VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VYUŽITÍ ŘÍZENÍHO NAPLYŇOVÁNÍ SLITIN Al-Si PŘI TLAKOVÉM LITÍ

USE OF CONTROLLED GASSING OF Al-Si ALLOYS DURING DIE CASTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ERIK JANKES

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JAROMÍR ROUČKA, CSc.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Erik Jankes

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Slévárenská technologie (2301T014)**

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:

Využití řízeného naplyňování slitin Al-Si při tlakovém lití

v anglickém jazyce:

Use of controlled gassing of Al-Si alloys during die casting

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ověření možnosti provádění řízeného naplyňování slitin Al-Si, jeho vliv na vznik staženin, na vnitřní homogenitu, mechanické vlastnosti a těsnost odlitků. Vliv režimu tavení na změny stupně naplynění.

Cíle diplomové práce:

Posouzení použitelnosti a efektu řízeného naplynění.

Seznam odborné literatury:

1. GRUZLESKI, J.-E., CLOSSET, B.-M. The treatment of Liquid Aluminium-Silicon Alloys. Des Plaines: AFS, 1999. 250 p. ISBN 0-87433-121-8.
2. Aluminium Casting Technology Handbooik. Edited by DL Zalensas, 2th ed. Des Plaines: AFS, 1993. 350 p. ISBN 0-87433-157-9.
3. ROUČKA, J. Metalurgie neželezných slitin. Skripta VUT. Brno: Akademické nakladatelsltví CERM, 2004. 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
4. VOGEL, W., et al. Vermeidung von schwindungsbedingten Gussfehlern durch nanostrukturierte Oxide. Giesserei. 2011, č. 2, s. 52-63.
5. HORKÝ, K., VRTÍLEK, J. Eliminace staženin pomocí přípravku Probat Fluss MIKRO 100. Slévárenství. 2008, č. 7-8, s. 357-358. ISSN 0037-6825.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 13.11.2014

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc. Ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá možností, řízeného naplyňování slitin Al-Si při odlévání v tlakové slévárně. K naplyňování taveniny bylo použito rotační odplyňovací zařízení a jako médium plyn 20 % H_2 v N_2. Odlitky byly odlity vysokotlakým licím zařízením. Cílem tohoto výzkumu je srovnání vnitřních vad (zejména staženin) u kusů vyrobených z odplyněné a naplyněné taveniny.

Klíčová slova

naplyňování, vodík, slitiny hliníku, staženiny, porezita, vysokotlaké lití

ABSTRACT

This master thesis will cover the possibility of using directed gassing of Al-Si alloys in a high pressure die casting foundry. As a control gas, rotary degasser with gaseous 20 % H_2 in N_2 as a medium was used. Castings were casted via high pressure die casting machine. The aim of this research is to compare internal defect such as porosity or shrinkage of a casts made from degassed and control gassed melt.

Key words

controlled gassing, hydrogen, aluminium alloys, shrinkage, porosity, high pressure die casting

Bibliografická citace

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.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Využití řízeného naplyňování slitin Al-Si při tlakovém lití** vypracoval (a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Erik Jankes

PODĚKOVÁNÍ

Chci poděkovat mým rodičům, kteří mě podporovali po celou dobu mého studia. Dále děkuji vedoucímu práce za rady a firmě Kovolis Hedvíkov a.s. za možnost provedení experimentu.

OBSAH

ABSTRAKT 4
OBSAH 7
ÚVOD 9
1. KVALITA TAVENINY 10
1.1 Zdroje vodíku 11
Hlavní zdroje vodíku v tavenině: 12
1.2 Rozpustnost vodíku v hliníkových slitinách 13
1.3 Teoretický popis vzniku pórů 16
1.3.1 Homogenní nukleace 18
1.3.2 Heterogenní nukleace 18
1.4 Faktory ovlivňující množství pórů v odlitku 20
1.4.1 Obsah vodíku a rychlost ochlazování 20
1.4.2 Čistota kovu 22
1.4.3 Modifikace 23
1.4.4 Konstrukce formy 24
2. STAŽENINY A BUBLINY 26
2.1 Eliminace 29
3. ODPLYŇOVÁNÍ SLITIN HLINÍKU 30
3.1 Probublávání pomocí plynů 31
4. NAPLYŇOVÁNÍ SLITIN HLINÍKU 33
5. PŘEDSTAVENÍ ZKOUMANÉHO ODLITKU 35
5.1 Predikce vzniku vady pomocí simulace 40
6. PRAKTICKÁ ČÁST 47
6.1 Index hustoty – Dichte Index (DI) 49
6.2 Chemické složení slitiny 57
6.3 Vyhodnocení porezity ve struktuře odlitku 59
6.3.1 Rentgenová zkouška 59
6.3.2 Porovnání makroskopických fotek defektů s RTG snímky 62
7. SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ 65
8. NÁVRHY NA ZMĚNY 66
8.1 Úprava formy 66
8.1.1 Konstrukce formy 66
8.1.2 Jet-Cooling 66
8.2 Úprava taveniny 67

9. ZÁVĚR 68
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 69
SEZNAM OBRÁZKŮ 71
SEZNAM TABULEK 73
SEZNAM PŘÍLOH 74

ÚVOD

Odlitky vyráběné ze slitiny hliníku jsou celosvětový fenomén, který se asi dlouho nezmění. Je obtížné hledat nové materiály, a proto je veliká snaha zlepšovat výrobní postupy známých slitin. Neustále se budou vyvíjet nové a sofistikovanější způsoby/zařízení určené pro tavení, odlévání, tepelného zpracování příslušných slitin.

Při tuhnutí hliníkových slitin dochází ke změně objemu (smrštění), následkem toho vznikají vnitřní vady (staženiny, řediny, atd.). Tyto vnitřní defekty nejčastěji vznikají v silnějších stěnách odlitku a místech zvaných tepelný uzel. Existují různé metody, které umožňují zabránit nebo aspoň snížit riziko jejich vzniku (nálitky, změna konstrukce odlitku/formy, řízené naplynění, atd.). Platí pravidlo, různé technologie různé možnosti. Například při gravitačním lití do pískové formy není problém vytvořit nálitek nebo upravit formu, ale u vysokotlakého/nízkotlakého lití do kovových forem je velice složité provádět změny formy, výhodnější je provést úpravu taveniny.

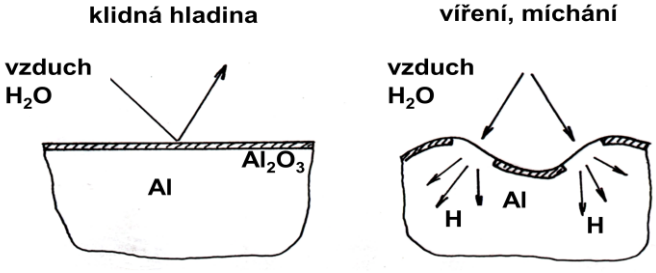
Ve spolupráci s vysokotlakou slévárnou hliníku Kovolis Hedvíkov a.s., jsme se zaměřili právě na úpravu taveniny, a to za pomoci řízeného naplyňování. V podstatě šlo o foukání 20 % H_2 v N_2 (v plynné formě) do roztaveného hliníku. Odlitky vyrobené z této taveniny byly rentgenovány a některé rozřezány. O výsledku nejvíce vypovídají rentgenové snímky a některé fotky z rozřezaných kusů. Na závěr jsou porovnány vady vzniklé u odlitků vyrobených z odplyněné a naplyněné slitiny.

1. KVALITA TAVENINY

Hliníkové slitiny používané ve slévárnách obsahují řadu různých druhů oxidů, karbidů, boridů a jiných sloučenin. Dají se rozdělit do tří skupin: rozpuštěné plyny, nekovové vměstky a stopové prvky. Většinu z nich není možné za běžných podmínek odstranit, a je důležité znát, z čeho a jak vznikají (viz **tabulka 1-1**). Některé pocházejí z prvotního zpracování bauxitu elektrolýzou. Další vznikají během styku s atmosférou a žáruvzdorninou (oxidy). Navíc se používají různé úpravy taveniny (např. očkování, modifikace, MIKRO 100). Jedná se o záměrné vnášení částic, které mají vliv na výslednou strukturu.

Například hliník vyrobený v zařízení zvaném Héroult-Hall[1] obsahuje okolo 0,01 % Na, 0,01% V, 0,5 ppm H, 0,1% Fe a 0,04% Si. Dále obsahuje velké množství neželezných částic o velikosti 50 μm a menší. Tyto částice jsou převážně oxidy (Al_2O_3), spinel ($MgAl_2O_4$) a karbidy (SiC, Al_4C_3). V tavenině nedochází k jejich rozpouštění, protože jejich teplota tání je vyšší než tavící teplota používaná v tavících pecích. Nicméně důležitá funkce těchto nečistot je ta, že fungují jako zárodky pro nukleaci jednotlivých fází. Jejich nežádoucí účinky jsou: špatný povrch odlitku, zvýšená porezita, větší náchylnost ke korozi a rapidní snížení mechanických vlastností [1].

Nemůže se ani zanedbat vliv prvků vyskytujících se v atmosféře, kyslík, vodík, dusík. Vstupují do taveniny přes narušenou oxidickou blánu/strusku (viz **obr. 1.1**), následně se dostávají do formy a zůstávají v odlitku, který pak může mít jiné než požadované vlastnosti. Z výše uvedených plynů má největší vliv na kvalitu kovu kyslík, a to kvůli vysoké afinitě k hliníku. Tato reakce probíhá až do té doby, než dojde k určité rovnováze [1].



Obr. 1.1 Oxidace roztavené slitiny hliníku [2]

Při tuhnutí kovu klesá rozpustnost, a tím dochází k vylučování (vzniku) intermetalických fází[2] a nekovových částic. Nejčastější nečistoty a jejich zdroje jsou popsány v **tabulka 1-1** [1].

Negativní vliv těchto nečistot je kromě samotného složení závislý také na morfologii, rozložení ve struktuře odlitku a technologii lití. Jednotlivé technologie mají různé požadavky na čistotu kovu [3].

---

[1] nejpoužívanější zařízení, které za pomocí elektrolýzy odděluje Al z minerálu Kryolit Na_3AlF_6
[2] intermetalická fáze je homogenní substance sestávající ze dvou nebo více kovů

Tabulka 1-1 Zdroje nečistot ve slitinách hliníku [4].

Typ vměstku	Možný původ	Typická velikost [µm]	Typická koncentrace (ppm)
Karbidy (Al_4C_3)	grafitická katoda Hall-Heroult pece	1–20	5
Boridy (TiB_2)	očkovadlo	1–3	10–50
Boridy (VB)	z Hall-Heroult pece	1	0,5
Borid-karbidy (Al_4B_4C)	očkovadlo	-	-
Grafit (C)	tavení, rotor odplyňovacího zařízení	-	-
Chloridy (NaCl, KCl)	rafinační soli	-	-
Oxid hořečnatý (MgO)	slitiny obsahující více Mg	1-100	0,01-2
Alfa fáze (α-Al_2O_3)	vzniká za vysokých tavících teplot	10-20	0,01
Gama fáze (γ-Al_2O_3)	vzniká při lití	-	-
Spinel ($MgAl_2O_3$)	slitiny se středním obsahem Mg	-	-
Žáruvzdornina	vyzdívka pece, kelímku	100-500	0,01

1.1 Zdroje vodíku

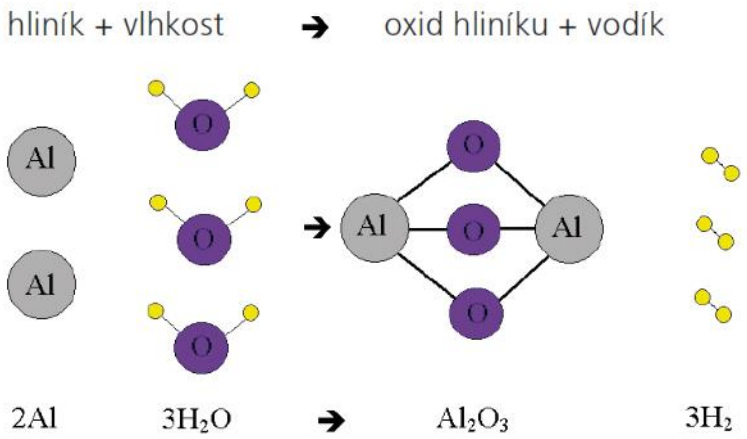
Roztavená hliníková slitina je vysoce reaktivní se svým okolím. Hlavní prvky reagující s taveninou jsou plyny jako kyslík, vodík a dusík. V této práci bude popsán pouze vliv vodíku.

