

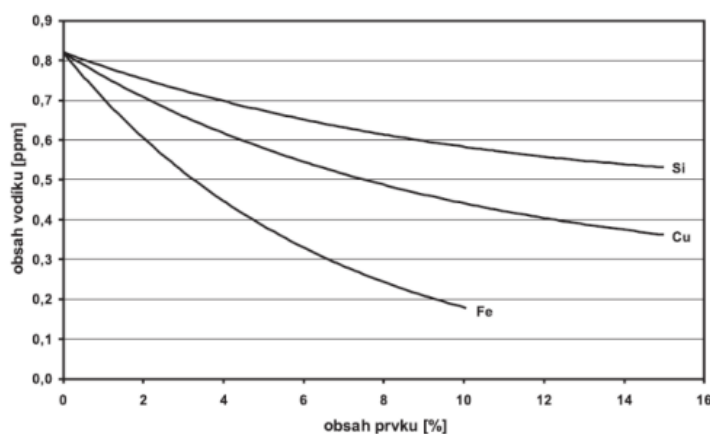


Obr. 28 Rozpustnost vodíku v čistém hliníku a ve dvou různých slitinách [20]

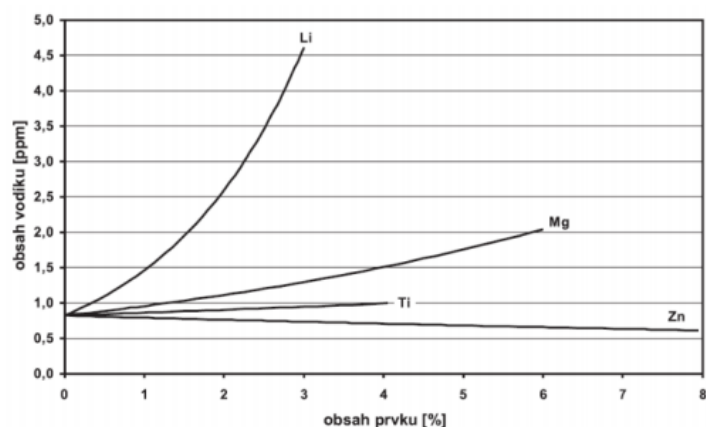
Při dané teplotě závisí rozpustnost vodíku na jeho parciálním tlaku v okolní atmosféře. Tuto závislost vyjadřuje Sievertsův zákon [1]:

$$S = k \cdot \sqrt{p_{H_2}} \quad (6.3)$$

Vliv chemického složení na rozpustnost vodíku charakterizují obr. 29, 30. Na obr. 29 lze pozorovat vliv přísadových prvků, které snižují rozpustnost vodíku v hliníkových slitinách. Zatímco obr. 30 nám ukazuje vliv přísadových prvků, které rozpustnost vodíku v hliníku zvyšují. [21]



Obr. 29 Vliv přísadových prvků na snižování rozpustnosti vodíku v Al – slitině [22]



Obr. 30 Vliv přísadových prvků na zvyšování rozpustnosti vodíku v Al – slitině [22]

Vylučování vodíku je difúzní děj, který je závislý na čase. Proto rozpustnost vodíku v hliníkových slitinách je závislá na rychlosti ochlazování. Čím je ochlazování rychlejší (např. vysokotlaké lití), tím má vodík méně času na difúzi, a proto zůstává rozpuštěn v tuhé fázi. Tento stav je nazýván také jako přesycený roztok. Pokud dojde k překročení meze rozpustnosti, tak vodík z taveniny uniká difúzí nebo se vytvoří plynové dutiny. Bubliny mohou vznikat dvěma mechanismy. Jedná se o homogenní a heterogenní nukleaci. [1]

Homogenní nukleace

Pokud dojde k dosažení nadkritického stavu rozpuštěného vodíku a tím získá požadovaný nadkritický tlak, tak v tomto případě dochází k nukleaci bublin. Při homogenní nukleaci není bublina v kontaktu s žádnou tuhous částicí. U tohoto typu vzniku bublin se jedná o velice energeticky náročný proces, při kterém je zapotřebí překonat značné síly, které zabraňují vzniku bublin. [23]

Aby bublina vznikla homogenní nukleací, je zapotřebí, aby tlak v bublině vodíku p_{H_2} byl vyšší než součet tlaků metalostatického ($p_{met.}$), atmosférického (p_{atm}) a tlaku který je vyvolán povrchovým napětím (p_{σ}) podle rovnice [1]:

$$p_H > p_{atm} + p_{met} + p_{\sigma} \quad (6.4)$$

Z těchto uvedených tlaků je významný především tlak vyvolaný povrchovým napětím, který je pro kulovitou bublinu daný vztahem [1]:

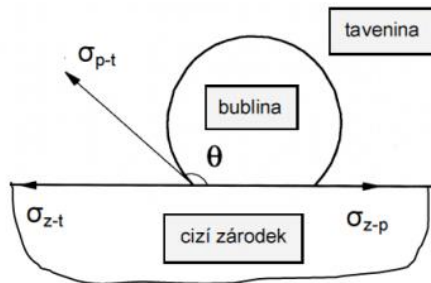
$$P_v = \frac{2\sigma}{r} \quad (6.5)$$

Kde: σ – povrchové napětí na rozhraní tavenina-bublina
 r – poloměr bubliny
 P_v – tlak vyvolaný povrchovým napětím pro kulovitou bublinu

Pro vznik homogenní nukleace je zapotřebí překonání vysokého tlaku vyvolaného povrchovým napětím a z tohoto důvodu je homogenní nukleace nepravděpodobný děj. Ve skutečnosti se bubliny tvoří pouze mechanismem heterogenní nukleace. [1]

Heterogenní nukleace

U heterogenní nukleace je důležitý úhel smáčení mezi bublinou a tuhou částicí, která slouží jako zárodek pro vznik bubliny. [19]



Obr. 31 Tvorba bublin na cizím zárodku [1]

Úhel smáčení je určen poměrem a velikostí napětí podle rovnice [1] :

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{z-t} - \sigma_{z-p}}{\sigma_{p-t}} \quad (6.6)$$

kde: σ_{z-t} – povrchové napětí mezi zárodkem a taveninou
 σ_{z-p} – povrchové napětí mezi zárodkem a plynem
 σ_{p-t} – povrchové napětí mezi plynem a taveninou

Pokud je [22]:

$\theta = 0^\circ$	úplná smáčivost
$\theta < 65^\circ$	dobrá smáčivost
$\theta > 65^\circ$	špatná smáčivost
$\theta = 180^\circ$	úplná nesmáčivost

Vhodné nukleační zárodky pro vznik bublin jsou ty, které nejsou smáčivé s taveninou. Jedná se především o oxidy, zárodky s menší účinností jsou boridy, nitridy, karbidy. Z tohoto nám vyplývá, proč množství bublin tak významně závisí na přítomnosti oxidických vměstků v tavenině. [1]

6.1.1 Bublina způsobené vodíkem (412)

Jak již bylo zmíněno je vodík jako jediný plyn, který lze rozpustit ve slitinách hliníku. Tedy se jedná o jediný plyn, který přispívá k vytvoření bublin mechanismy popsány v kapitole 6.1. Hlavním a v podstatě jediným zdrojem vodíku je vlhkost. Bublina mají kruhový tvar s hladkým a nezoxidovaným povrchem. Tato vada se u technologie vysokotlakého lití vyskytuje méně často než vada zahlcený vzduch. [14,18]

K identifikaci vodíkových bublin se používá kapilární zkouška, vizuální kontrola a metalografický výbrus. [10,15]

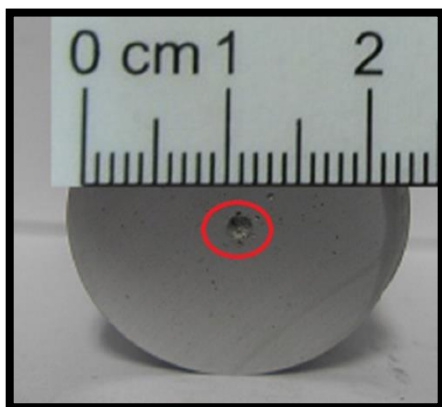
Příčiny:

Bublina mohou vznikat díky vysokému naplynění taveniny, přehřáté tavenině a nedostatečnému ofuku formy stlačeným vzduchem po postřiku (zůstane vlhkost v dutině formy). Vliv může mít také znečištěný, vlhký nebo studený vsázkový materiál a vlhké

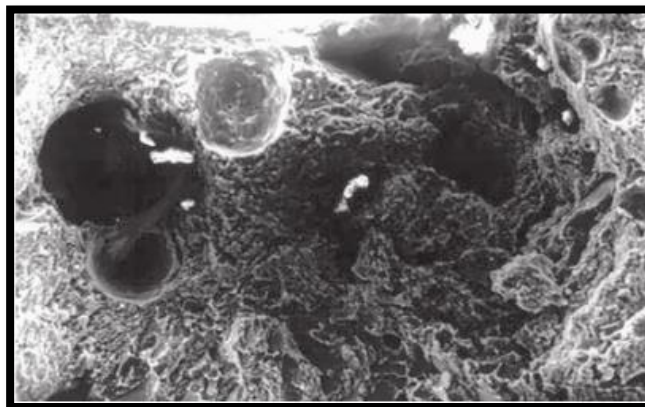
metalurgické prostředky, kelímky, nářadí i vyzdívkou. Na vznik bublin má vliv i přítomnost oxidických vměstků, protože jsou vhodnými nukleárními zárodky bublin. [10,13,15]

Opatření proti vzniku:

K zamezení výskytu této vady je nutné používat čistý, suchý a předeřtý vsázkový materiál, suché metalurgické prostředky, nářadí, kelímky i vyzdívkou. Dále je důležitá dostatečná rafinace a odplynění, důkladný ofuk formy po postřiku a dodržení optimální lící doby. Pro snížení výskytu bublin je vhodné snížit množství oxidických vměstků. [10,13]



Obr. 32 Bublina způsobená vodíkem [10]



Obr. 33 Bublina způsobená vodíkem na elektronovém rastrovacím mikroskopu [24]

6.1.2 Zahlcený plyn, vzduch, pára (414)

Tato vada vzniká uzavřením vzduchu v oblasti, která se nachází těsně pod povrchem stěny odlitku nebo tato vada může vznikat i na povrchu odlitku. Vlivem velkého tlaku v bublině a malé pevnosti slabé stěny u ještě horkého odlitku dochází ke vzniku tzv. puchýře. Při tepelném zpracování odlitků se může vyskytnout stejný problém. [8,15]

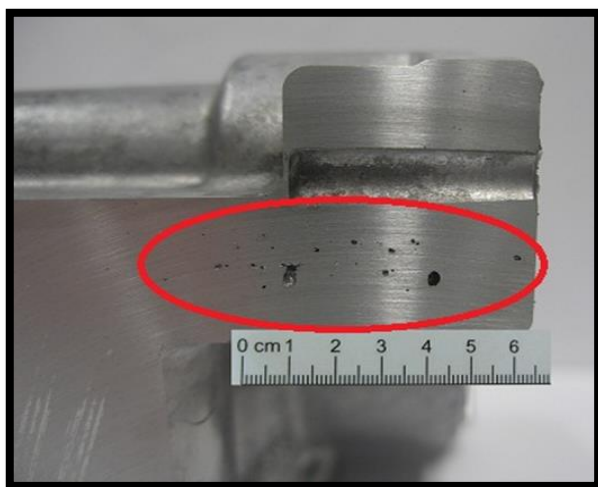
Tuto vadu lze identifikovat vizuálně po odlití nebo po obrobení, pomocí metalografického výbrusu, RTG, CT nebo ultrazvuku. Jedná se o neopravitelnou vadu. [10]

Příčiny:

Příčiny vzniku této vady lze především hledat v nedostatečném odvzdušnění formy, v nesprávném zaústění vtokového naříznutí, umístění chladících kanálů a špatně odplyněné tavenině. Na vznik této vady má také vliv přehřátá forma, velká lící teplota slitiny, nízký a nesprávně naběhnutý dotlak, otevření formy krátce po vyplnění její dutiny, únik vody či oleje do dutiny formy díky její netěsnosti, zbytky vody ve formě po separačním postřiku a špatné nebo příliš rychlé plnění dutiny. [8,10,15,25]

Opatření proti vzniku:

Výskyt vady lze omezit úpravou odvzdušnění formy, úpravou teploty (snížení teploty formy), úpravou parametrů plnění (prodloužení doby tuhnutí, upravení náběhu a hodnoty dotlaku). K zamezení vzniku této vady vede i snížení lící teploty kovu a změna zaústění vtokového naříznutí. [13,15]



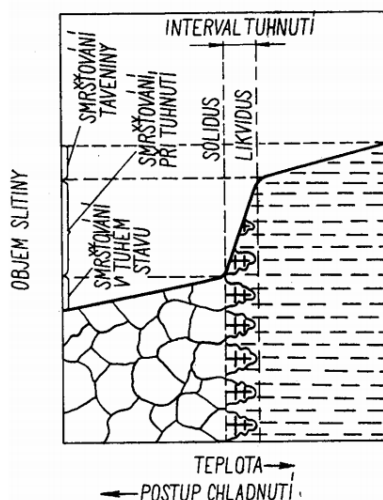
Obr. 34 Zahlčený vzduch [10]



Obr. 35 Zahlčený vzduch na povrchu odlitku [26]

6.2 Staženiny (440)

Staženiny jsou ovlivněny objemovým smršťováním. Toto smršťování je vedlejším jevem při přechodu tekutého kovu do pevné krystalické fáze. Staženiny lze definovat jako ostrohranné dutiny, které zmenšují průřez součásti a výrazně snižují mechanické vlastnosti a to zejména plastické vlastnosti. [6]



Obr. 36 Objemové změny při tuhnutí [27]

6.2.1 Otevřené staženiny (441)

Otevřené staženiny jsou vnější otevřené dutiny s hrubě krystalickým, zoxidovaným povrchem, který zasahuje do určité hloubky odlitku. Objevuje se v místě tepelného uzlu. Jestliže staženina vystoupí na povrch odlitku, můžeme ji definovat jako otevřenou (povrchovou) staženinu. [6]

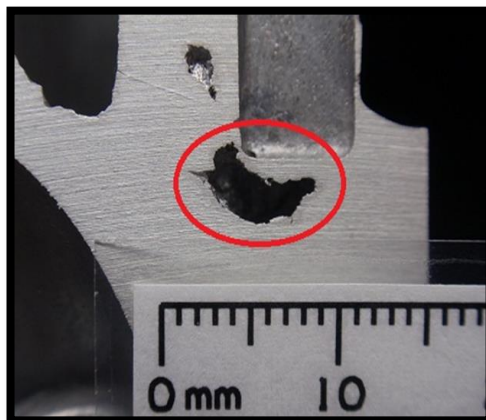
Příčiny:

Otevřené staženiny mohou vznikat vlivem nedostatečného odvodu tepla z formy, vysoké lící teploty kovu nebo neusměrněným průběhem tuhnutí. Neusměrněným průběhem tuhnutí rozumíme způsob tuhnutí, při kterém kov tuhne postupně od

nejvzdálenějších míst s nejmenší relativní tloušťkou směrem k místu s největší relativní tloušťkou. [6,10]

Opatření proti vzniku:

Pro snížení zmetkovitosti, která nastává vlivem této vady, můžeme snížit licí teplotu kovu, upravit geometrii odlitku, upravit chlazení a postřík nebo očistit formu.[10]



Obr. 37 Otevřená staženina [10]

6.2.2 Vnitřní, uzavřené staženiny (442)

Tato vada je charakterizována hrubým nebo hrubě krystalickým povrchem. Na povrchu lze vidět dendrity s různou velikostí. [14]

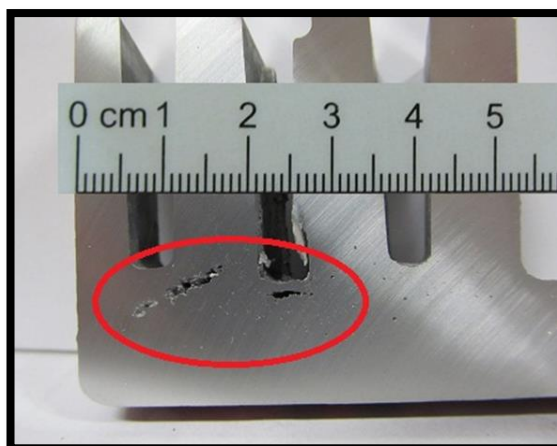
Identifikace vady probíhá vizuální kontrolou odlitku po obrobení, pomocí RTG, CT, ultrazvuku a také metalografického výbrusu. [10]

Příčiny:

Vnitřní staženina může vzniknout nevhodným průběhem tuhnutí, vysokou licí teplotou kovu nebo nevhodnými licími parametry. [10]

Opatření proti vzniku:

K zamezení výskytu této vady vede úprava chlazení formy, úprava postříku formy, snížení licí teploty kovu nebo optimalizace parametrů lití. [10]



Obr. 38 Vnitřní staženina [10]

6.2.3 Řediny (443)

Řediny mohou být charakterizovány jako drobné staženiny, které se vyskytují v tepelném uzlu nebo v tepelné ose odlitku. Vznikají v konečné fázi tuhnutí a jedná se shluky nebo řetězce ředin po délce či výšce odlitku. Shluky ředin se vyskytují především v tlustších stěnách nebo spojích, kde se nachází lokální tepelný uzel odlitku (tvořen například zaústěním vtokového naříznutí). Řediny mohou způsobit porézní stěnu odlitku a tím tedy i tlakovou netěsnost odlitků. [6]

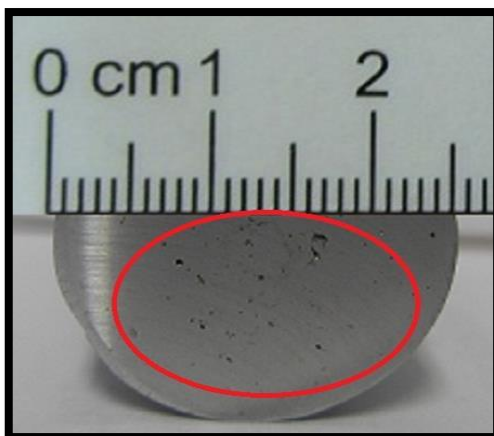
Tuto vadu lze určit pomocí RTG, CT, ultrazvuku, tlakové zkoušky, metalografického výbrusu, kapilární zkoušky a vizuální kontroly po obrobení. [10]

Příčiny:

Příčinou vzniku ředin může být tenký vtokový kůl (tableta), nedostatečný dotlak nebo vysoká lící teplota kovu. Tuto vadu může způsobit také dlouhý lící čas, širší naříznutí nebo nevhodné umístění naříznutí. [13]

Opatření proti vzniku:

Pro eliminaci ředin lze zvýšit dotlak, snížit lící teplotu kovu nebo zajistit širší tabletu. V případě, že se řediny vyskytují vlivem naříznutí, můžeme tuto vadu eliminovat díky snížení lícího času, ztenčení naříznutí nebo přesunutí naříznutí do druhé poloviny formy, která by mohla mít menší teplotu. [13]



Obr. 39 Řediny [10]

6.2.4 Staženiny od jader nebo ostrých hran formy (444)

Jedná se o vnitřní uzavřené staženiny (vada 442) nebo o řediny (vada 443) způsobené smršťováním kovu při tuhnutí. Tato vada vzniká v oblasti tepelných uzlů, v oblasti jader (jedná se především o malá a nedostatečně chlazená jádra) nebo v okolí ostré hrany formy. Staženina někdy bývá doprovázená trhlinou. [9]

Identifikace probíhá pomocí RTG, CT, metalografického výbrusu a vizuální kontroly. Tato vada je neopravitelná. [10]

Příčiny:

Příčinou vzniku staženin je přehřátý povrch formy nebo jádra, nevhodný odvod tepla z formy nebo jádra, tenký vtokový kůl (tableta), neusměrněný průběh tuhnutí, vysoká lící teplota, nebo nevhodná konstrukce formy. [13]

Opatření proti vzniku:

K eliminaci této vady přispívá úprava chlazení formy, optimalizace postřiku formy, snížení lící teploty kovu, přidáním squeeze pinu do oblasti výskytu vady a úpravou konstrukce formy (změnou ostrých rohů formy za rádiusy). [13]

6.2.5 Povrchové propadliny (445)

Jedná se o propadlý povrch odlitku, který naznačuje přítomnost uzavřené staženiny. Tato staženina se nachází přímo pod propadlým místem. Vznik této vady spočívá ve vzniku podtlaku v dutinách, které se tvoří při objemovém smršťování kovu. Velikost poklesu povrchu se řídí velikostí staženiny pod ním. [6,14]

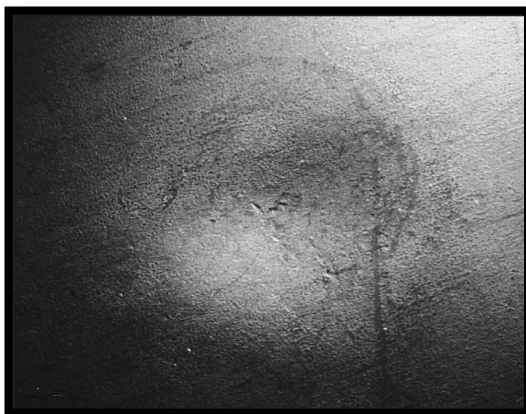
Identifikace může probíhat vizuální kontrolou nebo metalografickým výbrusem. Jedná se o neopravitelnou vadu. [10]

Příčiny:

Povrchové propadliny vznikají díky tenkému vtokovému kůlu (tabletě), neusměrněnému tuhnutí odlitku, vysoké lící teplotě kovu, příliš nízkému indexu hustoty, tenkému nařiznutí nebo vysoké místní teplotě formy. [10,13,15]

Opatření proti vzniku:

Tuto vadu lze eliminovat vhodnějším zavtokováním, úpravou chlazení (zejména tepelných uzlů), úpravou postřiku, licích parametrů nebo snížením lící teploty kovu. Metalurgické ošetření taveniny (řízené naplynění taveniny) může vést ke snížení výskytu povrchových propadlin. [10,13]



Obr. 40 Propadlina na povrchu odlitku [13]

7 MAKROSKOPICKÉ VMĚSTKY A VADY MAKROSTRUKTURY (500)

Jedná se o cizorodé kovové nebo nekovové částice nerozpustné v tavenině. Podle příčiny jejich vzniku dělíme tyto částice na exogenní a endogenní. [28]

Mezi exogenní vměstky řadíme vměstky, které se do taveniny dostávají zvenčí během tavení a odlévání. Většinou jde o částice žáruvzdorných vyzdívek nebo licích zařízení a zbytky solí, které byly použity k metalurgickým účelům. [1]

Endogenní vměstky vznikají díky oxidaci hliníku a dalších prvků, chemickým reakcím mezi jednotlivými prvky v samotné tavenině. Tyto vměstky mohou být v roztaveném kovu buď v tekutém, nebo v tuhém stavu a také mohou mít podobu částic, shluků nebo filmu. [1]

Obě skupiny vměstků jsou v tavenině nežádoucí, protože snižují mechanické vlastnosti, odolnost proti korozi, slévárenské vlastnosti, obrobitelnost a těsnost odlitků.

Tyto nerozpustné vměstky lze z taveniny odstranit odstáním taveniny, profukováním taveniny aktivními a inertními plyny nebo filtrací taveniny. [1,28]

7.1 Nekovové vměstky (520)

Jsou to vměstky z keramických materiálů, jejichž zdrojem je vyzdívka v peci, dále se jedná o zbytky keramických filtrů, náterových hmot nebo solí použitých k metalurgickým účelům. [28]

7.1.1 Oxidické pleny, vměstky (524)

Oxidické pleny vznikají při reakci taveniny s kyslíkem ze vzduchu. Tavenina se pokrývá tenkou vrstvou oxidu hlinitého. Velikost těchto oxidických plen může být od několika desítek μm až po několik mm. Vměstky oxidických plen mohou vznikat v tavící peci (z odpadů jejichž povrch obsahuje oxidické blány) nebo při pohybu taveniny při jejím přelévání. [28]

Vměstky velmi často vznikají technologickou nekázní při celém procesu tavení i odlévání tekutého kovu. [29]

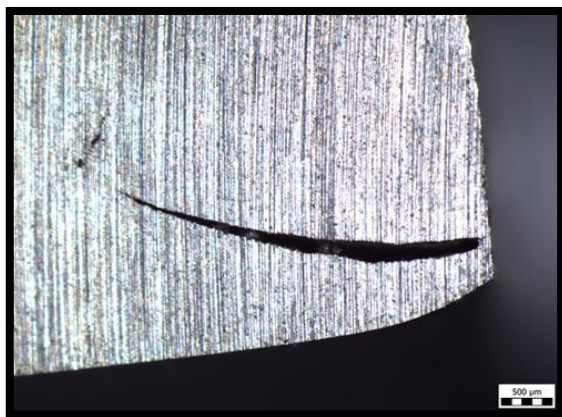
Tento typ vady se identifikuje vizuální kontrolou, pomocí RTG, CT, metalografického výbrusu, tlakové a kapilární zkoušky. [10]

Příčiny:

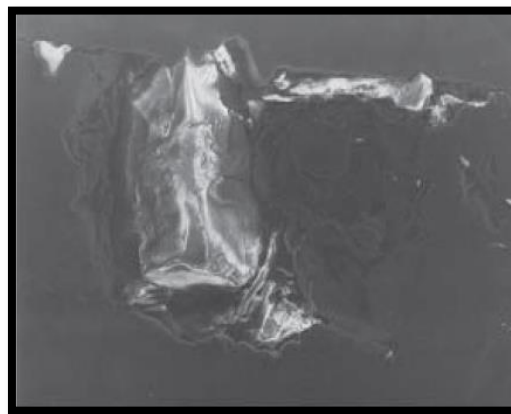
Příčinou vzniku těchto vad může být nedostatečná rafinace taveniny, nevhodná manipulace s taveninou (rozstřík a víření), nevhodně zvolená lící komora a její nízká teplota, nízká lící teplota kovu, nevhodné lící parametry a také nevhodné zavtokování. [1,10]

Opatření proti vzniku:

K zabránění vzniku této vady může vést správné ošetření taveniny, správná manipulace s taveninou (omezit její víření v udržovacích pecích, omezit její přelévání a také zbytečně s taveninou nemíchat), použít temperaci na lící komoru a také zvýšit její stupeň zaplnění, zvýšení lící teploty, úprava vtokového kanálu a v neposlední řadě úprava lících parametrů. [1,10]



Obr. 41 Oxidická plena [10]



Obr. 42 Oxidická plena z elektronového rastrovacího mikroskopu (zvětšení 200 x) [28]

7.2 Broky (540)

Broky jsou malé a zoxidované kovové městky. Obvykle jsou ve formě kuliček a jejich složení odpovídá složení slitiny daného odlitku. [6,9]

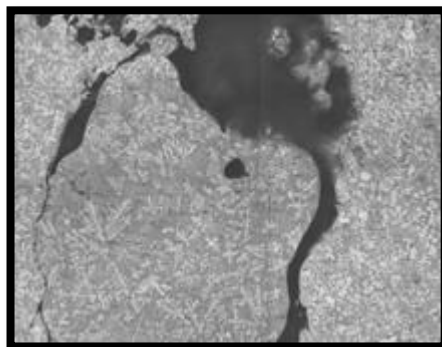
Identifikace broků probíhá vizuální kontrolou nebo metalografickým výbrusem. [14]

Příčiny:

Tato vada může vzniknout nesprávnou konstrukcí odlitku a vtokové soustavy, také nevhodnou polohou naříznutí, ale i nesprávným náběhem druhé fáze. Tyto příčiny dovolují tříštění proudu kovu a tím tvorbu kapek, které se usazují v různých místech formy a ochlazují se zde. Tyto kapky jsou ihned obaleny vrstvou oxidů, a proto nedochází k jejich opětovnému natavení. Z tohoto důvodu již nedojde ke spojení těchto kapek s proudem kovu. Broky lze často nalézt v plynových bublinách. Rozměry bublin jsou větší než rozměry broků. [6,9]

Opatření proti vzniku:

K zamezení výskytu broků vede správná konstrukce odlitku a vtokové soustavy, u které je důležité zamezení rozstříku kovu. Dalšími opatřeními mohou být klidné plnění dutiny formy, snížení ochlazovacího účinku formy a snížení lící teploty kovu. [9]



Obr. 43 Metalografický výbrus broku [14]

8 VADY CHEMICKÉHO SLOŽENÍ A VLASTNOSTÍ ODLITKŮ (700)

Jedná se výhradně o neshody od norem a sjednaných podmínek. Jde především o nesprávné chemické složení a nesprávné vlastnosti odlévaného odlitku. [6]

8.1 Nevyhovující chemické složení (710)

Jedná se o vadu, při které nastává odchylka chemického složení materiálu odlitku od požadované normy nebo sjednaných technických podmínek. Rozbor tavby probíhá pomocí určení chemického složení taveniny, které by mělo odpovídat chemickému složení daného normou. V případě, že nebyl odebrán vzorek z tavby pro chemický rozbor materiálu, potom se vzorek pro kontrolní chemický rozbor odebírá ze zkušebních těles pro zjišťování mechanických vlastností nebo přímo z odlitku. [6]

Nevyhovující chemické složení se detekuje analýzou chemického složení. V případě, že je tavenina ještě v peci, lze tuto vadu odstranit dolegováním či naředěním na dané chemické složení. Je-li zjištěna vada na odlitku, jedná se o neopravitelnou vadu. [10]

Příčiny:

Tato vada může vzniknout tak, že dodaná surovina pro tavení neodpovídá chemickému složení dané slitiny, je natavená jiná slitina než požadovaná (záměna materiálu), dojde k záměně vratného materiálu nebo vlivem legování (nedostatečné legování, propal, nebo přelegování). Nesprávné chemické složení může také vzniknout kontaminací z pecí, pánví nebo z náradí. [10]

Opatření proti vzniku:

Tuto vadu lze eliminovat vstupní kontrolou vsázkového materiálu při dodání z hutí, analýzou každé tavby, správným značením vratného materiálu, dolegováním příslušnými prvky, výplachem pecí nebo pánví a správným ošetřením náradí. [10]

8.2 Mechanické vlastnosti (720)

Mechanické vlastnosti hliníkových slitin jsou závislé zejména na vlastnostech a druhu základní kovové hmoty, na disperzitě strukturních složek, na přítomnosti a tvaru intermetalických fází a na tepelném zpracování. Pokud má slitina jemnozrnnou strukturu, tak se všechny mechanické vlastnosti této slitiny zlepšují. Mechanické vlastnosti hliníkových slitin jsou také velmi citlivé na rychlost tuhnutí, a proto se pro odlévání preferují metody, které zajišťují vysokou rychlost ochlazování při tuhnutí, což technologie vysokotlakého lití splňuje. Mez pevnosti hliníkových slitin se pohybuje v rozmezích 150-250 MPa. Vytvrzováním se pevnostní vlastnosti výrazně zvyšují. Lze dosáhnout hodnot kolem 330 MPa. Tažnost hliníkových slitin je 1-4 %. Tvrdost u slitin Al-Si je obvykle 60-80 HB, vytvrzením lze však tuto hodnotu navýšit na 100 HB. [1]

8.2.1 Nevyhovující mechanické vlastnosti (720)

Mechanické pevnostní vlastnosti bývají nejčastějším kritériem, podle kterého se rozhoduje o tom, zda je daný materiál vhodný pro jeho použití. Za vadu se považuje odklon od mechanických vlastností danými normou nebo předem sjednanými se zákazníkem. K základním mechanickým zkouškám patří zkoušky tahem, tlakem, tvrdosti, tečení a rázem v ohybu. Zkouška tahem a zkouška tvrdosti jsou nejčastěji používané zkoušky. Hodnoty mechanických vlastností se určují na tělesech, jejichž tvar je dán normou. [6,28]

Příčiny:

Nevyhovující mechanické vlastnosti mohou být způsobeny vadami na zkušebních tělesech pro mechanickou zkoušku (nesprávně odlité nebo odebrané zkušební těleso), dále nesprávným chemickým složením materiálu, nesprávným metalurgickým ošetřením materiálu (rafinace, očkování, modifikace), nevyhovující strukturou odlitku a také nesprávným tepelným zpracováním. [10]

Opatření proti vzniku:

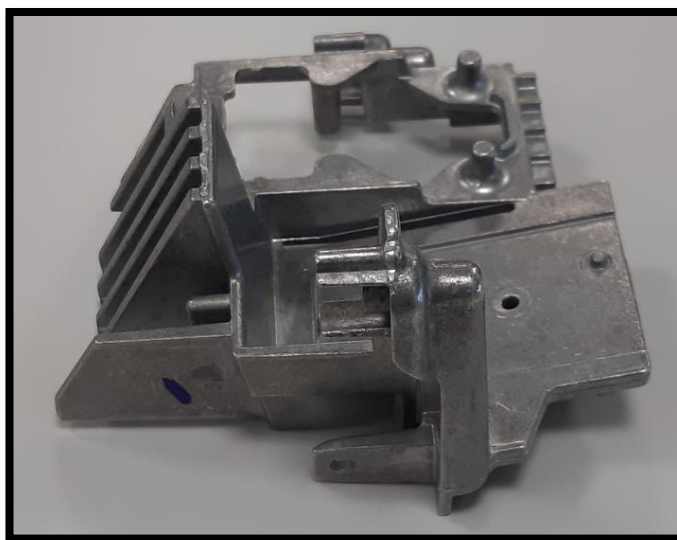
Mezi základní opatření patří opakování odebrání vzorku (správné místo a způsob odběru), vstupní kontrola při dodání z hutí, třídění vratného materiálu, kontrola taveniny, úprava teplotního pole formy a kontrola tepelného zpracování. [10]

9 PRAKTICKÁ ČÁST

Cílem praktické části této diplomové práce je analýza vad vybraného odlitku. Výsledkem analýzy vad bude určení druhu vady. Díky tomuto určení druhu vady budou nalezeny příčiny jejího vzniku, které nám poslouží pro volbu vhodných nápravných opatření pro zamezení výskytu vady.