K absorpci plynného vodíku do roztavené slitiny dochází přes narušenou strusku (plovoucí oxidy), a to na atomární úrovni za pomoci difuze[3] (viz **obr. 1.1** a **obr. 1.2**) v souladu s rovnicí(1) [5].

Rovnice (1) a **obr. 1.2** popisuje nejčastější způsob zvyšování obsahu vodíku v tavenině, který se za běžných podmínek ve slévárnách vyskytuje. Rovněž lze předpokládat, že většina vzdušné vlhkosti, která se dostane do styku s taveninou, reaguje tímto způsobem. Pokud na hladině plave struska (oxidy a jiné nečistoty), reakce se zpomalí, až zastaví. Ochranná funkce strusky funguje jen do teploty 930°C. Nad touto teplotou dochází k přeměně krystalické struktury. Tato změna způsobí, že reakce může zase probíhat. Ve slévárnách se používají nižší teploty (cca 700 °C). Přesto se může stát, že v tavící peci dojde k lokálnímu dosažení teploty 930 °C i více [5].

$$2Al_{(l)} + 3H_2O_{(g)} \rightarrow Al_2O_{3(s)} + 6H \quad (1)$$

[3]pohyb částic vyvolaný gradientem (např. teplotním, koncentračním), jejich spontánní mísení v důsledku náhodného tepelného pohybu, disperze



Obr. 1.2 Reakce Al s vlhkostí (H_2O) za vzniku oxidu hlinitého (Al_2O_3) a vodíku (H_2) [6]

Hlavní zdroje vodíku v tavenině:

a) **Atmosféra** – je bezpochyby největším zdrojem vodíku (z vodní páry). Vzduch při teplotě 26 °C a relativní vlhkosti obsahuje okolo 16 g/m^3 vody. Takovéto atmosférické podmínky se nacházejí v Evropě a Severní Americe většinu roku. Rovněž roční období hraje roli. S ohledem na vzdušnou vlhkost v kombinaci s plynovými hořáky pecí jsou pro slévárny lepší suché zimy než vlhké léto [5].

b) **Tavidla** – jsou to hydroskopické[4] soli, které absorbují vzdušnou vlhkost. Měla by být pečlivě zabalena a skladována na suchém místě. V některých případech se mohou zahřát na 100°C (i více), aby se vysušila. Po tomto ohřátí by se měla ihned zpracovat, aby nedocházelo k opětovnému navlhnutí [5].

c) **Spalovací plyn** – spaliny většiny používaných plynů (C_xH_y) obsahují cca 10-20% vodní páry. Používané plyny obsahují metan CH_4, etan C_2H_6, aromatické uhlovodíky jako je benzen C_6H_6 a další. Jako příklad zdroje vody poslouží rovnice (2) popisující spalování metanu. Při spalování metanu se vyrobí až 2 m^3 vodní páry na každý metr krychlový zemního plynu (metanu). U elektrických pecí tento problém není. Když dojde k odstávce, tak jejich vyzdívka může absorbovat vodu (5-10 % hmotnosti vyzdívky) [4].

$$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O \qquad (2)$$

d) **Vyzdívka** – obzvláště nová vyzdívka obsahuje v pórech více vlhkosti, která přechází do taveniny a způsobuje její naplynění. Rovněž není žádoucí ohřívání a chladnutí vyzdívek, ať už u pecí nebo pánví. Studená vyzdívka zase absorbuje vlhkost.

e) **Nářadí a zařízení** – většina nářadí a zařízení může být navlhlá nebo účelově natřená olejem a jinými mazadly (např. píst v komoře tlakového licího stroje), které při styku s roztaveným kovem začnou hořet či jinak vytvářet spaliny a vlhkost.

[4] látky schopné pohlcovat a udržovat vodu

f) Vsázka – vsázku tvoří nové housky a vrat. Při správném skladování housek (suchý sklad) není potřeba se obávat vyšší obsahu vodíku v peci. Větší problém je vratný materiál, který je znečištěn mazadly používanými u lití. Další vrat můžou být třísky z obrobny. Ty obsahují chladicí kapaliny a jiné nekovové nečistoty (plasty, papír a další předměty co tam zaměstnanci vhodí), které nejsou vhodné na tavení. Existují technologie, které za pomoci vysoušení, propírání (někdy i lisování), recyklují třísky z obrobny. Některé způsoby této recyklace třísel nezaručují takovou čistotu, jakou by bylo potřeba. Nicméně existují slévárny, které úspěšně třísky recyklují (jako vrat) a šetří díky tomu velké náklady. Pro spalování znečištěné vsázky jsou šachtové pece vhodnější než pece kelímkové (elektrické, plynové), protože všechna nežádoucí média (voda, olej, atd.) shoří v šachtě a odejdou společně s dalšími spalinami ven komínem. Kdežto v kelímkové peci většina nečisto zůstává, a pak reaguje s kovem a vyzdívkou až do té doby, než se stáhne struska.

1.2 Rozpustnost vodíku v hliníkových slitinách

Rozpustnost vodíku v „čistém“ hliníku je větší než v hliníkové slitině. Naopak je tomu u schopnosti udržení vodíku. Čistý hliník dokáže udržet cca 4-5% a slitiny okolo 6-7% H_2. Je to díky tomu, že tuhnoucí slitina stlačuje bubliny vodíku. Při přidávání legujících prvků se současně mění i rozpustnost vodíků v tavenině. Prvky, které zvyšují rozpustnost, jsou Mg, Ti, Ni, Li. Naproti tomu prvky jako Si, Zn, Cu, Mn rozpustnost snižují. Nejdůležitější legující prvky jsou křemík a měď. Jejich vliv na rozpustnost je více zdokumentován viz **tabulka 1-2** (vztahy rozpustnosti několika vybraných slitin Al-Si a Al-Cu) [5].

Tabulka 1-2 Rozpustnost vodíku ve vybraných binárních slitina Al-Si a Al-Cu [5].

Slitina	Rozpustnost [ml/100gmAl]
Al-2 % Si	$\log_{10} S = \frac{-2800}{T} + 2{,}79$
Al-4 % Si	$\log_{10} S = \frac{-2950}{T} + 2{,}91$
Al-8 % Si	$\log_{10} S = \frac{-3050}{T} + 2{,}95$
Al-2 % Cu	$\log_{10} S = \frac{-2950}{T} + 2{,}90$
Al-4 % Cu	$\log_{10} S = \frac{-3050}{T} + 2{,}94$
Al-8 % Cu	$\log_{10} S = \frac{-3150}{T} + 2{,}94$

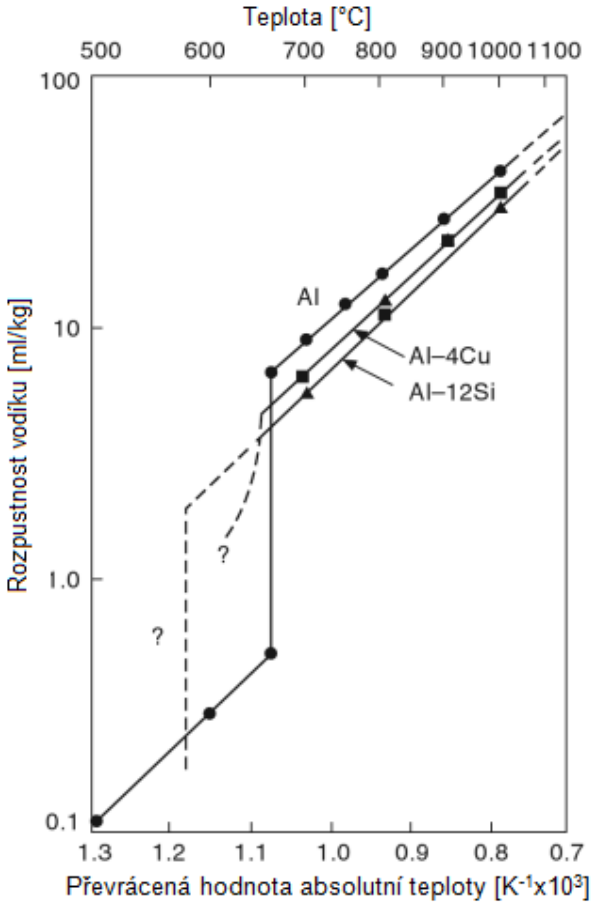
Na **obr. 1.3** jsou vykresleny tři křivky. Jedna ukazuje rozpustnost vodíku v čistém hliníku, další dvě vyjadřují rozpustnost v Al slitině (křivky jsou hodně podobné té základní). Se vzrůstající teplotou roste rozpustnost a naopak. V okolí taveniny dochází k vyrovnávání tlaků, a to až do té doby, dokud nenastane rovnováha. Avšak výměny vodíku mezi taveninou a okolím probíhají neustále

(pokud tomu není zabráněno např. vakuum, ochranná atmosféra, silná vrstva strusky, atd.). Vodík z taveniny uniká a zase se do ní vrací. Vždycky to bude záviset na teplotě a relativním parciálním tlaku vodíku přítomného v obou fázích (atmosféra – tavenina). Zejména při vyšším parciálním tlaku si tavenina udržuje určité množství vodíku. Rovnováha mezi parciálním tlakem vodíku a jeho koncentrací je popsána rovnicí (3). Před vstupem vodíku do taveniny musí dojít k jeho rozdělení z molekulárního na atomární podle rovnice (4) [1; 5].

$$H^2 = kP_{H_2} \tag{3}$$

$$\frac{1}{2}H_2(plyn) = H(v\ tavenině) \tag{4}$$

Je známo, že člen **k** (v rovnici (3)) je ovlivňován legováním a teplotou. Při konstantním parciálním tlaku vodíku je u určitých slitin člen **k** numericky závislým na teplotě [1].