9.1 Řešený odlitek

Pro praktickou část byl vybrán odlitek chladiče pro automobilové osvětlení. Hlavními požadavky na tyto chladiče jsou nízká hmotnost, vysoká účinnost chlazení a malé rozměry. Z tohoto důvodu se pro většinu chladičů jako materiál používají hliníkové slitiny. Aby bylo dosaženo intenzivního chlazení, je nutná vysoká jakost povrchu a to zejména na žebrech odlitku.



Obr. 44 Chladič automobilového osvětlení

9.2 Proces výroby řešeného odlitku

Odlitek chladiče je vyráběn technologií vysokotlakého lití ze slitiny AlSi12Cu1(Fe). Tato slitina se často udává podle německé normy DIN 231. Tato slitina patří k nejpoužívanějším při výrobě odlitků vysokotlakého lití.

V tabulce 1 je uvedeno chemické složení slitiny AlSi12Cu1(Fe) dané normou EN 1706 AC. V tabulce 2 je uvedeno skutečné složení odlitku odlitého ve slévárně ALW INDUSTRY, s.r.o. Toto chemické složení bylo naměřeno spektrálním analyzátozem SPECTROMAX.

Tab. 1 Chemické složení slitiny EN AC-AlSi12Cu1(Fe) dané normou ČSN EN 1706 [1]

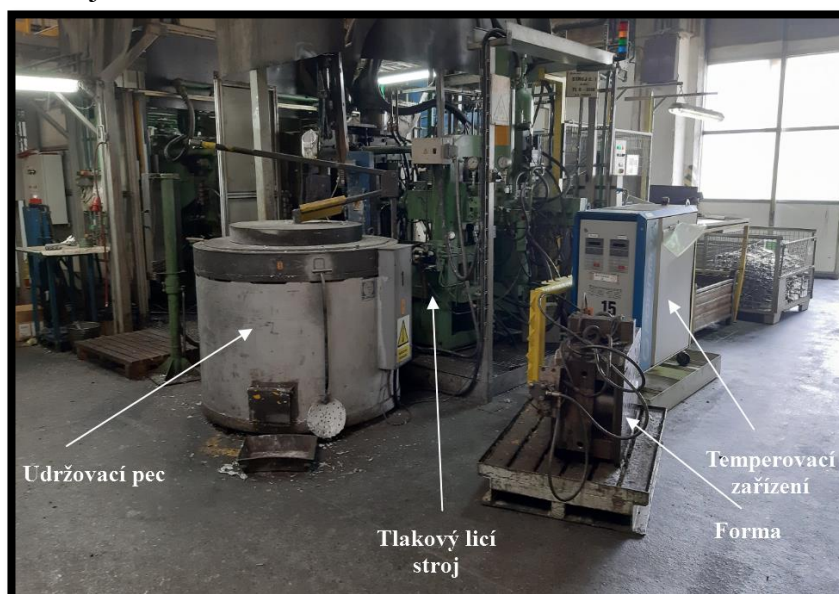
Chemické složení [%]										
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
10,5-13,5	max. 1,3	0,7-1,2	0,55	0,35	0,10	0,30	0,55	0,20	0,10	0,20

Tab. 2 Změřené chemické složení slitiny EN AC-ALSi12Cu1(Fe)

Chemické složení [%]										
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
11,6	1,08	1,08	0,24	0,08	0,05	0,09	0,49	0,02	0,01	0,07

Při porovnání změřeného chemického složení materiálu řešeného odlitku a chemického složení slitiny ALSi12Cu1(Fe) daného normou vyplývá, že žádný prvek nepřesahuje maximální hodnotu normovaného chemického složení. Proto je změřené chemické složení materiálu odlitku považováno za vyhovující.

Pro tavení byla použita plynová šachtová pec od firmy Striko Westhofen. Po natavení je tavenina přelévána z pece do transportní pánve a poté následuje odplynění dusíkem pomocí zařízení FDU. Jakmile je tavenina odplyněna, následuje transport tekutého kovu do elektrické udržovací pece, která se nachází u tlakového lícího stroje (tlakový stroj a rozmístění přídavných zařízení je na obr. 45).



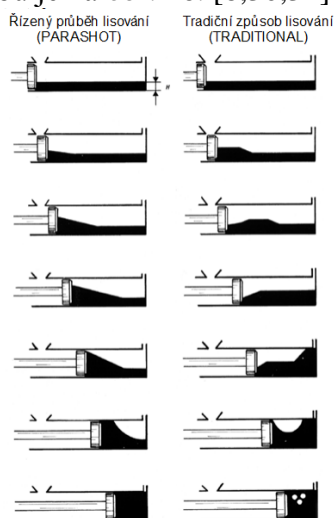
Obr. 45 Tlakový lící stroj a jeho přídavná zařízení

Odlitek je odléván na tlakovém lícím stroji TL6 – 500 od firmy RTS Rakovník s.r.o, který disponuje uzavírací silou 5000 kN. Tato uzavírací síla je u stroje vyvolávána kloubovým mechanismem. Forma pro odlévání odlitku je dvounásobná a odlitky jsou v ní symetricky rozloženy. Komora tlakového lícího stroje je plněna tekutým kovem pomocí automatického dávkovacího zařízení. Jakmile je kov nadávkován v plnicí komoře, následuje plnění dutiny formy, které se skládá ze tří fází:

1. fáze - zde probíhá předplnění
2. fáze - následuje lisování
3. fáze - zakončení působením dotlaku

Předplňovací (1. fáze) začíná po naplnění dávky kovu do komory tlakového lícího stroje. Následuje plnění taveniny plnicím pístem až po vtokové nařiznutí. Tato fáze má velký vliv na výslednou kvalitu odlitku, proto je důležitá pomalá rychlost pístu (max. 0,5 m/s). Na začátku této fáze dochází k odvzdušnění formy, kdy je vzduch tlačěn před tekutým kovem. Pomalá rychlost pístu je nutná, aby nedošlo ke vzniku vlny a uzavření vzduchu v kovu. V průběhu této fáze dochází ke zvyšování rychlosti pístu. Nejvyšší rychlost má píst v čase, kdy kov

dosáhne vtokového nařiznutí. Nárůst rychlosti pístu by měl být postupný, a proto se využívají stroje s řízeným průběhem lisování, který se nazývá PARASHOT. Porovnání řízeného průběhu lisování a tradičního způsobu je na obr. 46. [8,30,31]



Obr. 46 Porovnání řízeného průběhu lisování a tradičního způsobu lisování [8]

Fáze lisování (2. fáze) začíná, když tavenina dosáhne úrovně vtokového nařiznutí. Nastává zvýšení rychlosti pístu na 2 až 6 m/s a dochází k zaplnění dutiny formy. [30]

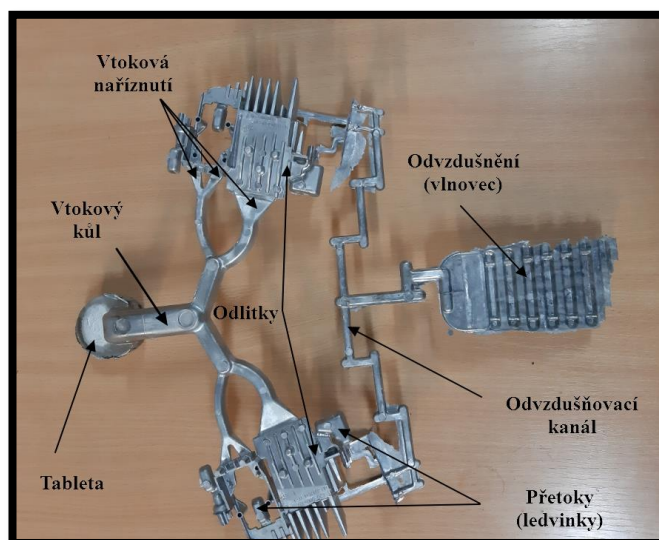
Fáze působení dotlaku (3. fáze) začíná, když je dutina formy vyplněna kovem a končí, když dojde ke ztuhnutí kovu v nařiznutí. Působením dotlaku lze eliminovat vady jakou jsou řediny nebo zahlcený vzduch. [10,31]

Po odlití se odlev pomocí manipulačního robota KAWASAKI přemístí do nádoby s vodou, kde je 3 s chlazen. Po zachlazení je odlev umístěn do ostříhovacího nástroje, kde dojde k oddělení odlitků s vtokovou soustavou a přetoky. Jakmile jsou tyto přetoky odstřiženy, následuje obrábění děr, které nebyly předlity (manipulační robot a ostříhovací stroj jsou zobrazeny na obr. 47).

Když je odlitek vyjmut z formy, následuje ošetření formy pomocí ošetřovací hlavy od firmy Wollin. Postřik i ofuk formy je prováděn v každém cyklu lití. Na obr. 48 je zobrazen celý odlev chladičů.



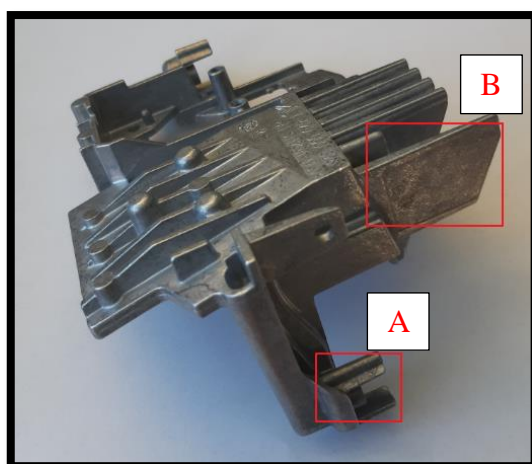
Obr. 47 Tlakový licí stroj, manipulační robot a ostříhovací stroj



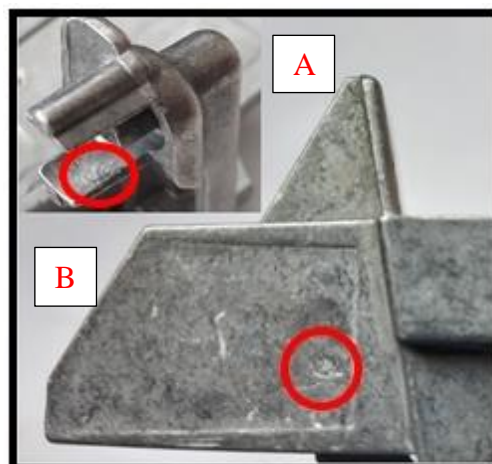
Obr. 48 Odlev chladičů

9.3 Analýza vady

Během 100 % kontroly dochází k nálezům vad v oblastech vyznačených na obrázcích 49 a 50. Vady se vyskytovaly na komíncích (označená oblast A) a na žebrech (označená oblast B). Pokud odlitek obsahuje vady ve vyznačených oblastech, je označován jako neshodný, protože tyto vady negativně ovlivňují chladicí účinek odlitku nebo jeho funkční vlastnosti. Vzhledem k poměrně vysoké a dlouhodobé zmetkovitosti (27,7 %) byl vybrán tento odlitek pro vypracování této diplomové práce, aby se zavedla vhodná opatření ke snížení neshodných odlitků.



Obr. 49 Místa výskytu vad



Obr. 50 Detailní zobrazení místa výskytu vady

Pro identifikaci vad byla použita mikroskopická analýza a simulace původního procesu lití. Výsledky analýzy jsou uvedeny v další části experimentální práce.

9.3.1. Mikroskopická analýza

Nejdříve byly odřezány části odlitků, na kterých se vady vyskytovaly (viz. obr. 49 a 50). Tyto části byly řezány pomocí laboratorní rozbrušovací pily Struers Labotom-3. Pro sledování vad byl nejprve použit stereoskopický mikroskop STM 723.



Obr. 51 Snímek místa výskytu vady B, zvětšení 14x (1. strana)



Obr. 52 Snímek místa vady B, zvětšení 40x (1. strana)



Obr. 53 Snímek z místa vady B, zvětšení 14x (2. strana)



Obr. 54 Snímek vady z místa B, zvětšení 40x (2. strana)

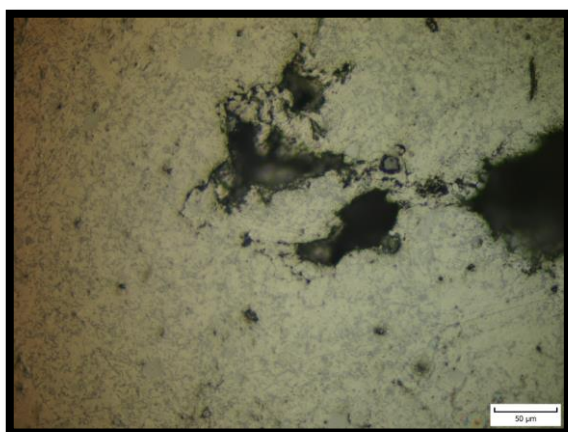
Ze snímků lze vyvodit, že povrch v blízkosti vady je zvlněný, vrásčitý se zaoblenými okraji. Proto lze určit, že se jedná o vadu studený spoj a zavaleniny (341). Tato vada se vyskytuje na obou stranách žebra a pro další specifikaci vady budou provedeny metalografické výbrusy pro zkoumání mikrostruktury.

V dalším kroku analýzy byl zhotoven metalografický výbrus. Již nařezané vzorky byly zalisovány do černé epoxydové pryskyřice pomocí lisu ECOPRESS 100.

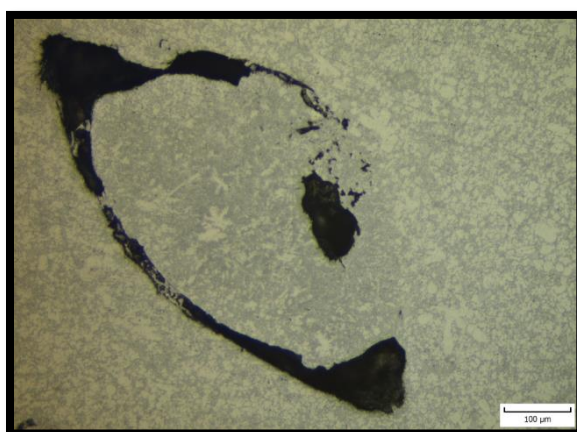
Po zalisování následovalo broušení a leštění. Broušení a následné leštění probíhalo na laboratorním přístroji LaboPol – 5 od firmy Struers. Tento přístroj obsahuje rotační hlavu, do které jsou zalisované vzorky upevněny. Délka jednoho cyklu, jak broušení tak, i leštění trvala 5 minut. Nejdříve probíhalo broušení postupně pomocí brusných papírů se zrnitostí 220, 800

a 1200. Toto broušení probíhalo za přívodu chladicí vody. Jakmile bylo dokončeno broušení, byly vzorky omyté vodou, následně lihem, a nakonec byly osušeny teplým vzduchem. Poté následovalo leštění, které probíhalo nejdříve s diamantovou suspenzí s velikostí částic abraziva 9 μm . Finální leštění bylo prováděno s přívodem suspenze s velikostí částic abraziva 3 μm .

Po vyleštění byly vzorky opět omyty vodou a lihem a následně osušeny teplým vzduchem. A na takto vybroušených a vyleštěných vzorcích byla pozorována mikrostruktura pomocí světelného mikroskopu MTM 406. Fotky byly následně zpracovány v programu QuickPHOTO Industrial 2.2.



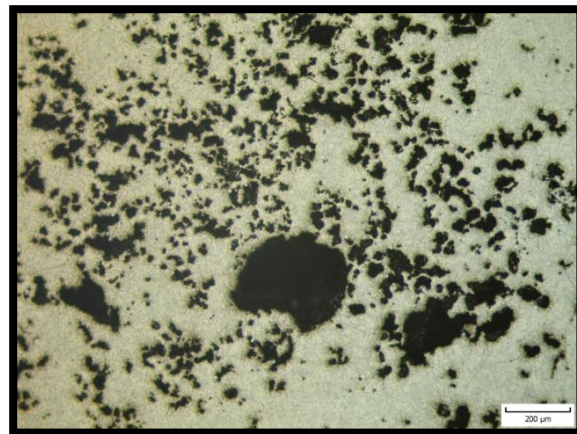
Obr. 55 Snímek výbrusu z místa A



Obr. 56 Snímek 1 výbrusu z místa B



Obr. 57 Snímek 2 výbrusu z místa B



Obr. 58 Snímek 3 výbrusu z místa B

Ze snímků lze vyvodit, že v kritických oblastech odlitku se vyskytují oxidické pleny, které se běžně objevují u vady studené spoje a zavaleniny. Dále lze pozorovat výskyt ředin i zahlcený vzduch.

9.4 Simulace procesu lití

Provedení simulace vysokotlakého lití odlitku bylo provedeno pomocí programu ProCast. Nejprve byla provedena simulace stávajícího stavu (varianta 1).

9.4.1 Varianta 1

Jedná se o původní variantu procesu lití, při které docházelo ke zvýšenému výskytu vad v kritických místech.

Technologické parametry, podle kterých je nastaven cyklus vysokotlakého lití řešeného odlitku, jsou uvedeny v tabulce 3. V tabulce 4 jsou uvedeny parametry plnění dutiny formy.

Tab. 3 Technologické parametry varianty 1

Parametry	Hodnota	Jednotka
Licí teplota	700	°C
Temperace formy (olejem)	250	°C
Chlazení formy (vodou)	23	°C
Hmotnost odlevu	610	g
Vakuování forem	0,84	bar

Tab. 4 Parametry plnění varianty 1

Parametry	Hodnota	Jednotka
Průměr pístu	54	mm
Procento naplnění komory	21	%
Výška tablety	20	mm
Rychlost v_0 (rychlost pístu ve fázi 1)	0,20	m/s
Rychlost v_1 (rychlost pístu při uzavření plnicího otvoru)	0,25	m/s
Rychlost v_2 (rychlost pístu ve fázi 2)	3,2	m/s
Dráha pístu na začátku 2. fáze	350	mm
Doba plnění samotného odlitku	13	ms
Start dotlaku	430	mm
Hodnota dotlaku	1249	bar

9.4.2 Cyklování formy

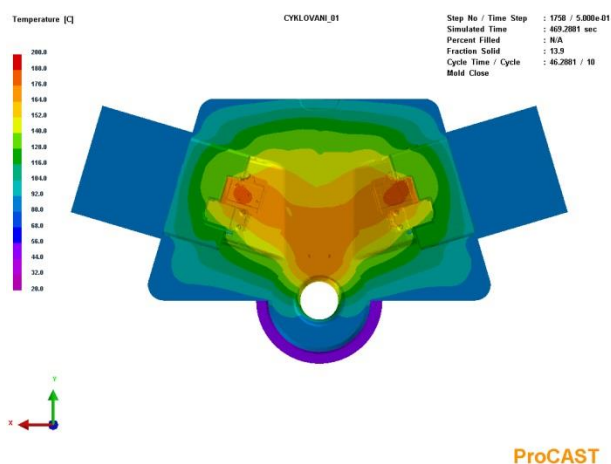
Cyklováním se rozumí provedení určitého počtu cyklů na začátku procesu lití, které je potřebné pro ustálení teploty formy. Teplotní rozložení formy v průběhu jejího cyklu má vliv na vznik vad v průběhu plnění, tuhnutí a chladnutí odlitku. [31]

Pro zjištění teploty formy v průběhu výroby bylo provedeno v simulaci cyklování, při které bylo simulováno 10 cyklů. Jednotlivé časy jednoho cyklu jsou uvedeny v tabulce 5.

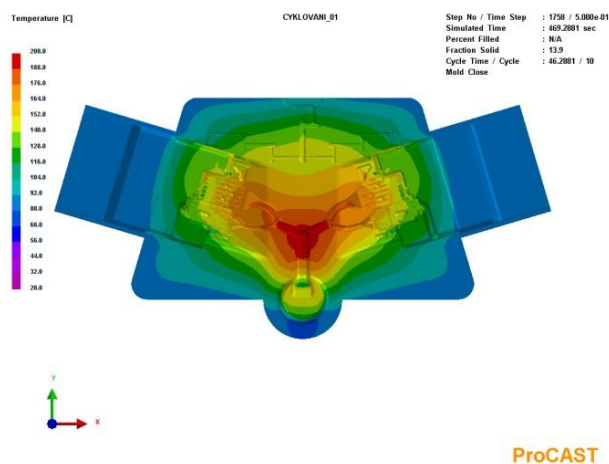
Tabulka 5 Jednotlivé časy kroků jednoho cyklu

Popis činnosti	Start [s]	Konec [s]	Délka jednotlivých kroků [s]
Celková doba cyklu	0	47	47
Zavřená forma (během plnění a tuhnutí)	1	15	14
Otevřená forma	15	43	28
Odlitek v kontaktu s formou (do vyjmutí odlitku)	11	24	13
Postřík formy	27	34	7
Ofuk formy	34	42	8
Zavření formy a čekání na další cyklus	43	47	4

Na obrázcích 59 a 60 je znázorněno rozložení teplot nacyklované pevné i pohyblivé formy na konci 10. cyklu.



Obr. 59 Rozložení teplot nacyklované pevné poloviny formy



Obr. 60 Rozložení teplot nacyklované pohyblivé formy

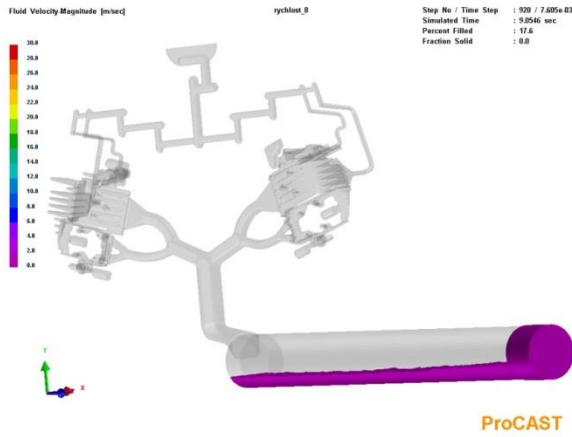
Reálné teploty během výroby jsou uvedeny na obr. 61. Toto reálné rozložení teplot bylo získáno pomocí termokamery Flir T335 a snímek byl upraven v programu Flir – Quick report 1.2. Jedná se o snímek pořízený ihned po ošetření formy. V počítačovém softwaru byly vyznačeny oblasti formy, kde se nacházejí samotné odlitky.



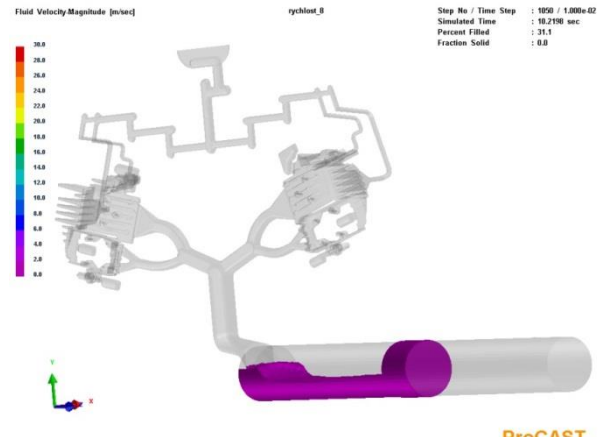
Obr. 61 Snímek teplotního rozložení pevné formy po postřiku

Simulace plnění varianty 1

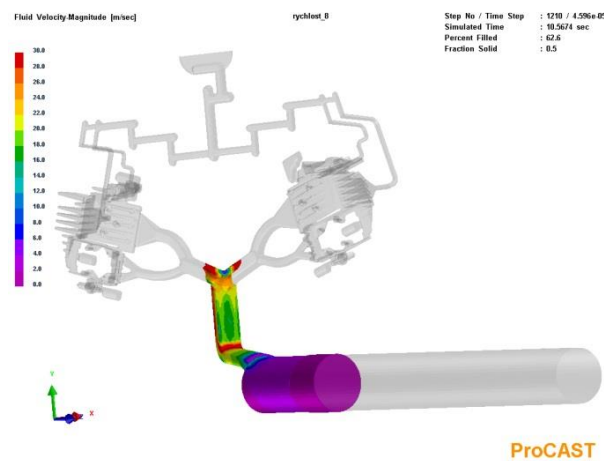
Parametry plnění a technologické parametry, které byly do simulačního programu zadány, jsou uvedeny v tabulkách 3 a 4.



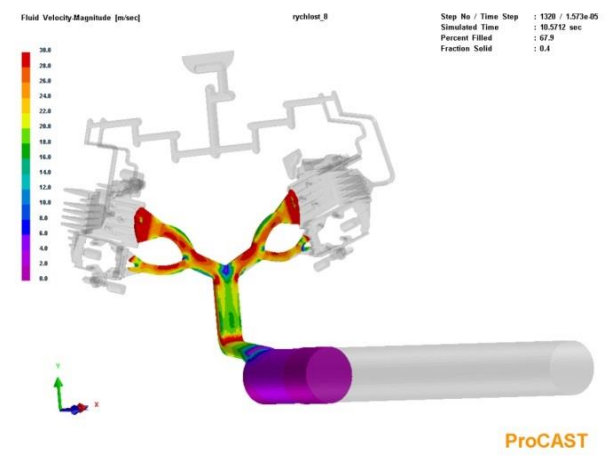
Obr. 62 Simulace plnění v čase 9,0546 s



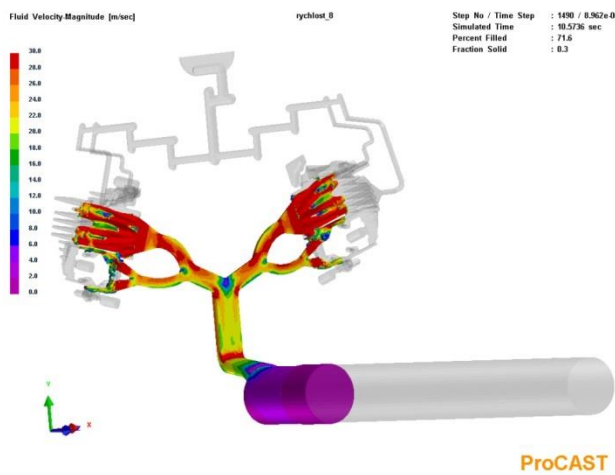
Obr. 63 Simulace plnění v čase 10,2198 s



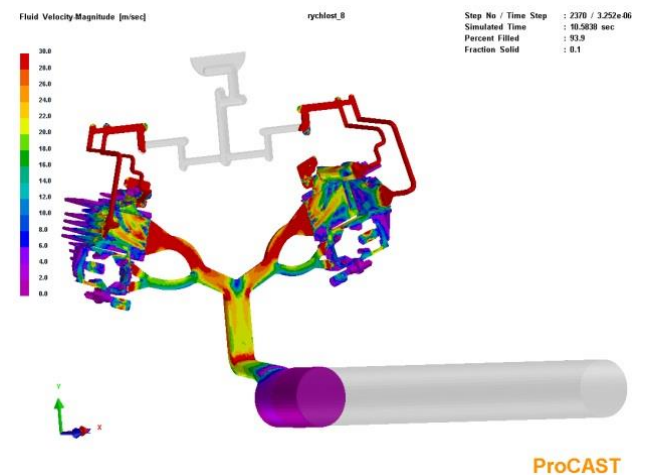
Obr. 64 Simulace plnění v čase 10,5674 s



Obr. 65 Simulace plnění v čase 10,5712 s

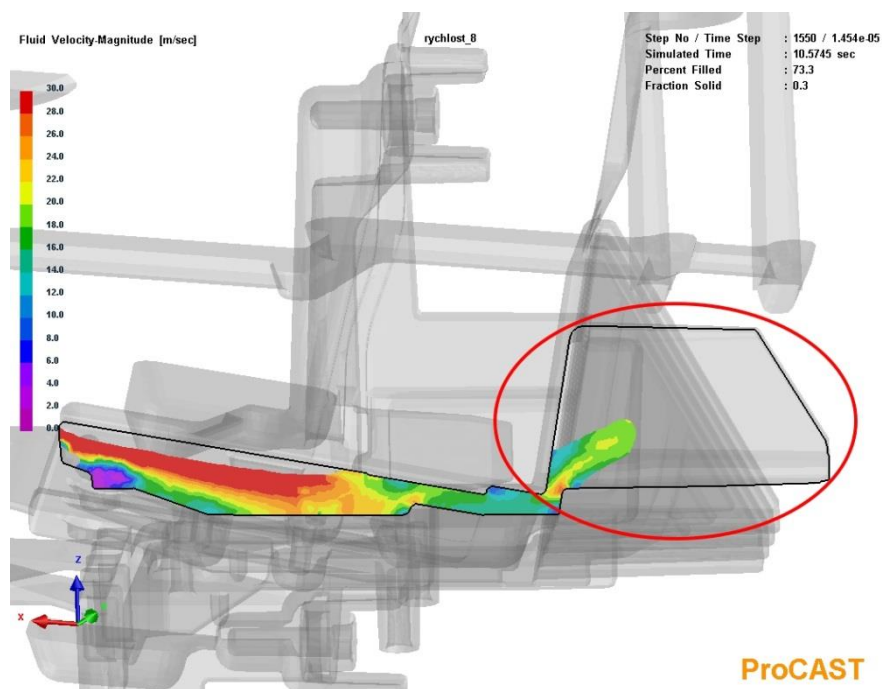


Obr. 66 Simulace plnění v čase 10,5736 s

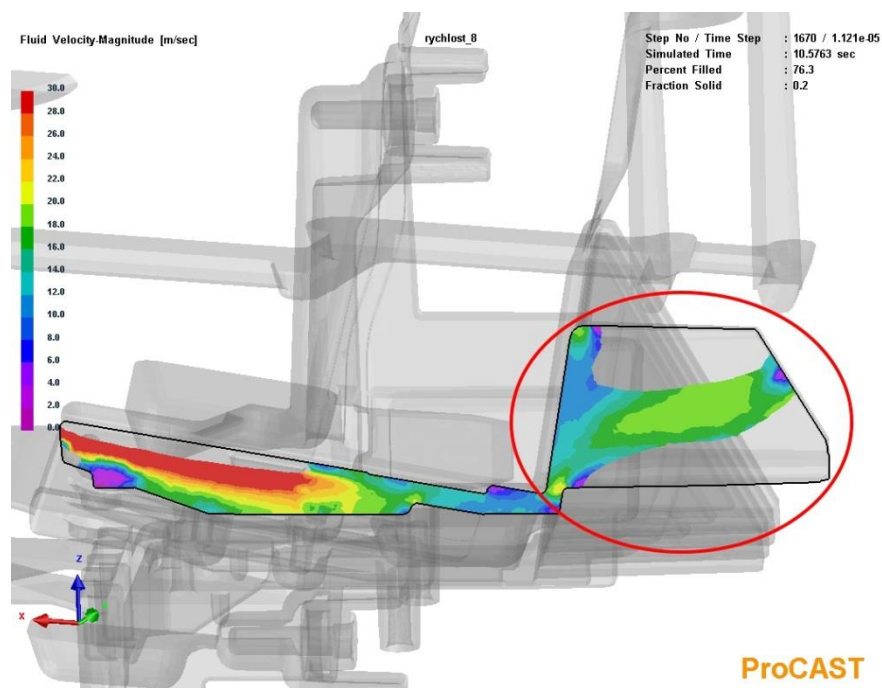


Obr. 67 Simulace plnění v čase 10,5838 s

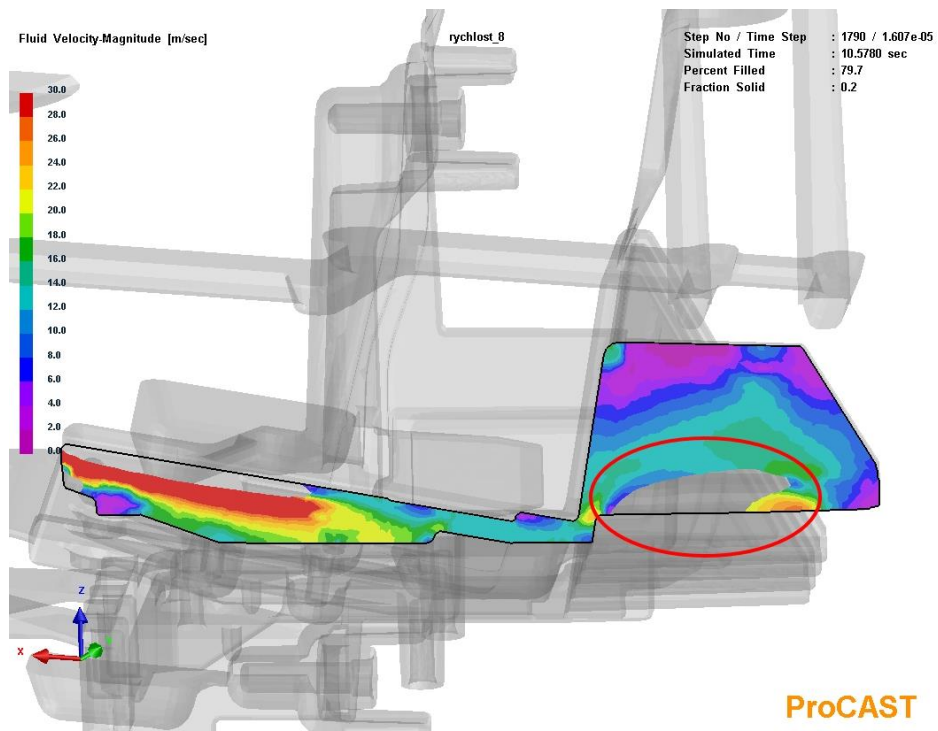
Na obr. (62-67) je znázorněna simulace plnění daného odlevu. Součástí je také barevné znázornění průběhu rychlostí během plnění. Pro bližší pozorování vzniku vady je provedeno detailní zobrazení simulace plnění v místech výskytu řešených vad (obr. 68-74).