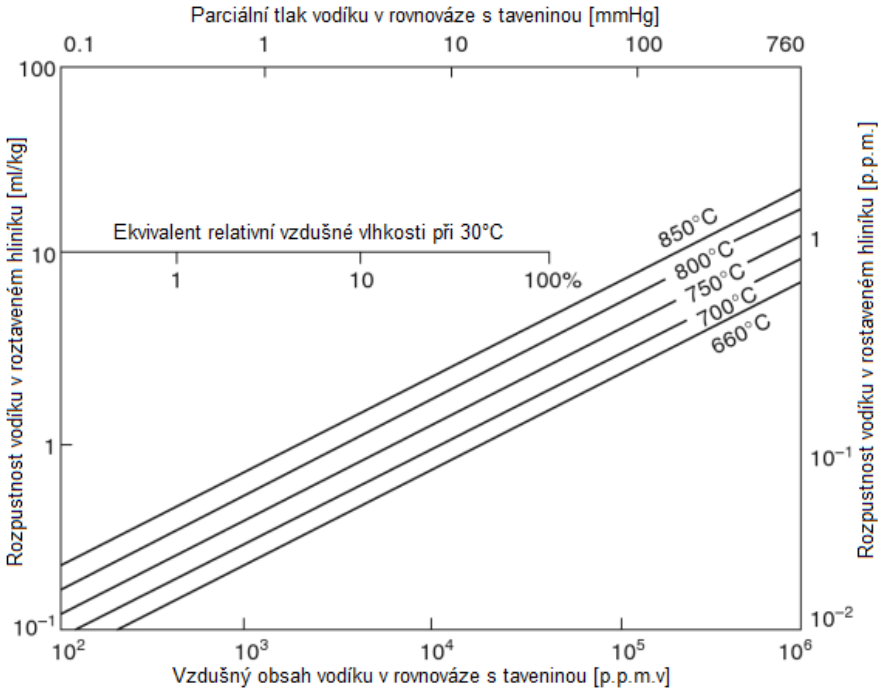


Obr. 1.3 Rozpustnost vodíku v čistém hliníku a ve dvou slitinách [4]

Atomární vodík má velice malý objem a díky tomu se může velice rychle rozptylovat v tavenině. Tento rozptyl probíhá v následujících krocích [1]:

1) rozložení molekulárního vodíku
2) vývoj aktivované absorpce na oxidickém filmu, který je na hladině
3) uvolnění vodíku z absorpční vrstvy a jeho přechod do taveniny
4) pohyb vodíku skrze krystalickou mřížku
5) přechod vodíku do absorpční vrstvy na opačné straně filmu
6) desorpce[5] atomů vodíku
7) doprava přenosem tepla velkého množství taveniny

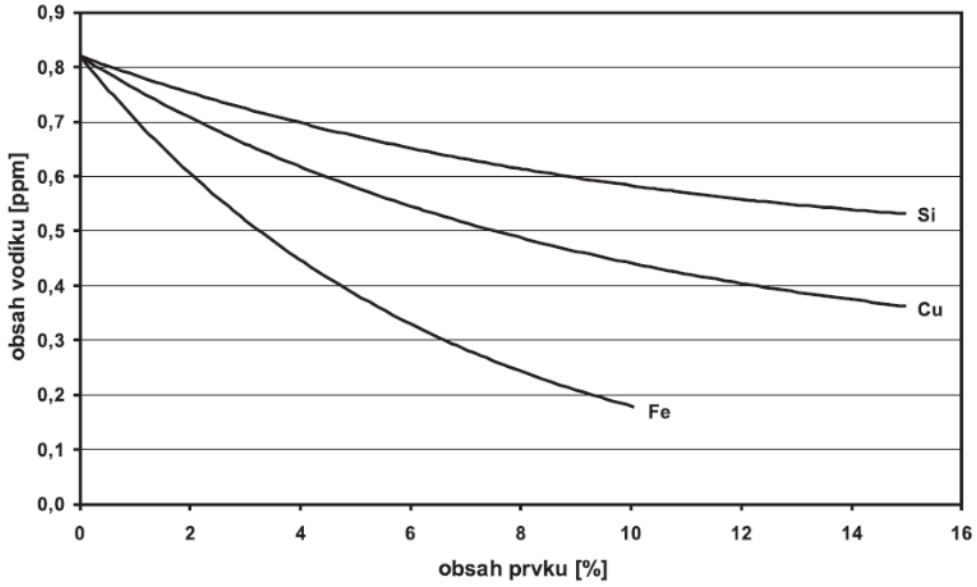
Na **obr. 1.4** je viditelný vztah mezi koncentrací/rozpustnosti vodíku a teplotou taveniny. Běžné slitiny mají rozpustnost v rozmezí: 0,2-0,3 ml/100g Al-Si, 0,4-0,5 ml/100g Al-Cu a 0,4-0,6 ml/100g Al-Mg. Slitiny Al-Mg pohlcují nejvíce H_2, ale zároveň vodík nejvíce uvolňují. Dále je na **obr. 1.4** viditelné, že za vyššího atmosférického tlaku a vyšší teploty, roste rozpustnost vodíku. Hliník neustále reaguje s kyslíkem, tvoří oxidický film, který brání dalšímu rozpouštění vodíku. Když slitina tuhne, snižuje se i rozpustnost vodíku, následkem toho je hromadění vodíku na fázovém rozhraní. Jakmile dojde k potřebnému přesycení, nastane vyloučení vodíku ve formě bublin (viz **kap. 1.3**). Tento způsob vylučování nastává hlavně u slitin, které mají velký interval tuhnutí. U slitin blízkých svým složením eutektickému bodu nebo slitin odlévaných do kovových forem (rychle tuhnou) se nebezpečí takto vyloučených bublin snižuje [1; 5; 7].



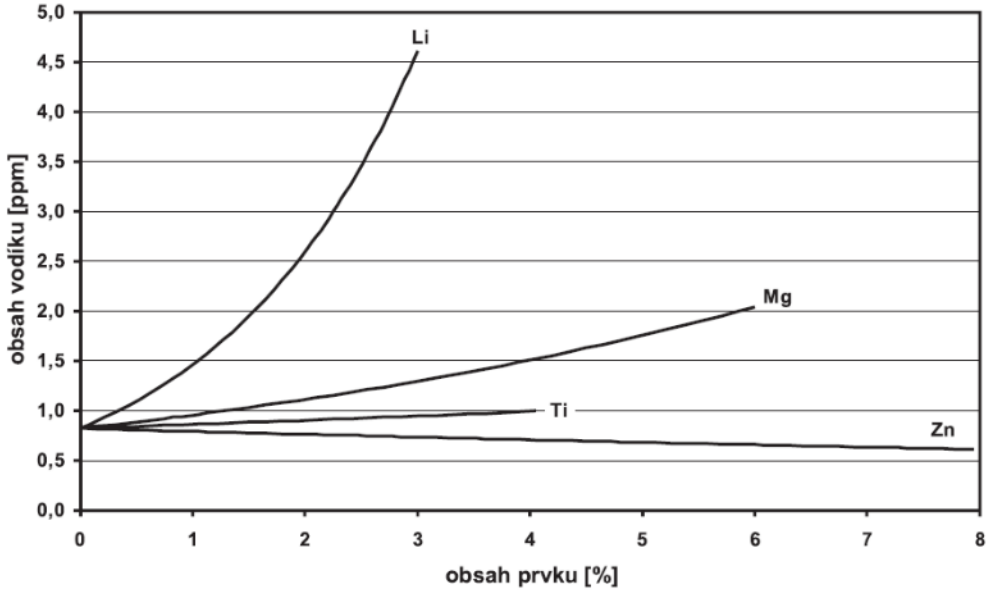
Obr. 1.4 Rozpustnost vodíku v roztaveném hliníku a obsah vodíku v atmosféře [4]

[5]uvolnění adsorbovaných molekul z povrchu látky (adsorbentu) nebo absorbovaných molekul z objemu látky (absorbentu)

Při rozdílném chemickém složení jednotlivých slitin, může docházek k různým výsledkům při stejných podmínkách (parciální tlaky, teplota) u odplynění. Je to způsobeno účinky, které mají jednotlivé přísadové prvky na rozpustnost vodíku.



Obr. 1.5 Vliv přísadových prvků na snižování rozpustnosti vodíku v Al-slitině [8]



Obr. 1.6 Vliv přísadových prvků na zvyšování rozpustnosti vodíku v Al-slitině [8]

1.3 Teoretický popis vzniku pórů

Existují dva mechanismy, které popisují vznik pórů. Jeden se nazývá homogenní nukleace a druhý heterogenní nukleace. Homogenní nukleace je brána za jakýsi ideální stav. Se současnými technologiemi, které jsou dostupné, ale není možná. Veškerý vznik zárodků (póry, pevná fáze kovů) probíhá jako heterogenní nukleace. To znamená, že každá oxidická nečistota zesiluje vznik vodíkových bublin. Podobná je představa o vzniku vodíkových pórů (u hliníkových

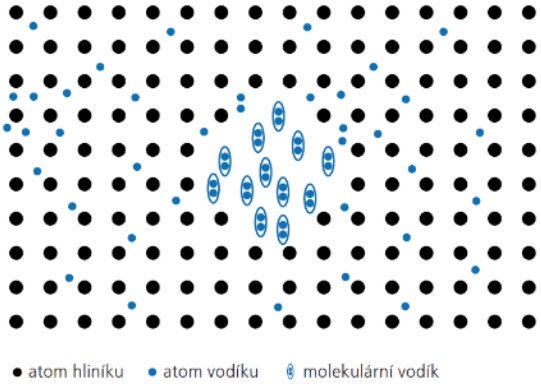
slitin) na rozhraní kapalné a tuhé fáze z důvodu malé rozpustnosti. Při tuhnutí Al slitiny dojde ke vzniku přesyceného roztoku a následkem toho je difundování vodíku do atomové mřížky hliníkové slitiny. Difuse je omezená teplotou. Čím rychleji slitina tuhne, tím méně vodíku stihne difundovat. Při dostatečně dlouhé difusi se může sloučit potřebné množství atomů vodíku a vytvořit molekulární vodík, vznikne bublina (homogenní tvorba pórů **obr. 1.7**) [6].

Sievertsův zákon

Jak už je uvedeno v **kap. 1.1**, rozpustnost vodíku ve slitině hliníku je funkce parciálního tlaku vodíku *p* v dutině, teploty kovu *T* a experimentálně získaných konstant K a G (R je universální plynová konstanta).

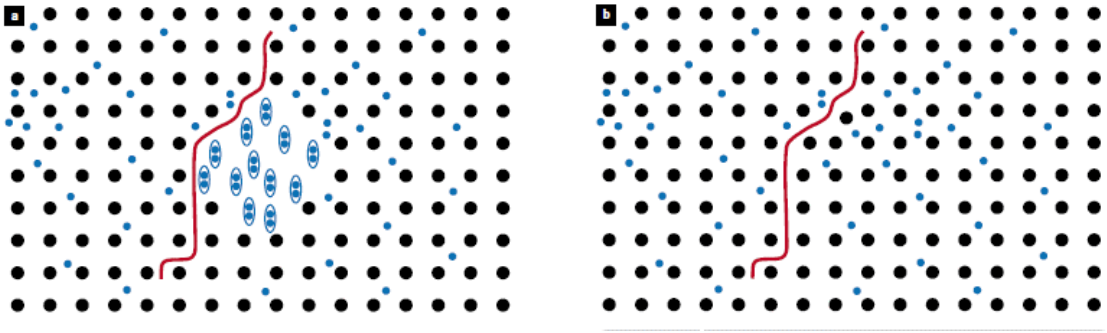
$$1 = K\sqrt{p}e^{-\frac{1\Delta G}{2RT}} \tag{5}$$

Konstanty v Sievertsově zákoně K a ΔG mají zásadně jiné hodnoty pro tuhý a kapalný kov. Když dojde k rychlému (skokovému) přechodu z kapalného do pevného stavu, rozpustnost se změní o dva desetinné řády. Molekulární vodík vytváří v dutině tlak (na rozdíl od atomárního H_2), který je s povrchovým napětím bubliny v rovnováze. Dutiny s malým poloměrem mají rovněž malý povrch a vytvářejí velké povrchové napětí. Za předpokladu, že je povrchové napětí příliš vysoké, by mohlo dojít ke zpětnému rozložení bubliny do atomové mřížky, kolaps bubliny (dutiny). V určitém momentu dosáhne kritický poloměr velikosti, při které už je tlak v dutině mnohem větší než povrchové napětí.



Obr. 1.7 Homogenní tvorba pórů v Al slitině [6]

Díky výzkumu W. Gruhla, X. G. Chena a W. Vogela byl zjištěn kritický rádius (θ) pro čistý hliník. Jeho hodnota je 0,32 nm při teplotě kovu 590°C a odpovídá seskupení cca 8 volných pozic (ve mřížce). Vodík je tedy schopen tvořit dutiny o velikosti několika průměrů atomů. Navíc dochází k difundování okolního vodíku směrem do dutiny a k jejímu zvětšení. Dutiny potřebné pro shromažďování vodíku budou vznikat vždy, protože jak kov tuhne, tak se smršťuje, a tím narušuje soudržnost krystalické mřížky. Smršťování (mechanické napětí) společně s dispozicemi mřížky (oxidické pleny, vměstky) vytváří příznivé prostředí pro tvorbu výše zmíněných bublin (heterogenní nukleace **obr. 1.8a**).