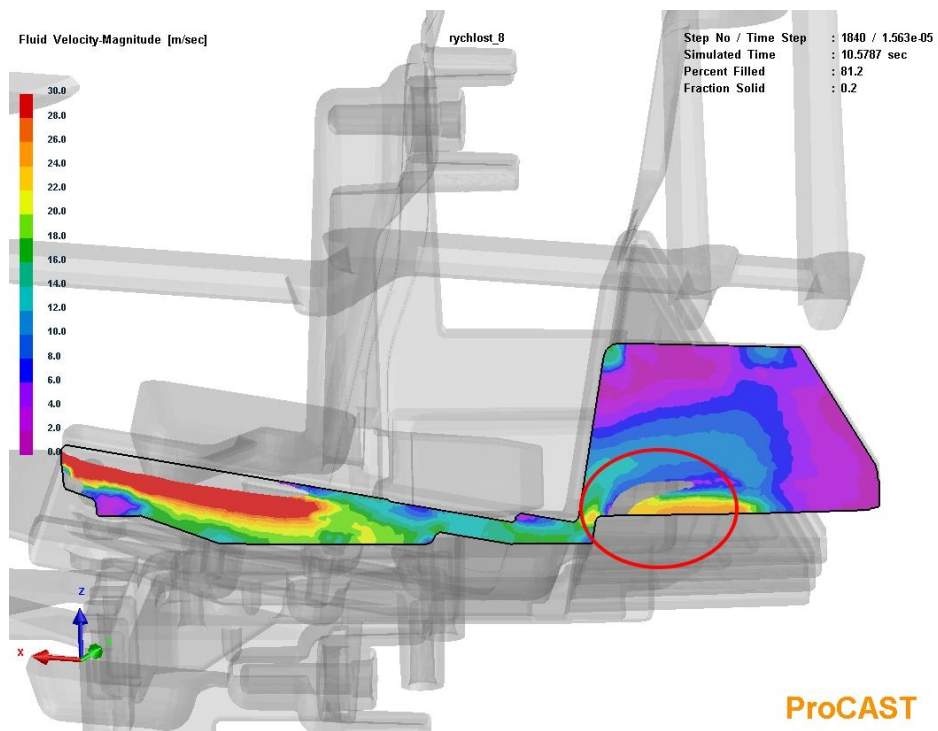
Obr. 68 Detailní simulace plnění kritických míst v čase 10,5745 s



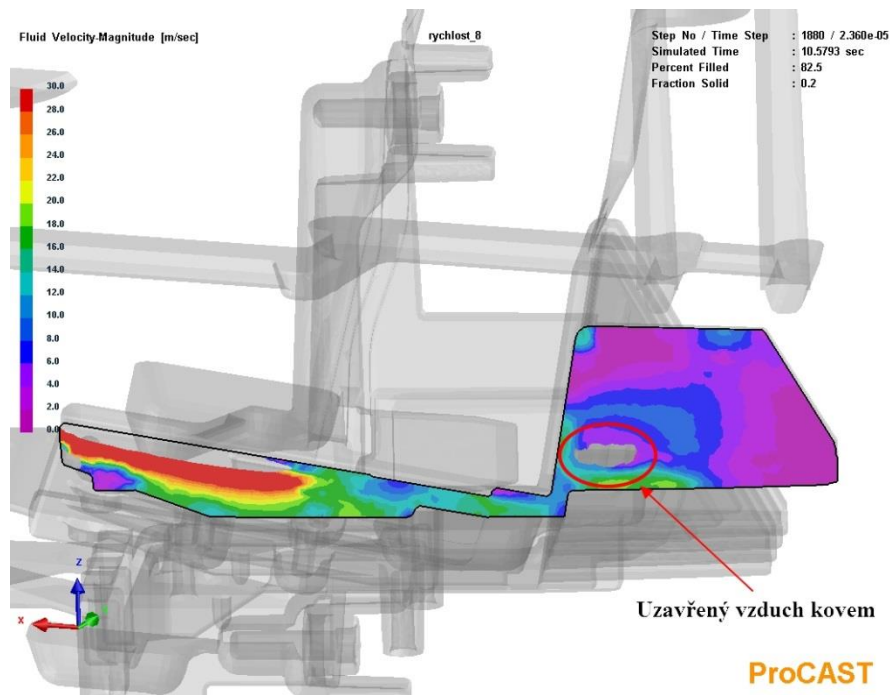
Obr. 69 Detailní simulace plnění kritických míst v čase 10,5763 s



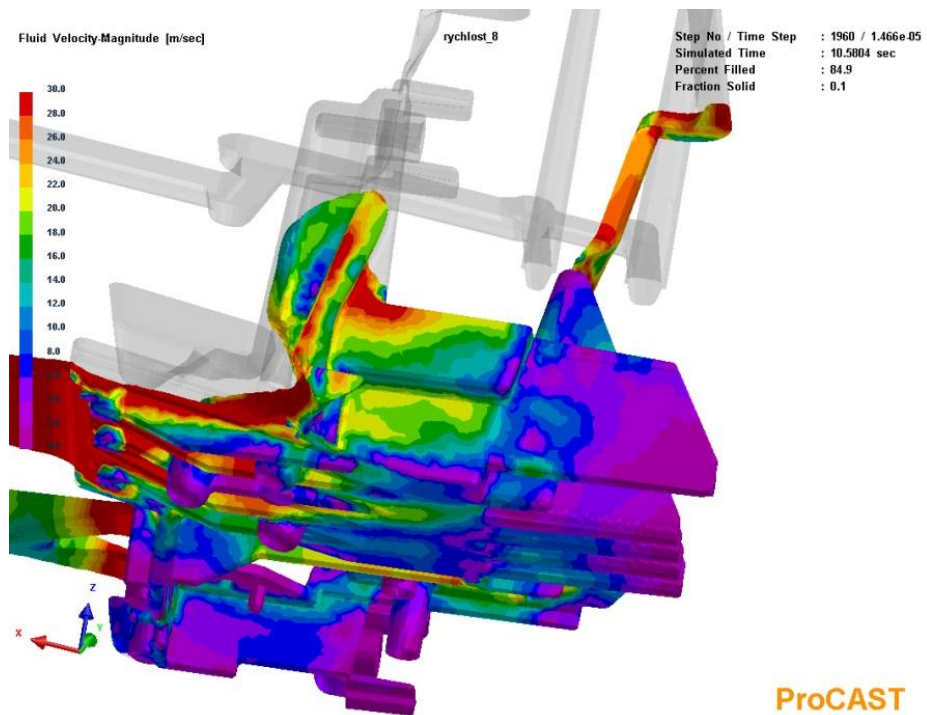
Obr. 70 Detailní simulace plnění kritických míst v čase 10,5780 s



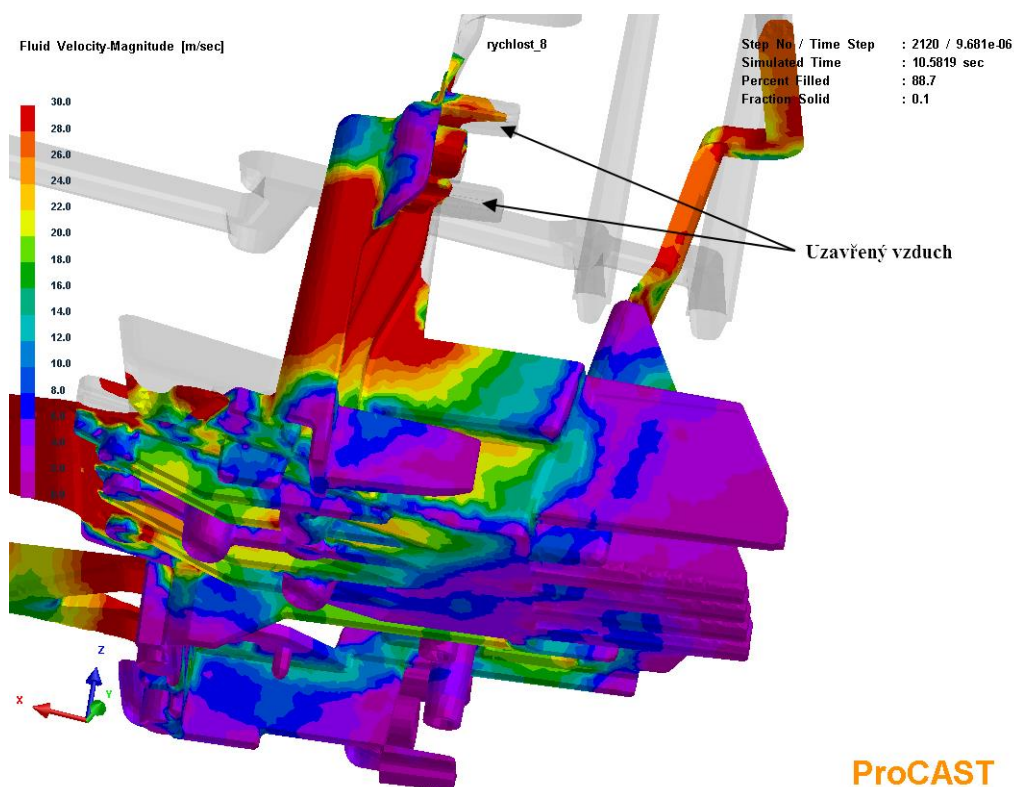
Obr. 71 Detailní simulace plnění kritických míst v čase 10,5787 s



Obr. 72 Detailní simulace plnění kritických míst v čase 10,5793 s



Obr. 73 Detailní simulace plnění kritických míst v čase 10,5804 s

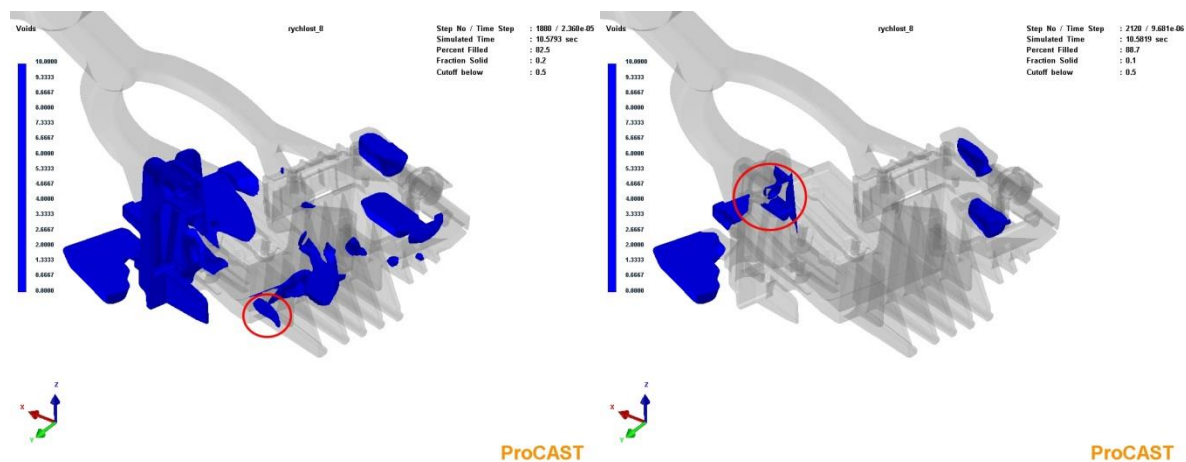


Obr. 74 Detailní simulace plnění kritických míst v čase 10,5819 s

Z obrázků 68-74, které zobrazují detailněji plnění kritických míst, je patrné, že v žebro (kritické místo B) dochází k uzavření vzduchu proudícím kovem (vyznačené uzavření na obr. 72). Takto uzavřený vzduch už nemá možnost úniku a v důsledku jeho odporu nedochází k úplnému spojení kovu v této kritické oblasti.

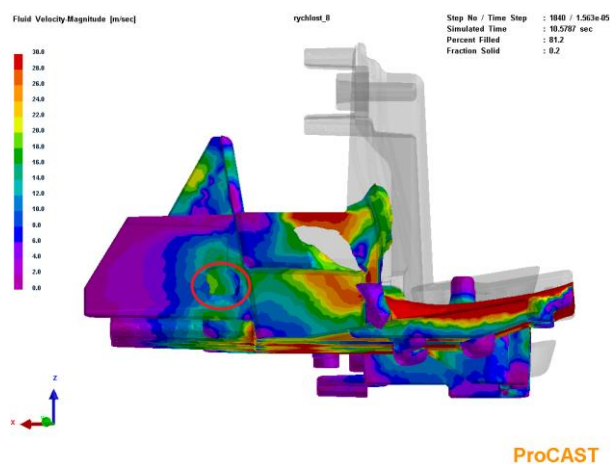
V případě kritického místa A je patrné z obrázku 74, že není vyplněn celý tvar odlitku v těchto místech (zůstává zde uzavřený vzduch), ale odvzdušňovací kanál je již zaplněn kovem. Z tohoto důvodu již také nemá vzduch možnost úniku.

Na obrázcích 75 a 76 je zobrazen uzavřený vzduch, který je příčinou vzniku vady v inkriminovaných místech. Modrou barvou je označen vzduch a transparentní je kov.