Obr. 1.8 a) Heterogenní vznik pórů na nanooxidickém filmu; vodík difunduje do dutiny, která se může vytvořit roztržením krystalové mřížky; b) při ideálním dosazování jsou nanooxidy vestavěny v krystalické mřížce [6]

Pokud jsou ve formě použity dosazovací elementy (např. nálitky), tak je pravděpodobnější, že vměstky (oxidické nečistoty, atd.) zůstanou zakomponovány v mřížce a nevytvoří dutiny, do kterých by vodík pronikal **obr. 1.8b**. Nicméně každá oxidická nečistota pomáhá k tvorbě heterogenních pórů.

1.3.1 Homogenní nukleace

Homogenní nukleace je termín označující děj, při kterém dochází k tvorbě tuhé fáze uvnitř fáze tekuté, a to bez pomoci jiných příměsí (jiných látek). Homogenní nukleace vyžaduje velké množství hnací energie kvůli relativně velkému podílu povrchové energie k celkové Gibbsově energii u velmi malých částic. Vylučování tuhých částic může být způsobeno buď konstitučním podchlazením nebo přidáním/přítomností dalších částic (nečistot) [1].

S technologiemi, které v současné době existují, není možné homogenní nukleace dosáhnout, a proto se všechno tvoří nukleací heterogenní.

1.3.2 Heterogenní nukleace

Smáčivost je důležitá pro kontakt mezi fázemi při přenosu hmoty, filtraci, pro popis vzniku zárodků a tuhnutí. Při heterogenní nukleaci je energie pro tvorbu bublin funkcí úhlu smáčení (θ) [1].

Podle Fishera se bubliny tvoří ze zárodků, které jdou proti povrchu pevné fáze. Úhel smáčení θ se tvoří mezi taveninou a pevnou fází. Tento kontaktní úhel definuje rozsah smáčení [1; 9]:

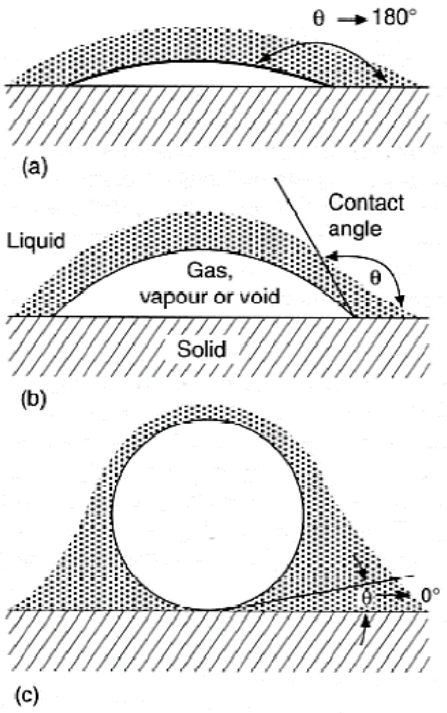
θ = 0° úplně smáčivý

θ = 180° úplně nesmáčivý

θ < 65° dobrá smáčivost – karbidy, boridy, nitridy

θ > 65° špatná smáčivost – oxidy

Na **obr. 1.9** je zobrazena geometrie smáčecích úhlů při různých situacích. Pro nukleaci pórů je zapotřebí obrácený úhel než pro nukleaci taveniny.



Obr. 1.9 Geometrie bubliny při kontaktu s pevnou a tekutou fází: (a) nízká smáčivost a jednoduché rozpojení taveniny s pevnou fází; (b) střední smáčivost; (c) dobrá smáčivost, při vysoké kohezi[6] taveniny k pevné fázi, a proto je bublina posunutá tak, že je ve větším kontaktu s taveninou než s pevnou fází [1]

Fisher popisuje heterogenní nukleaci následujícími vzorci [1; 9]:

$$\Delta G = \gamma A V (Pe - Pi) \tag{6}$$

$$\Delta G = \gamma 4\pi r^2 + \frac{4}{3}\pi r^3 (Pe - Pi) \tag{7}$$

$$r_{krit} = -\frac{2\gamma}{\Delta p_{krit}} \sim 2 \text{ atomy} \tag{8}$$

$$\frac{p^*_{het}}{p^*_{hom}} = 1{,}12 \left[\frac{(2 - \cos\Theta)(1 + \cos\Theta)^2}{4}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{9}$$

ΔG – Gibbsova energie

A – plocha koule

V – objem koule

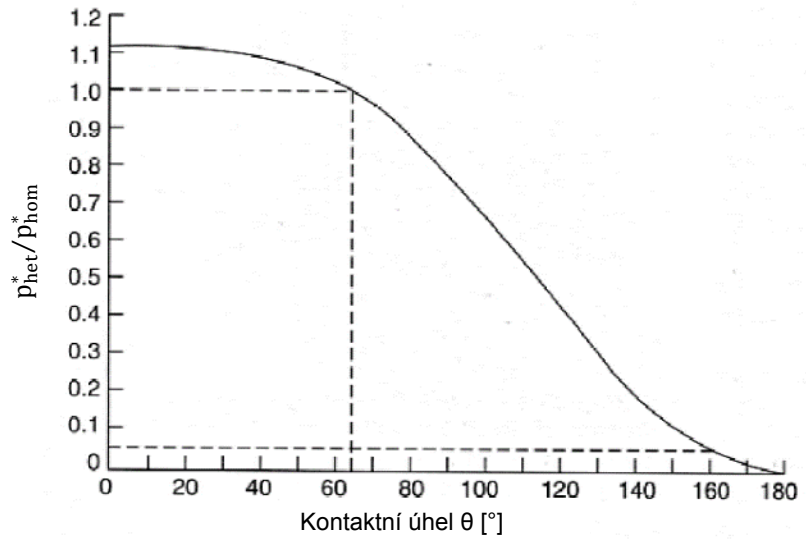
[6]fyzikální síla držící pohromadě atomy či molekuly téže látky či tělesa (zejména kapalného a pevného)

Pe – tlak okolo koule

Pi - tlak uvnitř koule

Na **obr. 1.10** je vidět, že nukleace na povrchu pevné fáze nemůže začít, dokud kontaktní úhel nedosáhne hodnoty 60-70°. Díky tomu dochází k potlačení (utlumení) nukleace pórů, které jdou proti směru rostoucí pevné fáze (dendritům). Tento poměr je v rozporu s jinými teoriemi, které podporují tvorbu zárodku (pro vznik póru) v blízkosti vedoucí fáze. Hlavní faktory zahrnující vysoký obsah plynů a malé povrchové napětí obvykle doprovází vysoká segregace taveniny [1].

Např. kombinace tuhá-kapalná fáze u Al a Al_2O_3 má úhel smáčení v rozmezí 115° a 167° při teplotě 704-927 °C. Campbell spočítal tlak potřebný pro heterogenní nukleaci u slitiny A356. Výsledná hodnota byla spočítána okolo 1500 atmosfér (152 MPa, 1520 bar). Můžeme tedy říct, že tlak pro heterogenní nukleaci je mnohem menší než tlak pro nukleaci homogenní, nicméně stále vysoký.



Obr. 1.10 Poměr mezi kontaktním úhlem a změnou pevné fáze (ze smáčivé na nesmáčivou) při nukleaci pórů, jakmile se překročí úhel cca 65° začne na pevné fázi heterogenní nukleace [9]

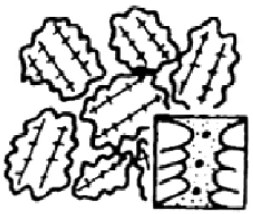
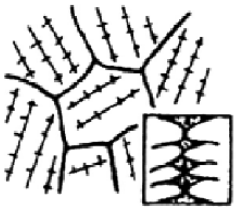
1.4 Faktory ovlivňující množství pórů v odlitku

Tvorba bublin je velice komplexní mechanismus zahrnující spoustu faktorů: interval tuhnutí, chemické složení, rychlost ochlazování, objemové smrštění, kvalita taveniny, odvod tepla, atd.

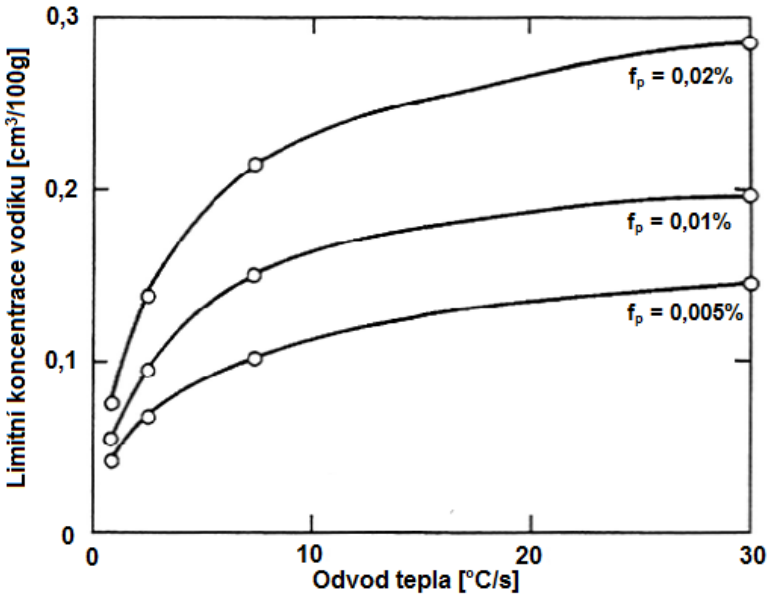
1.4.1 Obsah vodíku a rychlost ochlazování

Při nízké počáteční koncentraci vodíku se póry tvoří později a jsou zpravidla malé. Pokud je ale počáteční koncentrace vysoká, dojde k tvorbě pórů již na začátku tuhnutí, čímž jsou póry mnohem větší. Určují se čtyři různé typy. Jejich vývoj a tvar (morfologie) jsou ukázány v **tabulka 1-3** [1].

Tabulka 1-3 Tvary čtyř různých druhů pórů [1].

	1) kulaté póry	2) dlouhé a širší póry	3) dlouhé a ostrohranné trhliny	4) krátké a ostrohranné trhliny
Tvorba bubliny při tuhnutí slitiny				
Tvary pórů v tuhé struktuře				

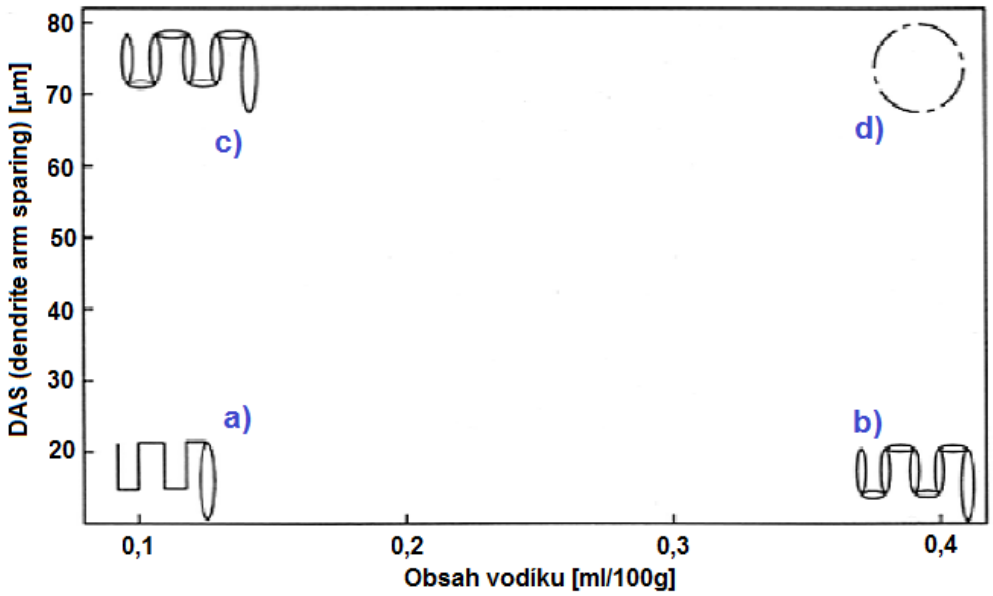
Rychlejší tuhnutí slitiny zkracuje čas pro difuzi vodíku do míst s oxidickou plenou (a jiných strukturních nedokonalostí) a díky tomu se snižuje pórovitost (vodík se nestačí vyloučit a zůstane rozpuštěn v primární fázi) **obr. 1.11**. Bylo zjištěno, že očkované slitiny v porovnání se slitinou neočkovanou tvoří menší póry [1; 4].