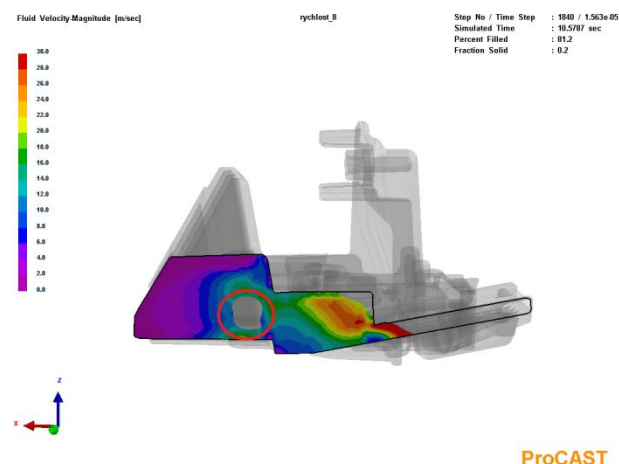


Obr. 75 Uzavřený vzduch v místě B

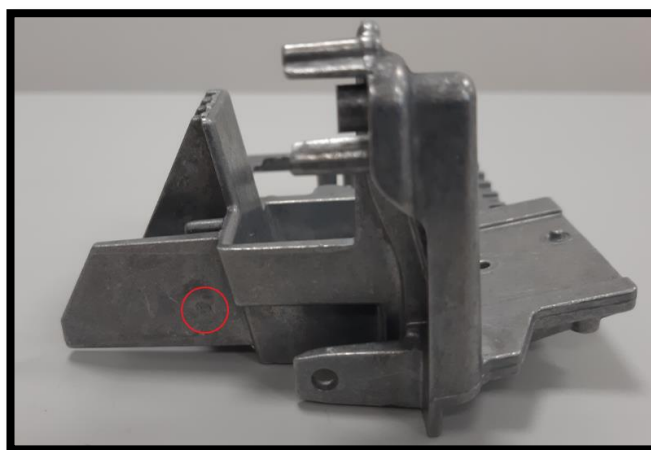
Obr. 76 Uzavřený vzduch v místě A



Obr. 77 Zobrazení místa vady B po simulaci plnění



Obr. 78 Zobrazení místa vady B v řezu



Obr. 79 Zobrazení místa výskytu vady B na reálném odlitku

Z obrázků 77 – 79 je patrné, že dochází k výskytu vady na stejném místě jak při simulaci plnění odlitku tak i na odlitku reálně odlitém.

9.4.3 Varianta 2

V tabulce 6 je uvedeno, že na výskyt vady typu studený spoj má velmi silný vliv umístění naříznutí a čas plnění dutiny formy. V případě změny umístění vtokového naříznutí by se jednalo o změnu, při které je nutná úprava formy, což by bylo ekonomicky náročnější než zvolit cestu změny času plnění dutiny formy. Byly tedy provedeny změny parametrů plnění dutiny formy (tabulky 7 a 8), které vedly k jejímu rychlejšímu plnění.

Tabulka 6 Vliv parametrů formy, tlakového licího stroje a slitiny na výskyt vad [8]

vliv formy						vliv stroje a plnicí komory						vliv slitiny		síla vlivu parametrů na vady: ■ velmi silný vliv □ silný vliv ■ slabý vliv					
tloušťka a průřez nařiznutí	umístění nařiznutí	druh a velikost odzdušnění	chladič systém	přesnost dutiny formy	teplota formy	množství a druh dělicího postříku	doba náběhu dotlaku (III. fáze lisování)	čas plnění dutiny formy	rychlost kovu v nařiznutí	rychlost lisovacího pístu (I. fáze lisování)	doba cyklu	průměr plnicí komory	teplota plnicí komory		mazání lisovacího pístu	uzavírací síla stroje	obsah železa v Al slitinách	složení slitiny (obsah křemíku)	licí teplota
■	■	■	■	□	□	■	□	□	□	□	□	□	■	□	□	□	□	□	porezita, staženiny
■	■	■	□	□	□	■	□	□	□	□	□	□	■	□	□	□	□	□	vzdušná a plynná porezita, bubliny
										■			□					vměstky	
□	■		□	□	■	□	■	□	□	■		□	■				■	nedolití	
			■	■	□						□				□			deformace	
			■	■		■					□				■			propadliny	
		□	■	□		□	□	□	■	■	□							puchýře	
	■			□	■				■							■		nalepení	
■				□	■				■								■	mapovitý povrch	
	■			□			■	□	■			□					■	studené spoje	
				■														stopy po vyhazovačích	
				□	■				■								■	zadřeny	
				■	■													stopy po dělicím prostředku	
		□		□							□				□			trhliny, praskliny	
			■	□		■									□			rozměrové odchytky	
				□		■									■		■	otřepy	

Tabulka 7 Technologické parametry varianty 2

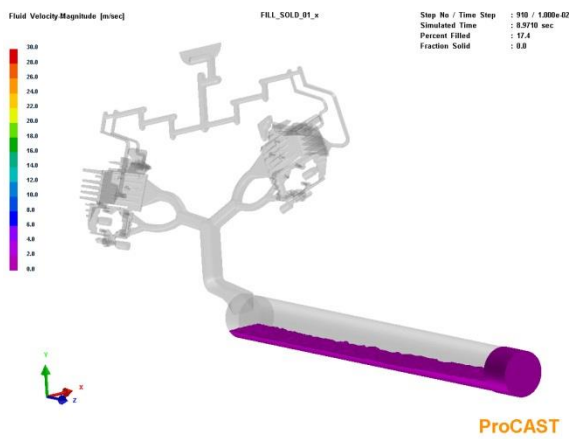
Parametry	Hodnota	Jednotka
Licí teplota	700	°C
Temperace formy (olejem)	250	°C
Chlazení formy (vodou)	23	°C
Hmotnost odlevu	610	g
Vakuování forem	0,84	bar

Tabulka 8 Parametry plnění varianty 2

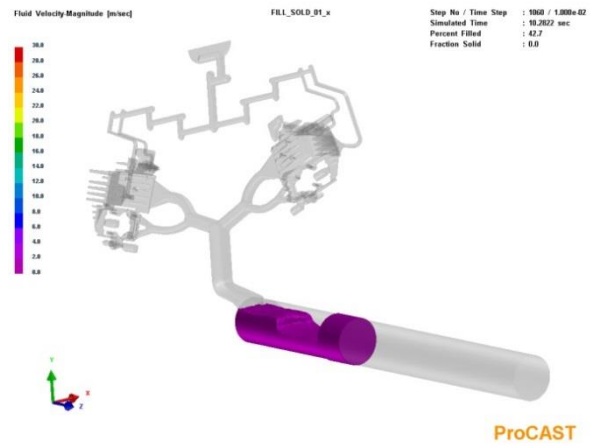
Parametry	Hodnota	Jednotka
Průměr pístu	54	mm
Procento naplnění komory	21	%
Výška tablety	20	mm
Rychlost v_0 (rychlost pístu ve fázi 1)	0,25	m/s
Rychlost v_1 (rychlost pístu při uzavření plnicího otvoru)	0,3	m/s
Rychlost v_2 (rychlost pístu ve fázi 2)	3,4	m/s
Dráha pístu na začátku 2. fáze	380	mm
Doba plnění samotného odlitku	11	ms
Start dotlaku	435	mm
Hodnota dotlaku	1249	bar

Simulace plnění variant 2

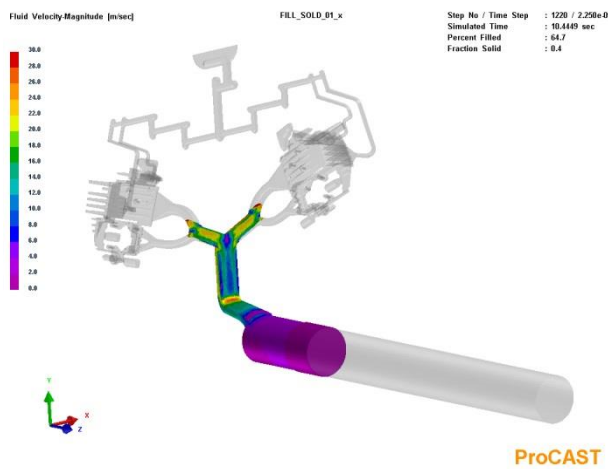
Dalším krokem bylo provedení simulace se změněnými parametry plnění, které jsou uvedené v tabulce 8.



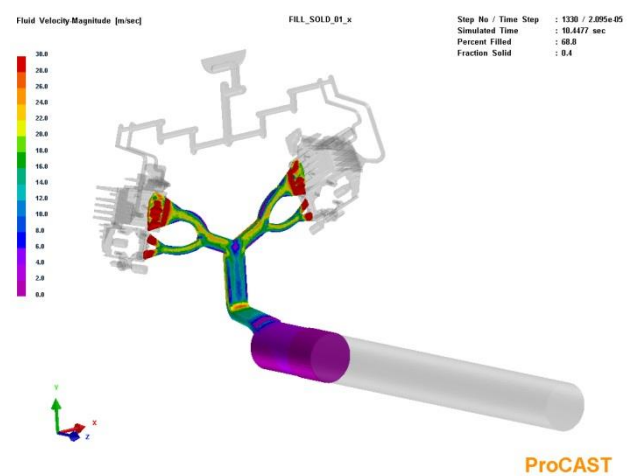
Obr. 80 Simulace plnění v čase 8,9710 s



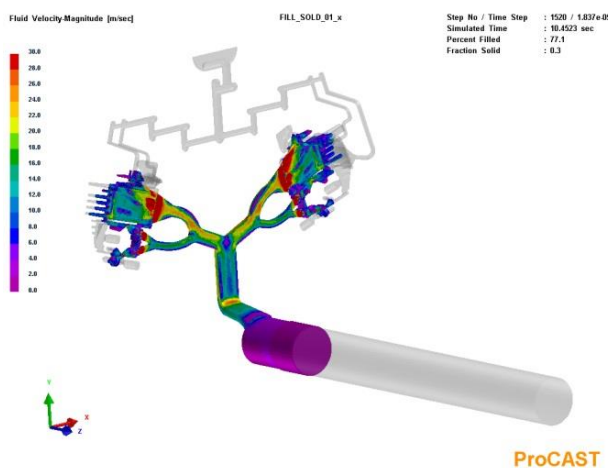
Obr. 81 Simulace plnění v čase 10,2822 s



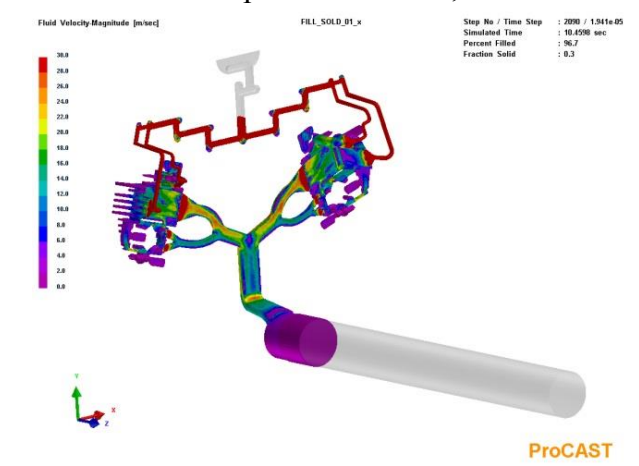
Obr. 82 Simulace plnění v čase 10,4449 s



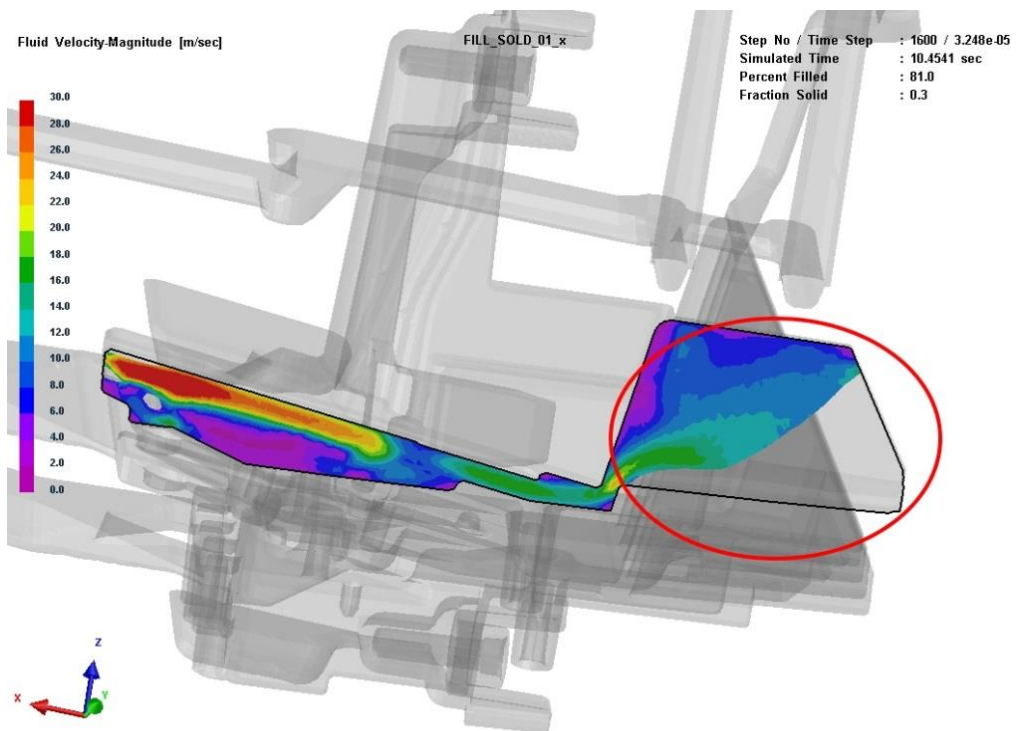
Obr. 83 Simulace plnění v čase 10,4477 s



Obr. 84 Simulace plnění v čase 10,4523 s

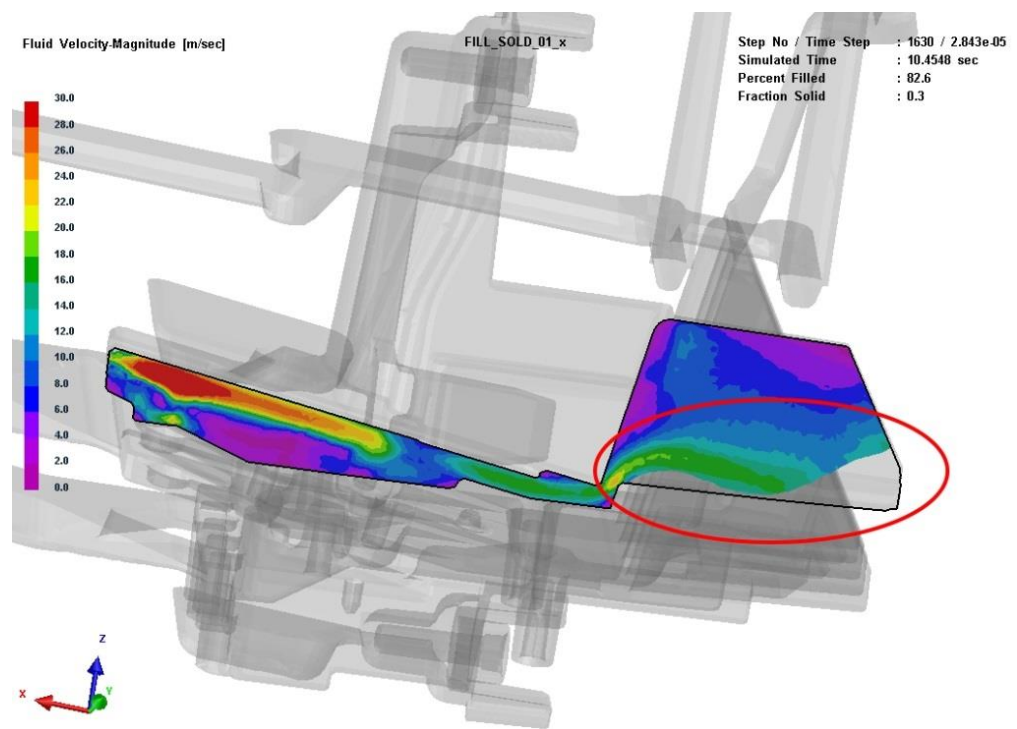


Obr. 85 Simulace plnění v čase 10,4598 s



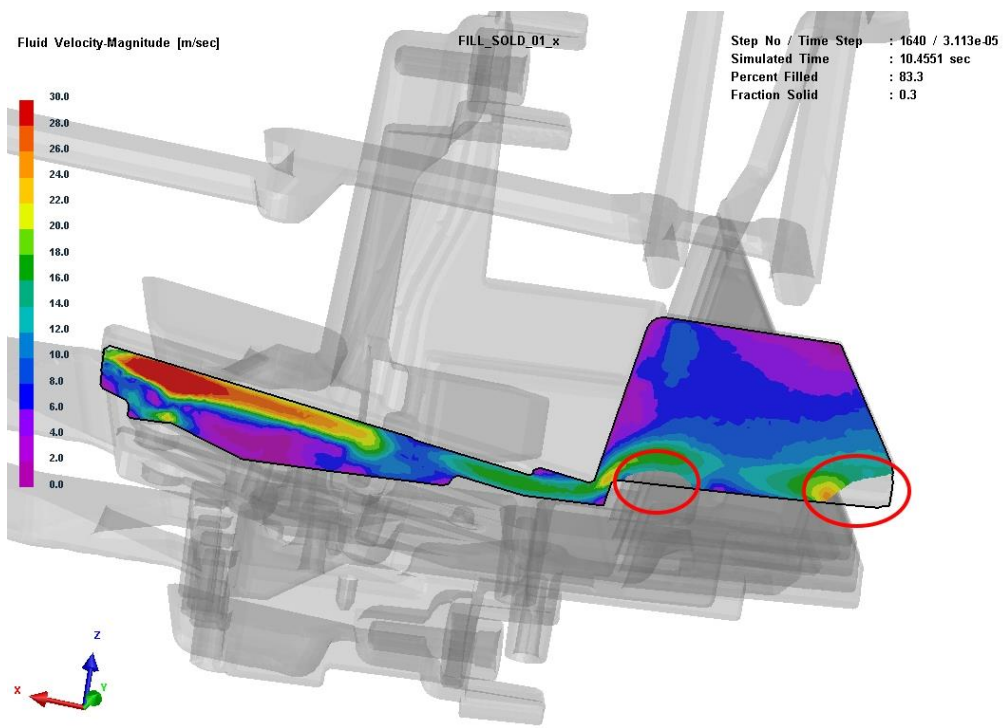
ProCAST

Obr. 86 Detailní simulace plnění kritických míst v čase 10,4541 s



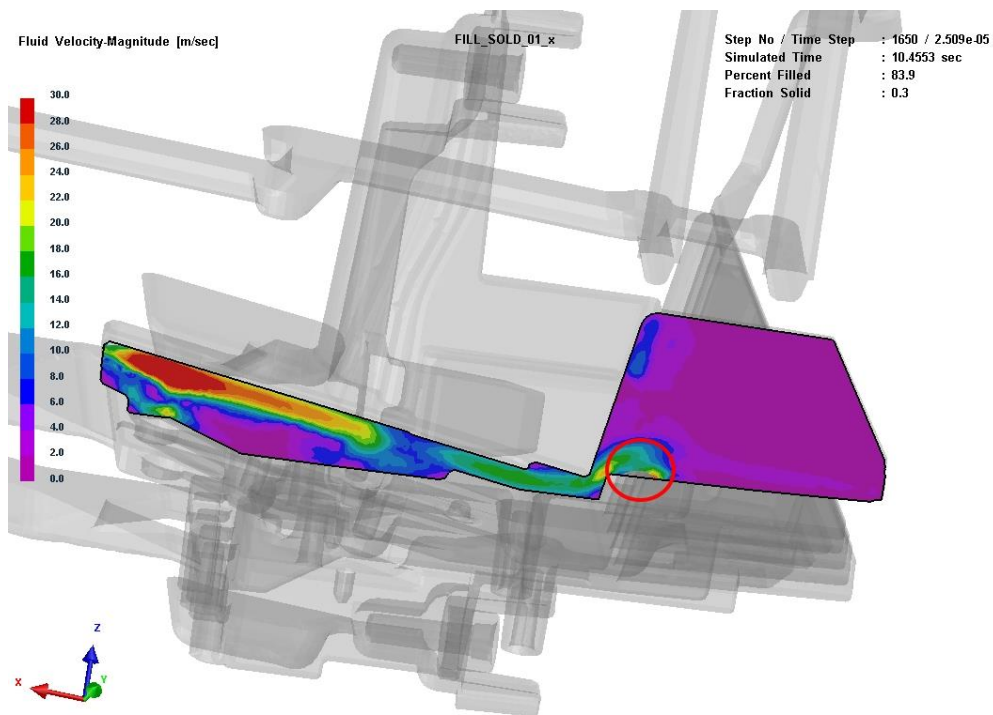
ProCAST

Obr. 87 Detailní simulace plnění kritických míst v čase 10,4548 s



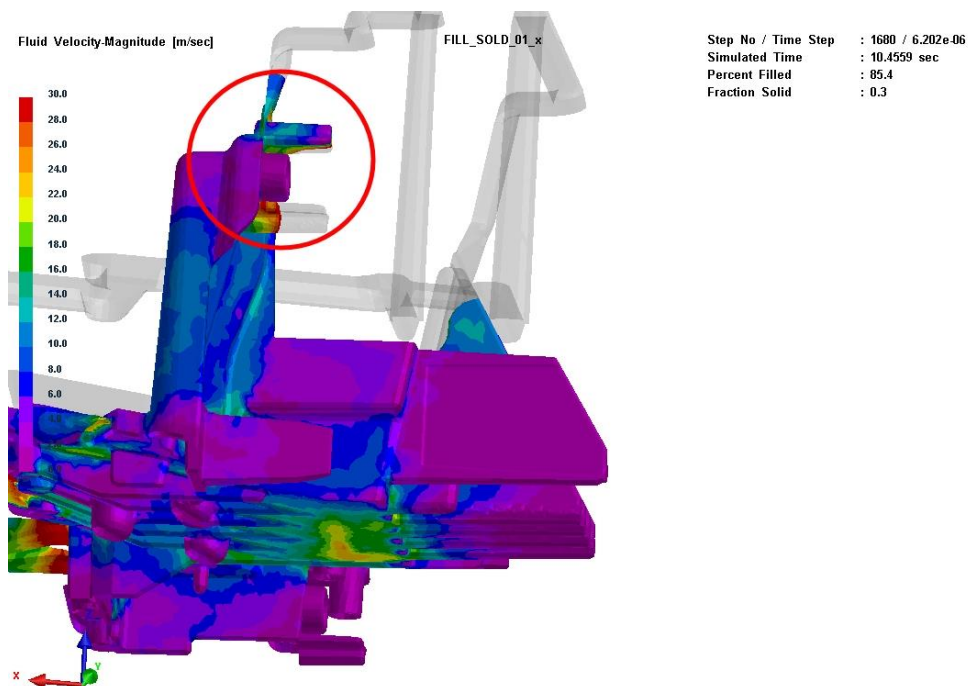
ProCAST

Obr. 88 Detailní simulace plnění kritických míst v čase 10,4551 s



ProCAST

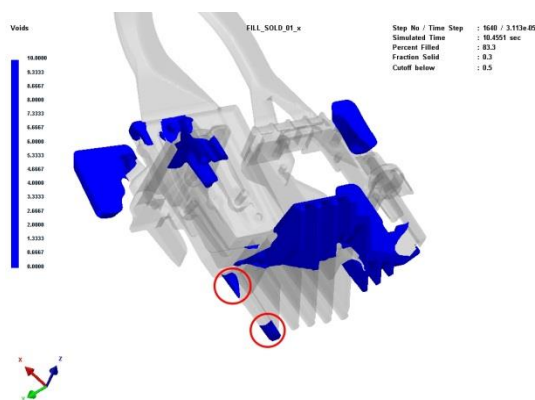
Obr. 89 Detailní simulace plnění kritických míst v čase 10,4553 s



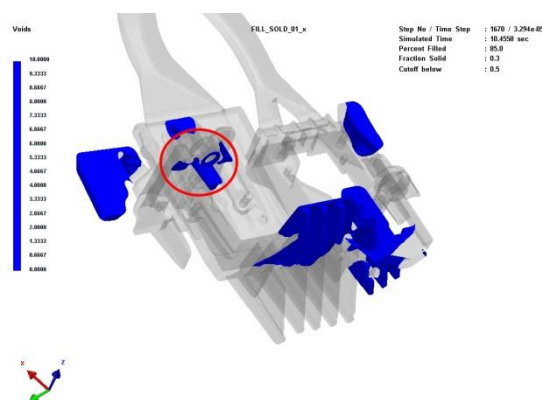
ProCAST

Obr. 90 Detailní simulace kritických míst v čase 10,4559 s

Z uvedených snímků simulace plnění dutiny formy lze vyvodit, že po změně plnicích parametrů nedochází k uzavírání vzduchu uprostřed žebra (kritické místo B), což byla příčina vzniku vady. V případě kritického místa A lze pozorovat, že zde stále zůstává uzavřen vzduch i když už je odvzdušňovací kanál vyplněn kovem. V tomto případě lze udělat pouze úpravy formy vedoucí ke zlepšení odvodu vzduchu kolem vyhazovače.



Obr. 91 Uzavřený vzduch v místě B

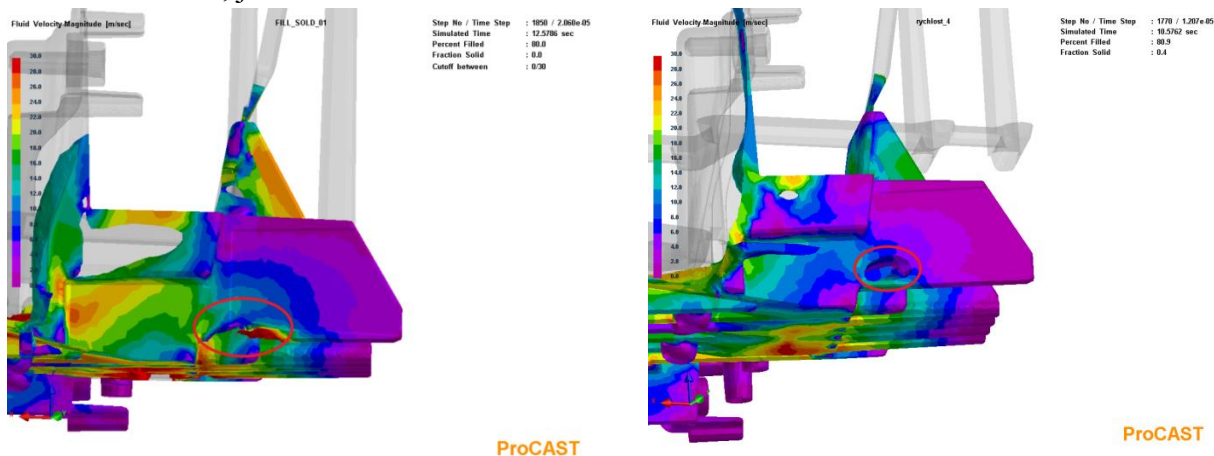


Obr. 92 Uzavřený vzduch v místě A

Z obrázků 91 a 92 je patrné, že stále dochází k uzavírání vzduchu v kritických místech. V případě kritické oblasti B dochází k uzavření vzduchu ve spodní části žebra oproti předchozímu stavu, kdy se uzavíral uprostřed žebra. Proto nedochází vlivem plnicího proudu k víření takto uzavřeného vzduchu jako v předchozím případě a tím ke vzniku vady v této oblasti.

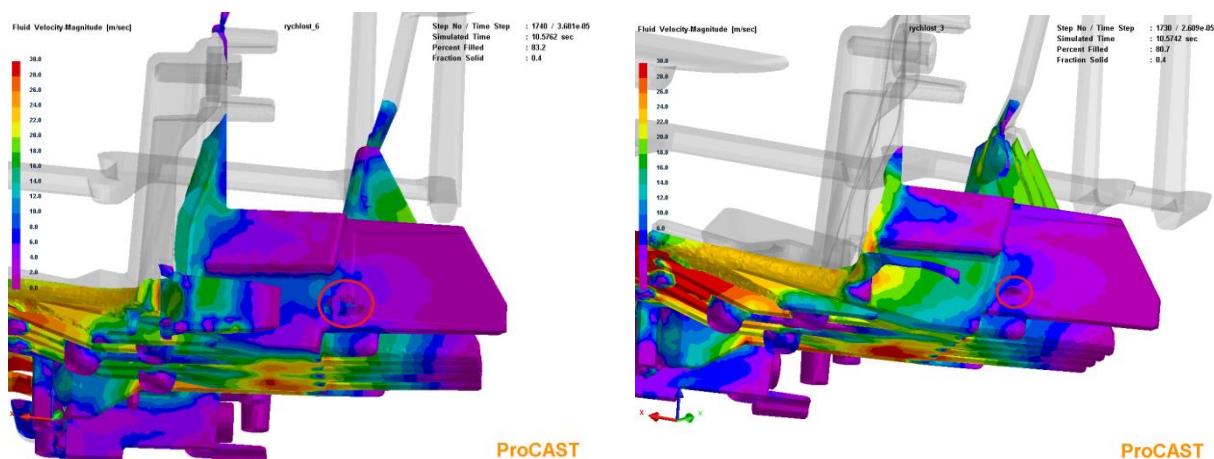
9.4.4 Varianty startu druhé fáze v nařiznutí

Podle teorie by měl start druhé fáze lisování začít, jakmile dosáhne kov vtokového nařiznutí. Ale u varianty 1 i u varianty 2 je patrné, že druhá fáze začíná dříve, než kov dosáhne vtokového nařiznutí a tím je forma více mechanicky namáhána proudícím kovem (může se snížit životnost formy). Dalším postupem experimentu tedy bylo provést simulace plnění při startu druhé fáze, jakmile kov dosáhne nařiznutí.



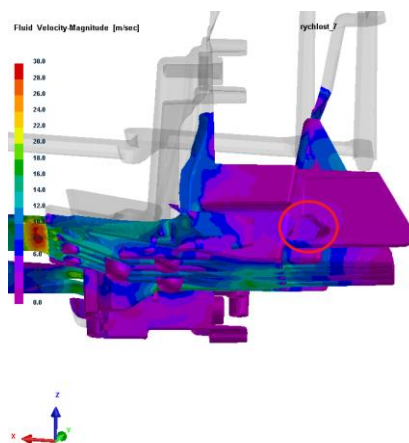
Obr. 93 Rychlost $v_2 = 3,4$ m/s

Obr. 94 Rychlost $v_2 = 2,4$ m/s

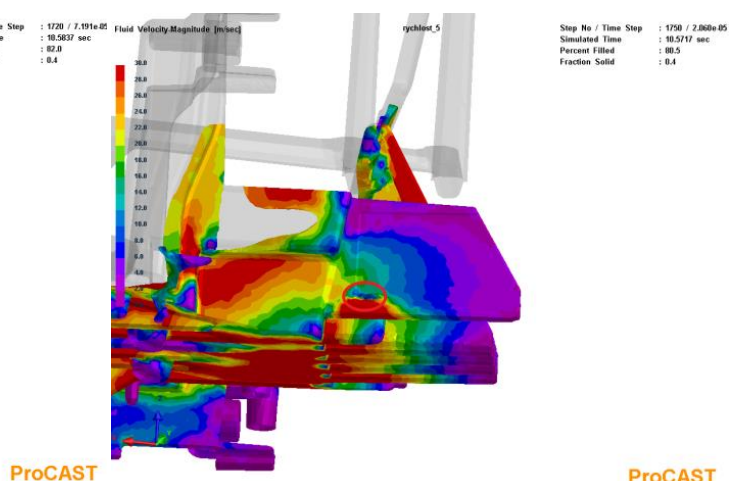


Obr. 95 Rychlost $v_2 = 2,7$ m/s

Obr. 96 Rychlost $v_2 = 2,9$ m/s



Obr. 97 Rychlost $v_2 = 1,5$ m/s



Obr. 98 Rychlost $v_2 = 4$ m/s

Z obrázku 93 je však patrné, že pokud druhá fáze lisování bude začínat, když kov dosáhne nařiznutí, tak podle simulace v místě B dojde zase k uzavření vzduchu proudícím kovem na stejném místě, jak tomu bylo u varianty 1. Takto uzavřený vzduch se bude v místě B vyskytovat i při změně rychlosti v_2 (zvýšením i snížením rychlosti v_2) jak je tomu podle simulace plnění na obr. 93 – 98.

ZÁVĚRY

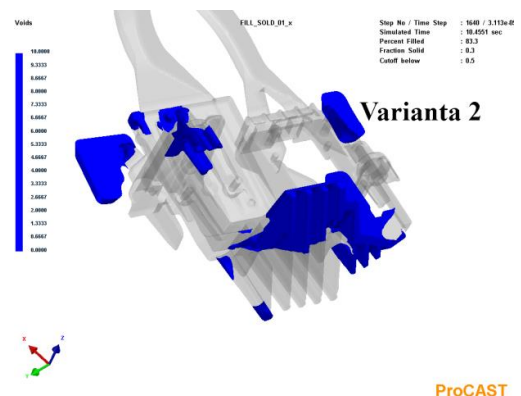
Na začátku praktické části práce byl uveden stávající proces výroby řešeného odlitku s výskytem vad. Dále byly vzniklé vady pomocí mikroskopické analýzy určeny jako studený spoj a zavalenina (341)

Pomocí simulace byla zkoumána příčina vzniku vady. Ze simulace plnění odlitku je patrné, že při původních parametrech plnění v kritických místech A i B označených na obr. 49 a 50 dochází k uzavření vzduchu, který nemá z odlitku jak uniknout.