Obr. 1.11 Poměr mezi koncentrací vodíku, odvodem tepla a porezitou (f_p) [1]

Při nízkém obsahu plynu a krátké době tuhnutí zůstanou oxidické pleny složené a pórovitost je minimální. Čím se čas prodlužuje, začnou se oxidické pleny „otevírat“ a pórovitost se zvýší. Když je koncentrace vysoká a čas tuhnutí dlouhý,

tvoří se velká porezita při nízké hustotě pórů. Toto tvrzení vysvětluje, proč odlitek bez porezity nutně neznamená, že je současně i bez oxidických plen **obr. 1.12** [4].



Obr. 1.12 Interpretace modelu tvorby oxidických blan [4]

a) **Rychlé tuhnutí a nízký obsah vodíku** – převážně uzavřená a zakřivená oxidická plena

b) **Rychlé tuhnutí a vysoký obsah vodíku** – částečně otevřená a zakřivená oxidická plena

c) **Pomalé tuhnutí a nízký obsah vodíku** – částečně otevřená a zakřivená oxidická plena

d) **Pomalé tuhnutí a vysoký obsah vodíku** – úplně roztažená oxidická plena

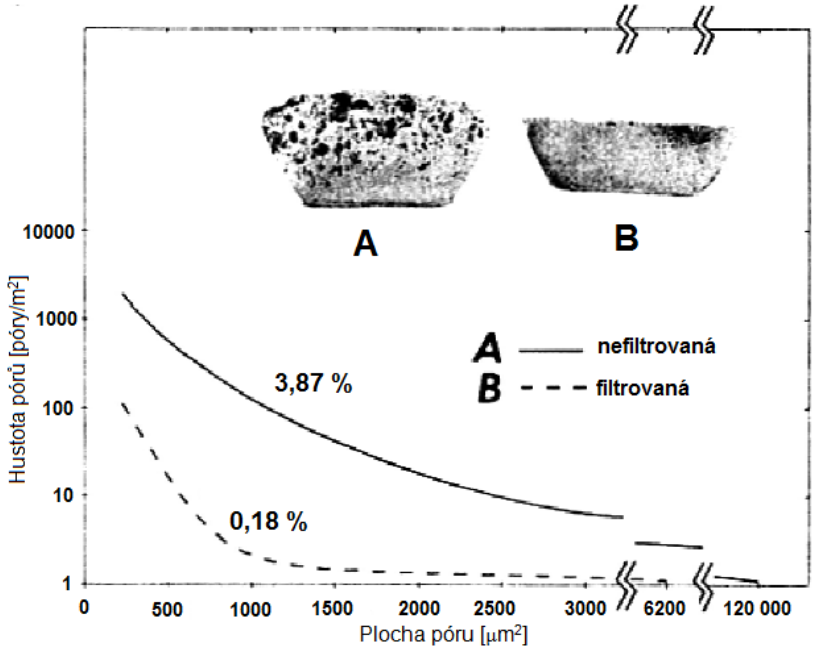
1.4.2 Čistota kovu

Komerčně odlévané slitiny hliníku obsahují širokou škálu vměstků v malých množstvích. Množství těchto nečistot je jedním z hlavních faktorů, které mají vliv na kvalitu taveniny. A to kvůli tomu, že nesmáčivý povrch tvoří iniciační místo pro vylučování vodíku a růst pórů. Nejčastější vměstky, které se v hliníkových slitinách objevují, jsou [1]:

- oxid hlinitý (Al_2O_3),
- karbid hliníku (Al_4C_3),
- oxid hořečnatý (MgO),
- spinel ($MgAl_2O_4$),
- diborid titanu (TiB_2),
- borid hliníku (AlB),
- titan aluminid ($TiAl_3$).

Protože jsou výše uvedené vměstky nežádoucí, měla by proběhnout filtrace. Některé technologie lití, ale tuto možnost neumožňují (vysokotlaké lití), a proto se musí dbát na čistotu kovu už před samotným odléváním.

Experiment z publikace [1] jasně ukazuje rozdíl velikosti a hustotu pórů filtrované a nefiltrované slitiny A356 **obr. 1.13**.



Obr. 1.13 Rozdíl kvality mezi filtrovanou a nefiltrovanou slitinou A356 [1]

1.4.3 Modifikace

Modifikátory mají velice důležitý vliv na změnu tvaru křemíku u eutektických a nadeutektických slitin. Změna tvaru zvyšuje tažnost a pevnost v tahu slévárenských slitin Al-Si. Některé modifikátory pohlcují vzdušnou vlhkost a po roztavení mohou zvýšit množství vodíku v tavenině.

Shahani zjistil, že přidáním stroncia (Sr) nebo sodíku (Na) se ve skutečnosti snižuje obsah plynu, ale současně se zvyšuje pórovitost modifikovaného odlitku. Dále uvádí, že modifikátory podporují vznik pórovitost tím, že usnadňující nukleaci pórů snížením povrchového napětí a působí jako zárodky [1].

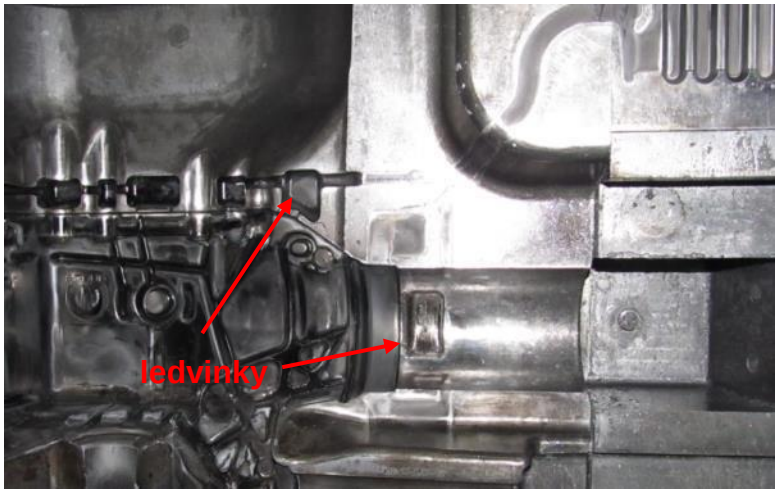
Argoa Gruzleski provedli kontrolní studii o pórovitosti modifikované a nemodifikované slitiny A356. Použili Tatur test, pomocí kterého zkoumali rozdíly v rozložení pórovitosti a smršťování. Jejich výsledky ukázaly, že modifikace vede k přerozdělení pórovitosti při tuhnutí [1].

Argo, Gruzleski a Fang zjistili, že mikropóry u modifikovaných slitin jsou větší. Eutektikum u nemodifikovaných slitin vykazuje nepravidelné rozhraní mezi tuhou fází a kapalinou. Díky tomu se na fázovém rozhraní tvoří malé póry, které zůstávají v tuhé fázi a tvoří mikroporezitu. U modifikované slitiny je tento efekt ještě větší, a proto mají větší sklon ke vzniku porezity [1].

1.4.4 Konstrukce formy

Špatně navržená nebo nesprávně fungující forma může rovněž zvýšit porezitu odlitku. Avšak jedná se o porezitu, která nevzniká kvůli špatné kvalitě taveniny, ale kvůli vzduchu uzavřenému ve formě. Dutiny kovových forem používaných pro vysokotlaké lití hliníku jsou vždy plné vzduchu, zplodin (vznikají hořením mazadel formy a pístu) a páry (vzniká po ostřiku formy). Aby tyto plyny nezůstávali v odlitku ve formě porezity, vyvinulo se několik technologických a konstrukčních úprav na formě a licím stroji. V technologii vysokotlakého lití hliníku existují tyto způsoby:

a) **Odvzdušnění pomocí přetoků (ledvinka)** – nejstarší a nejjednodušší způsob odvzdušnění formy. V podstatě se jedná o malé dutiny ve tvaru „ledvinky“, do kterých je vytlačen vzduch (proudem kovu).



Obr. 1.14 Nepohyblivá část formy s ledvinkami

b) **Valcha (vlnovec)** – jedná se o odvzdušňovací vložku, která je umístěna ve formě. Valcha je vyústěním kanálků vedoucích z hlavní dutiny formy. Vyrábí se z materiálů, které dobře odvádějí teplo jako např. slitina Cu-Be a zároveň je chlazená vodou (zvyšuje odvod tepla).

Obr. 1.15 Valcha [10]

c) **Odsávaná valcha** – jde o vlnovec napojený na vakuační zařízení, které velice rychle odsává vzduch z formy během licího cyklu. Tento systém je mnohem účinnější než samotná valcha nebo tzv. ledvinky.

Obr. 1.16 Odsávaná valcha od firmy Fondarex [11]

d) Vakuační ventil – nejúčinnější způsob odvzdušnění formy. Používá se při výrobě odlitků, u kterých je požadovaná vysoká kvalita vnitřní struktury. Tyto ventily mají složitější konstrukci, která zabraňuje vniknutí tekutého kovu až dovnitř a k následnému ucpání.

Obr. 1.17 Vakuační ventily od firmy Fondarex [12]

Obr. 1.18 Ukázka umístění vakuačního ventilu na formě společně s celou odvzdušňovací soustavou (modře zbarvená) [11]

2. STAŽENINY A BUBLINY

Staženiny a bubliny jsou nejčastější vady vyskytující se ve všech typech slitin a jsou hlavním důvodem reklamace. V některých případech není zcela možné určit původ dutiny. Může se jednat o objemové smrštění nebo přítomnost plynu. Většinou jde o kombinaci obou faktorů. Nicméně existuje několik případů, kdy je možné původ vady rozlišit. Hlavní rozdíl mezi staženinou a bublinou je ve způsobu vzniku. Staženiny vznikají objemovým smrštěním a bubliny vznikají z plynů. Dále se liší tvarem. Staženiny jsou nepravidelného tvaru s ostrými hranami a viditelnými dendrity, kdežto bubliny mají lesklý hladký povrch a kulatý tvar. Existují různé způsoby jak tyto vady najít (vizuálně, RTG, CT, atd.).

Podle velikosti se dělí na:

Makroskopické (>100 μm) – častěji u slitin s krátkým intervalem tuhnutí nebo u čistých kovů. Jedná se o velké póry a staženiny vytvořené v místech s větším objemem kovu.

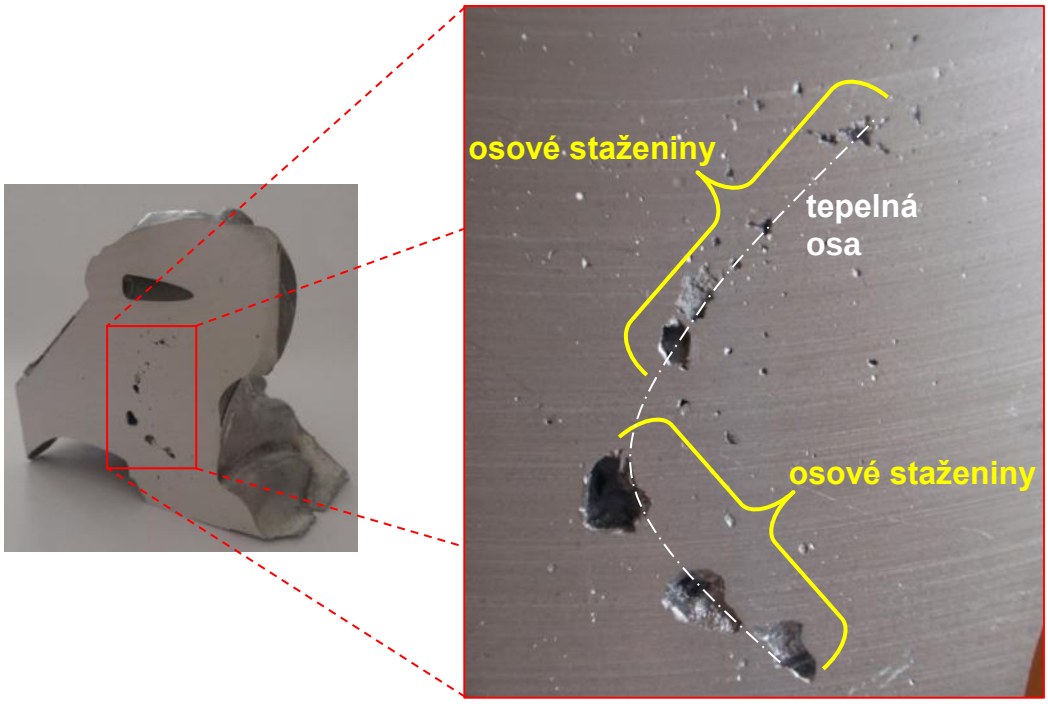
Mikroskopické (<100 μm) – mikroskopické vady jsou velice malé, okem skoro neviditelné a vznikají u slitin s širokým intervalem tuhnutí. Zůstávají „uvězněné“ v místech, kde tuhne poslední kov. Mikroporezita je značně rozptýlená a má kulatý tvar (není to pravidlem).

Podle původu vzniku se dělí na:

Staženiny (440[7]) – jsou to vnitřní vady s hrubým kovově šedým povrchem. Vznikají při tuhnutí slitiny v důsledku objemového smrštěním v tepelné ose **obr. 2.1**. Nejčastěji vznikají v tlustostěnných místech odlitku nebo v místech s posledním tuhnutím. Dělí se na několika druhů (zde jsou popsány jen dva):

1) **otevřené staženiny (441[8])** – jsou vnější otevřené dutiny zasahující do určité hloubky v odlitku **obr. 2.2**. Vznikají nedostatečným objemovým doplněním taveniny v době tuhnutí v místech tepelného uzlu. Vznik této vady je důsledkem několika jevů:
    - příliš vysoká licí teplota,
    - špatné ošetřený nálitek,
    - nedolití nálitku,
    - nedostatečný objem nálitku.

[7] pořadové číslo skupiny vady
[8] pořadové číslo druhu vady



Obr. 2.1 Osové staženiny vytvořené v tepelné ose

Obr. 2.2 Otevřená staženina

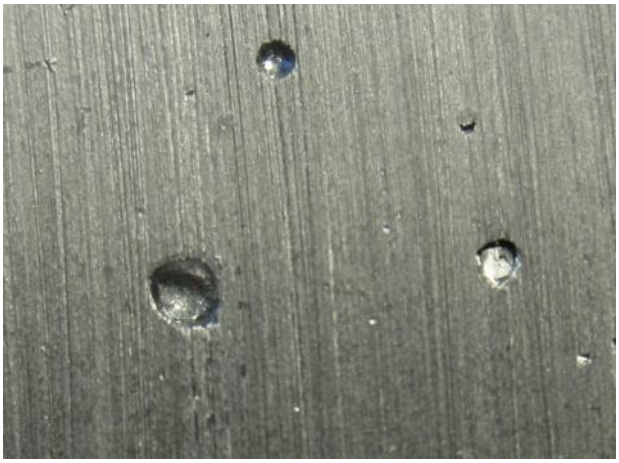
2) **uzavřené staženiny (442)** – vnitřní uzavřené dutiny **obr. 2.3** vznikají v tepelných uzlech, u odlitků s větším objemem materiálu na jednom místě. Příčiny vzniku mohou být například:

- špatná konstrukce formy (nevhodné zaústění vtokové soustavy),
- nevhodný tvar odlitku (silné stěny namísto tenkých žeber),
- nevhodně zvolený druh chladítka (týká se odlitků z oceli a litiny).

Obr. 2.3 Uzavřená staženina

Bubliny (410) – bubliny jsou vady kulatého tvaru vytvořené uzavřeným plynem. Jsou vytvořeny buď plynem, vzduchem nebo kombinací. Dále se dělí na:

1) **endogenní** – vznikající v tavenině z rozpuštěných plynů. Jedná se o bubliny způsobené kyslíkem (411), vodíkem (412) a dusíkem (413). Mají kovově lesklý a neoxidovaný povrch **obr. 2.4**. Pro slévárny hliníku jsou nejdůležitější bubliny způsobené vodíkem. Vytvářejí se při tuhnutí slitiny následkem přesycení taveniny rozpuštěným vodíkem, viz **kap. 1.3**.



Obr. 2.4 Bubliny

2) **exogenní** – zahlcený plyn (414), jde o porezitu vytvořenou vzduchem, který zůstal uzavřen v plnící komoře a dutině formy. Tyto bubliny jsou většinou velice malé a mají hladký, lesklý povrch. Vznikají při plnění formy z plynů, které nestihnou nebo nemohou opustit formu a po ztuhnutí zůstanou v odlitku. Proto je nesmírně důležité správně navrhnout vtokovou soustavu a to tak, aby se přetoky a výfuky (do vlnovce/valchy) plnily jako poslední (kov tam musí vytlačit vzduch, který je ve formě). Pro návrh složitějších forem je vhodné využít simulační programy.

2.1 Eliminace

K eliminaci vzniku porezity a staženin se používají různá zařízení a postupy. Každá technologie lití má svá specifika. Následující doporučení (prevence vzniku) se týkají tlakového lití do kovových forem.

Staženiny:

- správná konstrukce formy (hodně tenkých žeber místo tlustých stěn)
- řízené ochlazovaní problematických míst (např. Jet-Cooling)
- teplota formy (180-250 °C)
- teplota taveniny (640-770 °C podle druhu slitiny)

Bubliny:

- konstrukce formy (nejprve se musí naplnit dutina a pak ledvinky a vlnovec)
- použití částečné/úplné vakuace formy (odvzdušnění)
- odplyněná tavenina (nízký obsah H_2)
- vyčištěná (rafinace) tavenina (bez vměstků)
- přiměřené mazání a chlazení formy (nesmí na ní být velké množství vody a lubrikantu)
- přiměřené mazání licího pístu (licí komory)
- správné licí parametry (rychlost plnění, doba dotlaku, atd.)
- teplota formy (180-250 °C)
- teplota taveniny (640-770 °C záleží na druhu slitiny)
- použití dávkovací pece namísto litinové/keramické naběračky
- řízené ochlazovaní problematických míst (např. Jet-Cooling viz **kap. 7.1**)

3. ODPLYŇOVÁNÍ SLITIN HLINÍKU

Jedná se o úpravu taveniny, díky které je možné snížit obsah vodíku v roztavené slitině hliníku na takovou koncentraci, při které nedochází k vylučování bublin. Technologie lití a budoucí aplikace odlitku rozhodují o limitních hodnotách obsahu H_2. Aby se zabránilo vylučování bublin je potřeba snížit obsah H_2 na hodnoty pod 0,2 cm^3/100 g Al. Větší požadavky na čistotu taveniny jsou kladeny u slitin litých do písku (pomalý odvod tepla) a nižší nároky jsou u slitin litých do kovových forem (rychlé chladnutí).

Další proces, který se na některých zařízeních provádí společně s odplyněním, je rafinace taveniny. Jedná se o úpravu, která využívá rafinační soli ke snížení obsahu kovového hliníku ve strusce **obr. 3.1**, odstraňuje vměstky a následně je váže do strusky plovoucí na hladině **obr. 3.2** (tzv. „suchá struska“). Rafinační soli jsou směsi chloridových a fluoridových solí, plus dalších aktivních sloučenin. Tento proces je nedílnou součástí každé slévárny hliníku, protože zvyšuje množství využité taveniny a snižuje množství odpadu, který se znovu přetavuje v hutích.

Obr. 3.1 Struska, která vznikla natavením hliníkových housek a vratu v plynové peci, obsahuje velké množství kovového hliníku

Obr. 3.2 Suchá struska vytvořená po odplynění a rafinaci (nízký obsah Al a vysoký obsah nečistot)

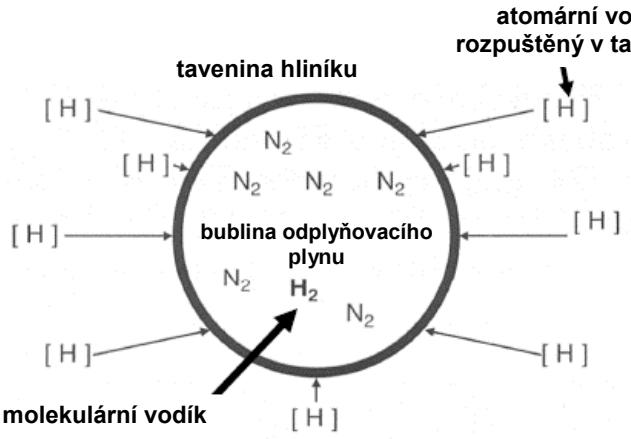
Technologie lití určuje, ve které části procesu lití bude provedeno odplynění a rafinace. Obě úpravy se musejí provádět ještě před očkováním a modifikací, protože by se vyrušil vliv očkovadla a modifikátoru. V tlakovém lití se očkování a modifikace (až na výjimky) neprovádí, a proto je možné odplyňovat a rafinovat těsně před litím.

Slévárny mohou používat tři různé fyzikální způsoby odplynění taveniny: probublávání pomocí Ar/N_2, vakuování a ultrazvuk (laboratorně). Nejpoužívanější je probublávání pomocí Ar/N_2.

3.1 Probublávání pomocí plynů

Odplyňování pomocí inertních a aktivních plynů snižuje koncentraci H_2 v tavenině z důvodu difuze. Difuze je způsobena rozdílem parciálních tlaků v bublině odplyňovacího plynu a okolí, ve kterém je vodík (**obr. 3.3** a rovnice (10)). Otáčivý pohyb rotoru napomáhá k lepšímu promíchání, vyčištění taveniny a celkovému zkrácení odplyňovacího cyklu. Hlavy rotoru jsou konstruovány tak, aby vytvářeli velmi malé bublinky, které se lépe rozprostřou po celém objemu pánve a mají velkou odplyňovací účinnost **obr. 3.5**.

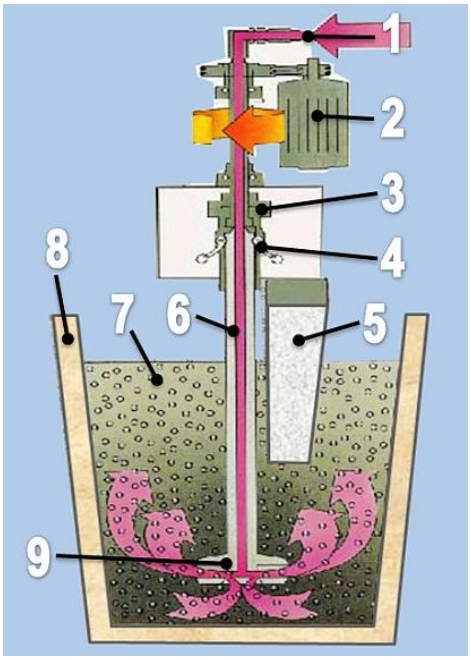
$$[H]_{Al} = \frac{1}{2}\{H_2\}_p \tag{10}$$



Obr. 3.3 Difuze vodíku z taveniny do bubliny dusíku [9]

Na **obr. 3.4** je zobrazen princip fungování odplyňovacího stroje:

1. odplyňovací plyn (Ar 5.0, N_2 5.0, N_2 4.6),
2. motor,
3. příruba mezi dutým hnacím hřídelem a hřídelem rotoru,
4. rychlospojka,
5. nárazová deska (zabraňuje víření hladiny),
6. grafitový rotor,
7. hliníková tavenina,
8. pánev,
9. grafitová hlava rotoru.