V případě místa A je možné upravit vyhadzovač lehkým zbrošením, aby mohl vzduch uniknout kolem něj. V případě místa B byl zvolen postup zkrácení času plnění dutiny formy a to změnou parametrů plnění uvedených v tabulce 8. Z obr. 99 a 100 vyplývá, že při změně parametrů plnění dochází vytlačení uzavřeného vzduchu ze středu žebra k jeho okraji, kde nedochází k víření takto uzavřeného vzduchu.



Obr. 99 Uzavřený vzduch u varianty 1 v místě B



Obr. 100 Uzavřený vzduch u varianty 2 v místě B

Takto změněné parametry pomohly ke snížení průměrné zmetkovitosti z původních 27,7% na 10,1%. Také díky tomu již nedochází k víření uzavřeného vzduchu uprostřed žebra, a tak na něm nevzniká analyzovaná vada (obr. 101 a 102).



Obr. 101 Odlitek varianta 1



Obr. 102 Odlitek varianta 2 (vada potlačena)

Bylo také simulováno plnění odlitku při startu druhé fáze lisování, jakmile kov dosáhne naříznutí s rozdílnými rychlostmi během této fáze. Bylo zjištěno, že v rozporu s teorií, je v některých případech výhodnější (z hlediska kvality odlitku) start druhé fáze dříve než kov dosáhne naříznutí.

Ze závěrů vyplývá, že problém s uzavřeným vzduchem v místě B nebyl zcela odstraněn. K úplnému odstranění tohoto problému by vedla změna vtokové soustavy či změna konstrukce samotného odlitku. To by však muselo být předmětem dalšího zkoumání. Z ekonomického hlediska by se však jednalo o velmi nákladný zákrok.

Jak je patrné z uvedené zmetkovitosti, došlo ke zlepšení kvality vyráběného odlitku a podíl neshodných výrobků byl zavedenými opatřeními významně snížen. Pro slévárnu je toto řešení optimální.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6
2. VALECKÝ, Jindřich et al. *Lití kovů pod tlakem*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963, 452 s.
3. *Zhengzhou YiLi Machinery Co, Ltd* [online]. In: . [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <http://cz.yilicastings.com/cast-aluminum-parts/aluminum-die-castings/>
4. *TheMetalCasting.com: Pressure die casting* [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.themetalcasting.com/pressure-die-casting.html>
5. VINARCIK, Edward J. *High integrity die casting processes*. New York: Wiley, c2003. ISBN 978-0471201311.
6. ELBEL, Tomáš. *Diagnostika a řízení kvality odlitků: studijní opora*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3584-6.
7. ŠENBERGER, Jaroslav. *Metalurgie oceli na odlitky*. V Brně: VUTIUM, c2008. ISBN 978-80-214-3632-9.
8. KRŇÁVEK, Václav a František STRÍTECKÝ. Konstrukce forem pro odlitky lité pod tlakem a její vliv na výskyt vad. *Slévárství*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2007, roč. LV(2-3), s. 81-86. ISSN 0037-6825.
9. OTÁHAL, Vlastislav. Vady odlitků Atlas Vad Železné a neželezné slitiny [online]. 1. vyd. Brno: MetalCasting and Foundry Consult, Otáhal Vlastislav, Brno, Horská 27. [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <http://otahalconsult.cz/soucasne-produkty/vadz-odlitku/vady-odlitku-vadz-odlitku/>
10. *Katalog vad odlitků ze slitin hliníku*. Brno: Česká slévárenská společnost, 2018. ISBN 978-80-02-02817-8.
11. ŠUSTR, Jindřich. Formy pro tlakové lití. *Slévárství*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2005, LIII(2-3), s. 88-89. ISSN 0037-6825.
12. HPDC casting defects. *HIGH PRESSURE DIE CASTING* [online]. [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <http://theoryofhpdc.blogspot.com/2018/04/types-of-defects-in-hpdc-high-pressure.html?showComment=1548615841120>
13. WALKINGTON, William G. *Die casting defects: troubleshooting guide*. Wheeling, Ill.: North American Die Casting Association, c2003.

14. BONOLLO, F., G. TIMELLI, E. FIORESE, E. GARIBOLDI, P. PARONA a L. ARNBERG. *Database on defects* [online]. In: . s. 25 [cit. 2019-04-12]. Dostupné z:
http://www.stacastproject.org/sc/docs/deliverables/d_2_1_database_on_defects.pdf
15. MERTZ, KLEIN a BAWIDAMAN. *Katalog vad tlakových odlitků*. SCHAEFFER CHEMICALS. Aalen: Arbeitsgemeinschaft Metallguss, 2008. BRITE/EURAM: PROJECT BE 3636(89).
16. NEFF, David. *Castings Defects Handbook: Aluminum & Aluminum Alloys*. American Foundry Society. ISBN 978-0-87433-366-4.
17. HAVLÍČEK, František. Vliv konstrukce odlitků na vznik trhlin a prasklin. *Slévárství*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2007, roč. LV(2-3), s. 73-80. ISSN 0037-6825
18. MIRZAEI, Behzad. *Oxide hydrogen interaction and porosity development in AlSi foundry alloys*. Norwegian University of Science and Technology, 2011. Master's thesis. Norwegian University of Science and Technology. Vedoucí práce Ragnhild Aune.
19. MÍŠEK, J. *Vliv odplynění na kvalitu odlitků vyrobených technologií vysokotlakého lití*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 56 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc
20. CAMPBELL, John. *Castings*. 2nd ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003. ISBN 9780750647908.
21. JANKES, Erik. *Využití řízeného naplyňování slitin Al-Si při tlakovém lití*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 74 s. 26 příloh. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc
22. ZEMČÍK, Ladislav. Vodík ve slitinách hliníku. *Slévárství*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2012, roč. LX(2-3), s. 154-157. ISSN 0037-6825
23. KAUFMAN, J. G. a Elwin L. ROOY. *Aluminum alloy castings: properties, processes, and applications*. Materials Park, OH: ASM International, 2004. ISBN 0-87170-803-5.
24. FIORESE, Elena, Franco BONOLLO, Giulio TIMELLI, Lars ARNBERG a Elisabetta GARIBOLDI. New Classification of Defects and Imperfections for Aluminum Alloy Castings. *International Journal of Metalcasting* [online].

2015, **9**(1), 55-66 [cit. 2019-04-13]. DOI: 10.1007/BF03355602. ISSN 1939-5981. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF03355602>

25. BAKEMEYER, Henry. *Operating the die casting machins*. Arlington Heights, Ill.: North American Die Casting Association, c2008.
26. HU, X.G., Q. ZHU, S.P. MIDSON, H.V. ATKINSON, H.B. DONG, F. ZHANG a Y.L. KANG. Blistering in semi-solid die casting of aluminium alloys and its avoidance. *Acta Materialia* [online]. 2017, **124**, 446-455 [cit. 2019-04-12]. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.11.032. ISSN 13596454. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359645416308990>
27. BEDNÁŘOVÁ, Vlasta. *Základy teorie a technologie slévárenství: Studijní opora* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Opory_FMMI/618/618-Zaklady_teorie_a_technologie_slevarenstvi.pdf
28. MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
29. ROUČKA, J. *Příručka o filtraci*. 1. vyd. Brno: Česká slévárenská společnost, 2000. 41 s. ISBN 80-02-01389-1
30. GROV, Norbert, Peter LUTZE a Hubert KOCH. Možnosti tlakového odlévání hliníku-použití této technologie v mezní oblasti. *Slévárenství*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2005, roč. **LIII**(2-3), s. 95-101. ISSN 0037-6825.
31. HYNEK, Martin, Marek KOVÁČ a Zbyněk KUZMA. *Numerická simulace procesu vysokotlakého lití slitiny hliníku* [online]. Plzeň, 2014 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: http://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_01_publikace/KA01_02-numericka-simulace-vysokotlakeho-liti.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
RTG	Rentgenové zařízení	[-]
CT	Počítačová tomografie	[-]
HB	Tvrдость podle Brinella	[-]
E	Modul pružnosti materiálu	[MPa]
ΔT	Teplotní gradient	[°C]
α	Součinitel tepelného smrštění	[1/°C]
$\alpha(\text{Al})$	Tuhý roztok hliníku	[-]
S	Rozpustnost vodíku v tavenině	g]
T	Teplota kovu	[K]
A, B	Konstanty pro daný kov	[-]
p_{H_2}	Parciální tlak vodíku v okolní atmosféře	[kPa]
α	Označení fáze	[-]
β	Označení fáze	[-]
δ	Označení fáze	[-]
k	Konstanta	[-]
p_{H}	Tlak v bublině vodíku	[kPa]
$p_{\text{met.}}$	Metalostatický tlak	[kPa]
$p_{\text{atm.}}$	Atmosferický tlak	[kPa]
p_{σ}	Tlak vyvolán povrchovým napětím	[kPa]
p_{v}	Tlak vyvolán povrchovým napětím pro kulovitou bublinu	[kPa]
σ	Povrchové napětí na rozhraní tavenina-bublina	[kg/s ²]
r	Poloměr bubliny	[μm]
θ	Úhel smáčivosti	[°]
$\sigma_{\text{z-t}}$	Povrchové napětí mezi zárodkem a taveninou	[kg/s ²]
$\sigma_{\text{z-p}}$	Povrchové napětí mezi zárodkem a plynem	[kg/s ²]
$\sigma_{\text{p-t}}$	Povrchové napětí mezi plynem a taveninou	[kg/s ²]
σ_0	Tahové napětí	[MPa]
v_0	Rychlost pístu ve fázi 1	[m/s]
v_1	Rychlost pístu při uzavření plnicího otvoru	[m/s]
v_2	Rychlost pístu ve fázi 2	[m/s]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Odlitky vyrobené technologií vysokotlakého lití	10
Obr. 2 Schéma tlakového stroje s teplou komorou	11
Obr. 3 Schéma tlakového stroje se studenou komorou	12
Obr. 4 Cyklus lití na stroji se studenou komorou	12
Obr. 5 Savenův diagram příčin vzniku vad při tlakovém lití	14
Obr. 6 Nezaběhnutí	15
Obr. 7 Přetryskaný odlitek	16
Obr. 8 Omačkaný a potlučený odlitek	16
Obr. 9 Nesprávně odstřižený odlitek	17
Obr. 10 Ulomená část odlitku	18
Obr. 11 Přesazený odlitek	18
Obr. 12 Nevyhovující tvar odlitku	19
Obr. 13 Drsný povrch odlitku	20
Obr. 14 Vada vzniklá erozí formy (zvětšení 10x)	21
Obr. 15 Zateklina do dělicí roviny	22
Obr. 16 Zateklina do vyhazovačů	23
Obr. 17 Zateklina do prasklin ve formě	23
Obr. 18 Mapovitý povrch odlitku	24
Obr. 19 Koroze na povrchu odlitku	25
Obr. 20 Odloupnutá vrstva materiálu	26
Obr. 21 Vytržená vrstva materiálu z odlitku vlivem nalepení kovu na formu	27
Obr. 22 Povrchová trhlina	28
Obr. 23 Metalografický výbrus povrchové trhliny	28
Obr. 24 Vnitřní trhlina	28
Obr. 25 Metalografický výbrus vnitřní trhliny	28
Obr. 26 Prasklina vzniklá při vyjímání odlitku z formy	30
Obr. 27 Studený spoj	31
Obr. 28 Rozpuštění vodíku v čistém hliníku a ve dvou různých slitinách	32
Obr. 29 Vliv přísadových prvků na snižování rozpustnosti vodíku v Al – slitině	32
Obr. 30 Vliv přísadových prvků na zvyšování rozpustnosti vodíku v Al – slitině	33
Obr. 31 Tvorba bublin na cizím zárodku	34
Obr. 32 Bublina způsobená vodíkem	35
Obr. 33 Bublina způsobená vodíkem na elektronovém rastrovacím mikroskopu	35
Obr. 34 Zahlcený vzduch	36
Obr. 35 Zahlcený vzduch na povrchu odlitku	36
Obr. 36 Objemové změny při tuhnutí	36
Obr. 37 Otevřená staženina	37
Obr. 38 Vnitřní staženina	37
Obr. 39 Řediny	38
Obr. 40 Propadlina na povrchu odlitku	39
Obr. 41 Oxidická plena	40
Obr. 42 Oxidická plena z elektronového rastrovacího mikroskopu (zvětšení 200 x)	40
Obr. 43 Metalografický výbrus broku	41
Obr. 44 Chladič automobilového osvětlení	43
Obr. 45 Tlakový licí stroj a jeho přídatná zařízení	44
Obr. 46 Porovnání řízeného průběhu lisování a tradičního způsobu lisování	45
Obr. 47 Tlakový licí stroj, manipulační robot a ostříhvací stroj	45
Obr. 48 Odlev chladičů	46

Obr. 49 Místa výskytu vad.....	46
Obr. 50 Detailní zobrazení místa výskytu vady	46
Obr. 51 Snímek místa výskytu vady B, zvětšení 14x (1. strana)	47
Obr. 52 Snímek místa vady B, zvětšení 40x (1. strana)	47
Obr. 53 Snímek z místa vady B, zvětšení 14x (2. strana).....	48
Obr. 54 Snímek vady z místa B, zvětšení 40x (2. strana).....	48
Obr. 55 Snímek výbrusu z místa A.....	49
Obr. 56 Snímek 1 výbrusu z místa B.....	49
Obr. 57 Snímek 2 výbrusu z místa B.....	49
Obr. 58 Snímek 3 výbrusu z místa B.....	49
Obr. 59 Rozložení teplot nacyklované pevné poloviny formy	51
Obr. 60 Rozložení teplot nacyklované pohyblivé formy.....	51
Obr. 61 Snímek teplotního rozložení pevné formy po postřiku	51
Obr. 62 Simulace plnění v čase 9,0546 s.....	52
Obr. 63 Simulace plnění v čase 10,2198 s.....	52
Obr. 64 Simulace plnění v čase 10,5674 s.....	52
Obr. 65 Simulace plnění v čase 10,5712 s.....	52
Obr. 66 Simulace plnění v čase 10,5736 s.....	52
Obr. 67 Simulace plnění v čase 10,5838 s.....	52
Obr. 68 Detailní simulace plnění kritických míst v čase 10,5747 s	53
Obr. 69 Detailní simulace plnění kritických míst v čase 10,5765 s	53
Obr. 70 Detailní simulace plnění kritických míst v čase 10,5774 s	54
Obr. 71 Detailní simulace plnění kritických míst v čase 10,5786 s	54
Obr. 72 Detailní simulace plnění kritických míst v čase 10,5789 s	55
Obr. 73 Detailní simulace plnění kritických míst v čase 10,5804 s	55
Obr. 74 Detailní simulace plnění kritických míst v čase 10,5819 s	56
Obr. 75 Uzavřený vzduch v místě B.....	56
Obr. 76 Uzavřený vzduch v místě A	56
Obr. 77 Zobrazení místa vady B po simulaci plnění	57
Obr. 78 Zobrazení místa vady B v řezu.....	57
Obr. 79 Zobrazení místa výskytu vady B na reálném odlitku	59
Obr. 80 Simulace plnění v čase 8,9710 s.....	59
Obr. 81 Simulace plnění v čase 10,2822 s.....	59
Obr. 82 simulace plnění v čase 10,4449 s	59
Obr. 83 Simulace plnění v čase 10,4477 s.....	59
Obr. 84 Simulace plnění v čase 10,4523 s.....	59
Obr. 85 Simulace plnění v čase 10,4598 s.....	59
Obr. 86 Detailní simulace plnění kritických míst v čase 10,4541 s	60
Obr. 87 Detailní simulace plnění kritických míst v čase 10,4548 s	60
Obr. 88 Detailní simulace plnění kritických míst v čase 10,4551 s	61
Obr. 89 Detailní simulace plnění kritických míst v čase 10,4553 s	61
Obr. 90 Detailní simulace kritických míst v čase 10,4559 s	62
Obr. 91 Uzavřený vzduch v místě B.....	62
Obr. 92 Uzavřený vzduch v místě A	62
Obr. 93 rychlost $v_2 = 3,4$ m/s.....	63
Obr. 94 Rychlost $v_2 = 2,4$ m/s	63
Obr. 95 Rychlost $v_2 = 2,7$ m/s	63
Obr. 96 Rychlost $v_2 = 2,9$ m/s.....	63
Obr. 97 Rychlost $v_2 = 1,5$ m/s.....	64
Obr. 98 Rychlost $v_2 = 4$ m/s.....	64

Obr. 99 Uzavřený vzduch u varianty 1 v místě B	65
Obr. 100 uzavřený vzduch u varianty 2 v místě B	65
Obr. 101 Odlitek varianta 1	65
Obr. 102 Odlitek varianta 2 (vada potlačena).....	65