Obr. 3.4 Princip fungování rotačního odplyňovacího zařízení (na obrázku chybí přívodní trubice rafinační soli) [13]

Obr. 3.5 Ukázka víru bublin, vytvořených rotační hlavou [13]

Důležité parametry pro nastavení odplyňovacího zařízení:

- velikost a tvar pánve (kelímku),
- hloubka ponoru (vzdálenost mezi rotorem a dnem kelímku),
- pozice rotoru a rychlost rotoru,
- délka odplyňovacího cyklu,
- velikost hlavy rotoru (volí se podle velikosti pánve),
- průtok odplyňovacího plynu.

K vyčištění 600 kg hliníkové slitiny je potřeba nastavit odplyňovací stroj na tyto hodnoty [13]:

- rychlost rotoru: 400-500 otáček/min,
- délka cyklu: 3-5 min,
- průtok plynu: 10-20l/min (Ar nebo N_2).

4. NAPLYŇOVÁNÍ SLITIN HLINÍKU

Během tuhnutí slitiny ve formě dochází ke změně objemu a následnému smrštění slitiny. Vzniká jakási závislost mezi naplyněním a stahováním. Taveniny s vyšším obsahem rozpuštěných plynů (převážně H_2) vyličují tyto plyny ve formě bublin, které zůstávají ve ztuhlé struktuře odlitku. V některých případech mohou tyto bubliny kompenzovat efekt smrštění kovu, a proto je možné snížit požadavky na nálitkování (u určitých slitin splňujících limit pro obsah plynových bublin). Takto naplyněné slitiny mohou být použity u složitých odlitků, které mají přechody mezi tlustými a tenkými stěnami (obtížně by se nálitkovaly, např. kola automobilů) [2].

Tento efekt nefunguje u slitin, které jsou vysoce odplyněné a současně velice čisté. Pro hluboce odplyněné taveniny existují různé úpravy, které v ideálním případě zabraňují vzniku staženin a bublin.

1. **Naplyňovací tablety – např. Probat-Fluss BEGASER T 200**
2. **Záměrné vnášení zárodků – např. Probat-Fluss MIKRO 100**
3. **Naplyňovací plyny – např. formovací plyn 35 % H_2 v Ar**

Výše uvedené způsoby zpracování slitiny hliníku jsou určené převážně pro technologie lití do písku, gravitační kokilové lití a nízkotlaké lití.

Ad 1. Naplyňovací tablety

Umisťují se na hladinu taveniny a pomocí ponorného zvonu musejí být dobře zapracovany do celého objemu vany/pánve. Tablety se musejí vmíchávat do taveniny po celou dobu reakce. Přebytek tablet vyplouvá na hladinu (tzv. šum) a stáhne se struskou. Tablety se v tavenině rozpouštějí, tím uvolňují vodík, který během tuhnutí tvoří bubliny. Tyto bubliny jsou uzavřené a navzájem nepropojené. Bubliny vytvořené tabletami zvyšují v daném místě objem, a tím zabraňují vzniku staženin [14].

Nicméně používání naplyňovacích tablet vyžaduje jistou zkušenost. Někdy může dojít k neúplnému rozpuštění. Nerozpuštěné částice pak tvoří nežádoucí vměstky, které mohou působit jako zárodky pro iniciaci vady. Dalším problémem může být nerovnoměrné zapracování do taveniny. Jsou popsány případy, kdy tableta ovlivnila modifikační účinek.

Ad 2. Záměrné vnášení zárodků

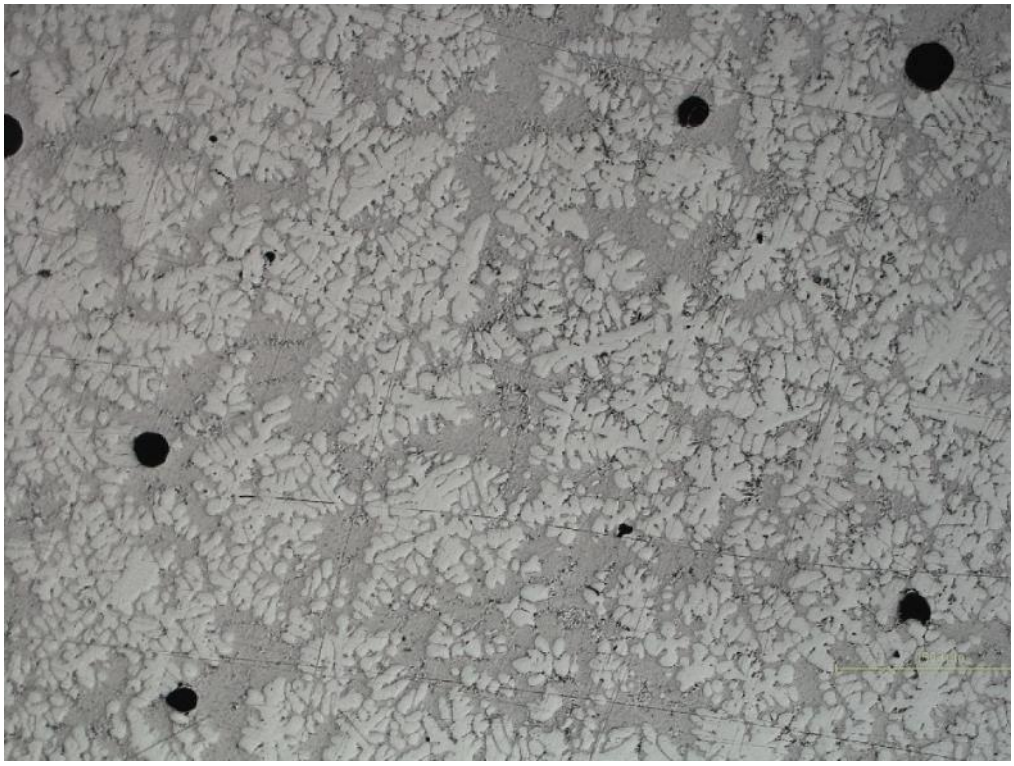
Jsou to druhy předslitin (např. MIKRO 100) napomáhající k prevenci vzniku staženiny díky homogennímu rozložení mikropórů. MIKRO 100 je tvořeno velkým množství krystalizačních zárodků, které se při tavení uvolní do taveniny. Tyto krystalizační částice fungují jako zárodky pro vyloučení vodíku během tuhnutí slitiny. Vodíkové bubliny vyloučené na těchto částicích jsou tak malé, že je není možné nalézt ani pomocí rentgenu. Avšak velikost těchto mikropórů záleží rovněž na rychlosti ochlazování a objemu kovu v dané části odlitku. Mikropóry nejsou navzájem propojené, a proto mají velice malý vliv na mechanické vlastnosti a nesnižují těsnost odlitku [14].

Ad 3. Naplyňovací plyny

Tyto plyny se aplikují pomocí rotačního odplyňovacího zařízení, které umožňuje jak odplynění tak naplynění. Nejdříve se provádí dlouhé odplyňování na vysokou čistotu taveniny (pomocí Ar 5.0 nebo N_2 5.0). Po skončení odplyňování se tavenina začne naplyňovat formovacím plynem (35 % H_2 v Ar). Naplyňovací cyklus kombinuje odplyňovací a formovací plyn v určitých poměrech. Celá úprava musí probíhat velice klidně, aby nedocházelo ke zbytečně velkému vlnění hladiny. Musí se tvořit jen jakýsi šum, který se stáhne se struskou.

V nízkotlakém lití hliníku se úspěšně používá tento postup:

1. tavení,
2. modifikace (Sr) + očkování (TiB_2),
3. dlouhé odplynění Ar 5.0 (průtok okolo 20 l/min) na velice vysokou čistotu taveniny (bez použití rafinační soli),
4. naplyňování: kombinace formovacího plynu 35 % H_2 v Ar (20 l/min) s plynem odplyňovacím Ar (8 l/min),
5. stažení strusky,
6. přelití do udržovací pece,
7. odlévání (výsledná struktura viz **obr. 4.1**).

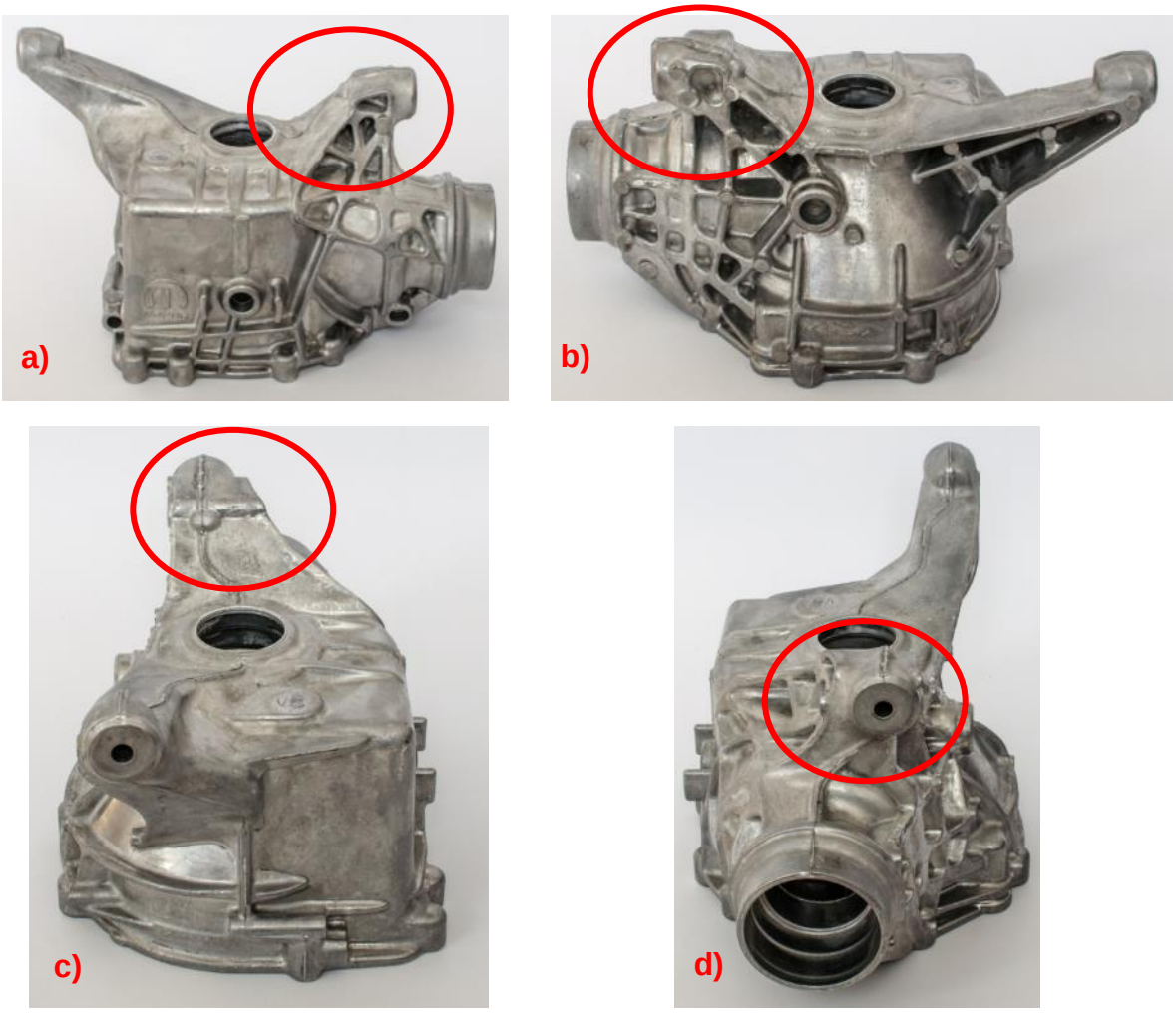


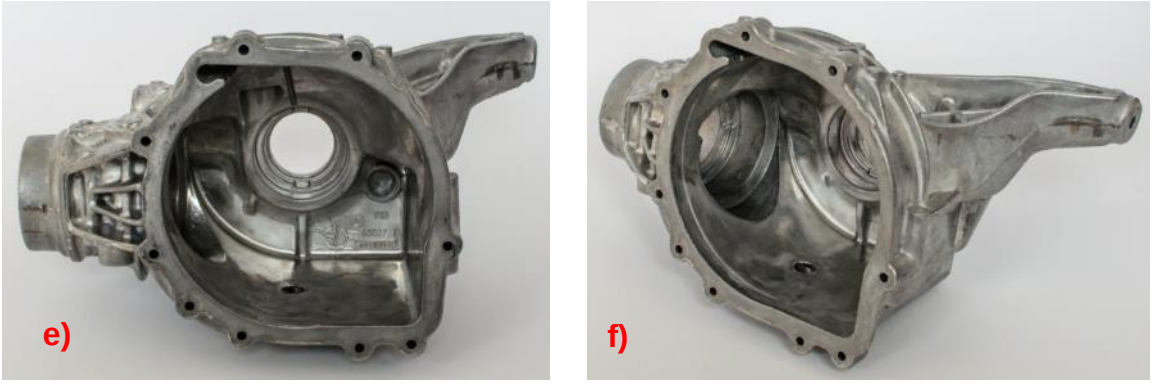
Obr. 4.1 Bubliny ve struktuře odlitku vyrobeného nízkotlakým lití z naplyněné slitiny AlSi7Mg0,3

5. PŘEDSTAVENÍ ZKOUMANÉHO ODLITKU

Součástí této diplomové práce je praktická část, která byla provedena ve spolupráci s významnou českou slévárnou Kovolis Hedvíkov (dále jen KH). KH je tlaková slévárna hliníkových slitin se zaměřením na automobilní průmysl. V roce 2013 začala firma KH vyrábět součásti rozvodových skříní pro velkého světového producenta, firmu GKN Driveline (dále jen GKN). Tento sortiment zahrnuje výrobky s firemním označením: V65824/00, V65825/00, V65826/00, V65827/00 a V65862. Jedná se o díly používané pro výrobu automobilů značek Fiat a pro pohon 4x4 ve vozidlech Land Rover. Odlitky pro zákazníka GKN jsou největší a nejtěžší kusy (cca 4kg až 6kg), které KH vyrábí. S výrobou takto velkých a materiálově objemných odlitků je spojená celá škála problémů. Od složitosti formy přes tuhnutí materiálu až po manipulaci s výrobkem.

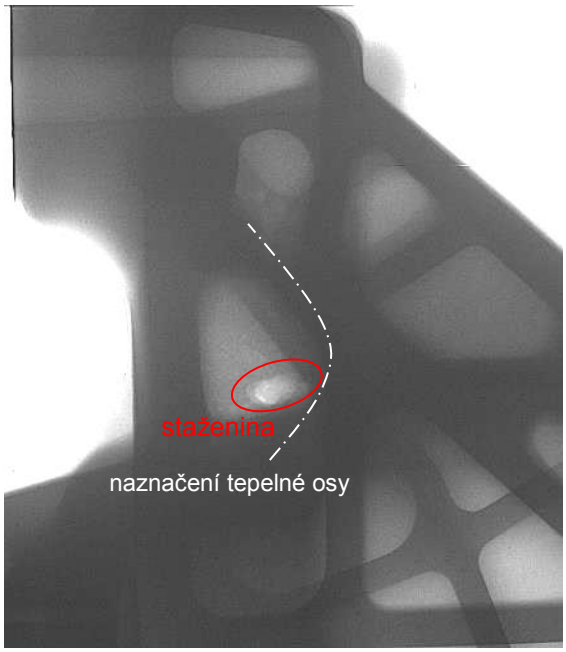
V praktické části (experimentu) této diplomové práce bude probrána možnost využití řízeného naplynění taveniny. Tato úprava slitiny by měla snížit výskyt vnitřních vad vznikajících v odlitku s označením 65827/00 **obr. 5.1** a vážícího přibližně 4kg.



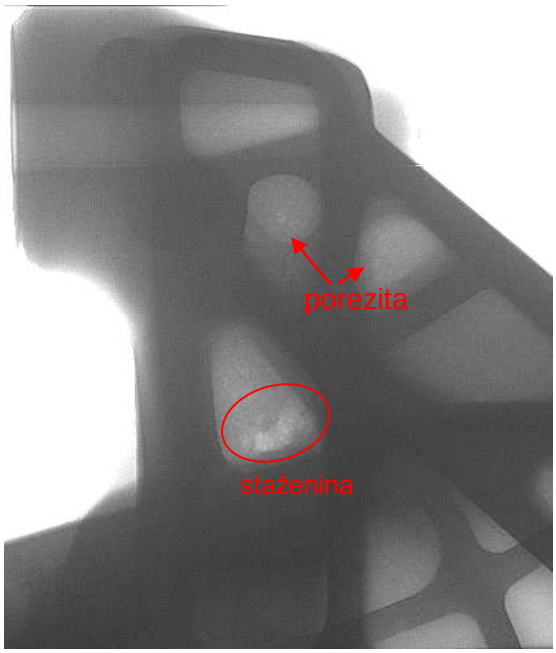


Obr. 5.1 Odlitek číslo 65827/00 s červeně vyznačeným místem vzniku vady na snímcích a), b), c), d)

Vady, které se v těchto odlitcích vyskytují, jsou nejčastěji osové staženiny v tepelné ose, bubliny a jejich kombinace. Pro ukázku slouží **obr. 5.2** a **obr. 5.3**.



Obr. 5.2 Rentgenový snímek odlitku č. 16, DI = 0,50 %, teplota lití = 687 °C



Obr. 5.3 Rentgenový snímek odlitku č. 18, DI = 0,50 %, teplota lití = 687 °C

Odlitek je vyráběn ze slitiny AlSi9Cu3 (EN AB-46000, ADC 12), která je tavena z nových housek a vratného materiálu v tavící peci StrikoWestofen MH II-T 3000/1500 **obr. 5.4**. Po natavení vsázky následuje úprava chemického složení (pokud je potřeba) a ohřátí na potřebnou teplotu (cca 713 °C).

Jakmile je dosaženo licí teploty a chemického složení, následuje přelití taveniny do transportní pánve **obr. 5.6**. V transportní pánvi je prováděno odplynění za pomoci rotačního odplyňovacího zařízení firmy Foseco **obr. 5.5**. Odplyněná slitina je odvezena k licímu zařízení a přelita do vanové udržovací pece MARCONI, kde při teplotě cca 680-700 °C „čeká“ na nabrání keramickou naběračkou **obr. 5.7**. Naběračka nalije taveninu do licí komory. V licí komoře se

pohybuje píst, který taveninu natlačí do uzavřené kovové formy. Pohyb pístu je řízen vysokotlakým licím strojem se studenou komorou TOSHIBA DC800 **obr. 5.8**.

Obr. 5.4 Tavící pec StrikoWestofen MH II-T 3000/1500

Obr. 5.5 Rotační odplyňovací zařízení Foseco, během provozu

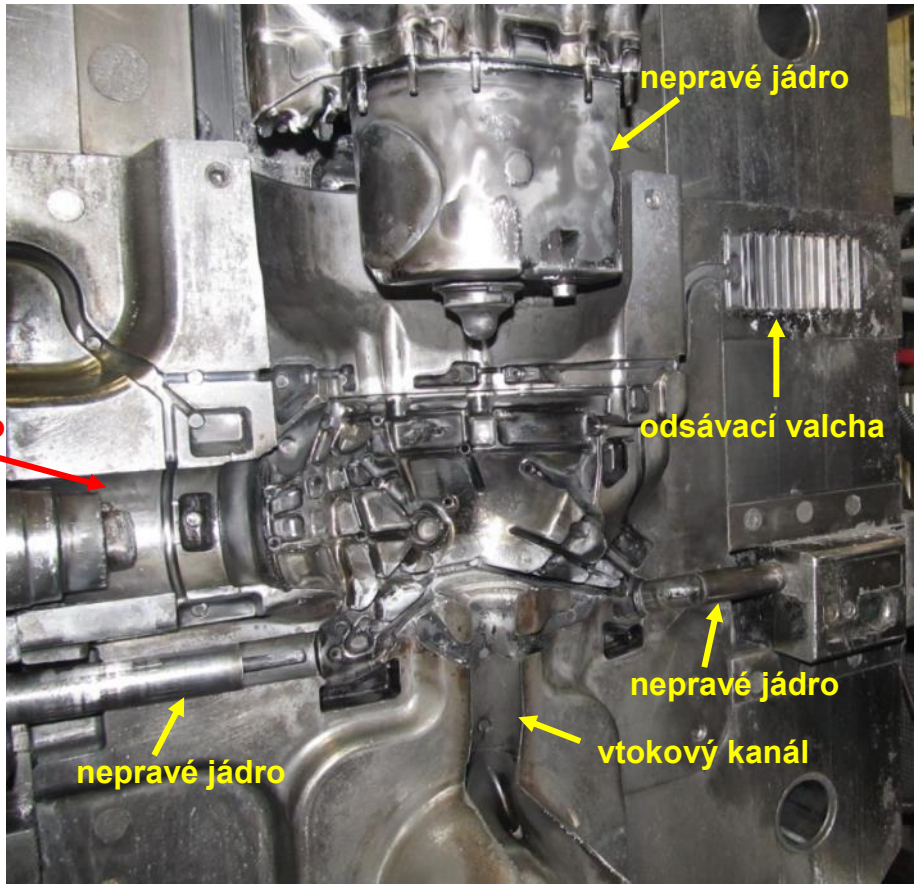
Obr. 5.6 Přelévání taveniny z pece do transportní pánve

Obr. 5.7 Keramická naběračka při nabírání roztavení slitiny

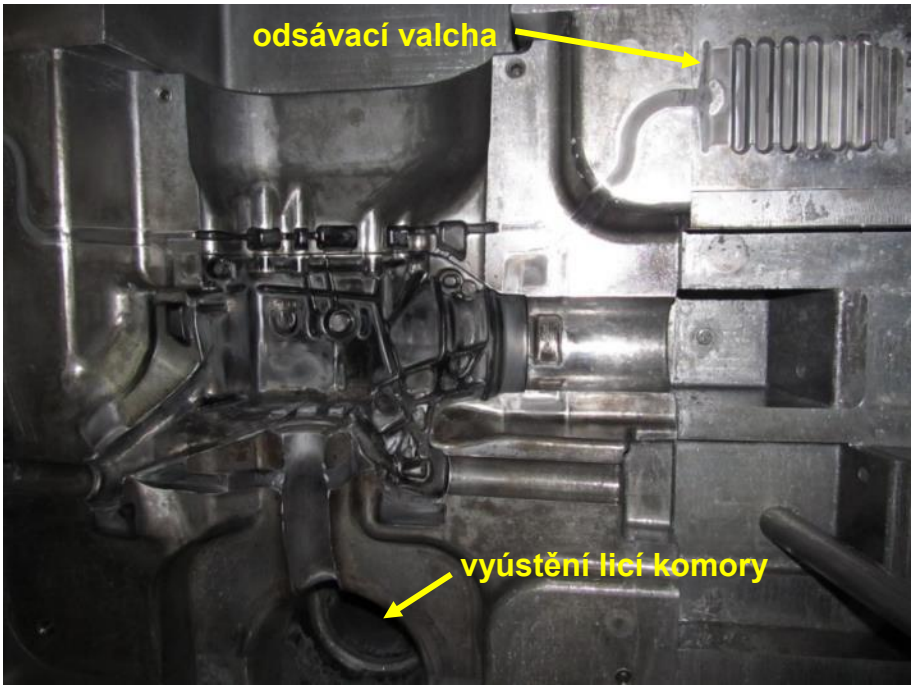
Obr. 5.8 Celá licí stanice: licí stroj TOSHIBA DC800 a vanová pec MARCONI

Odlitek je tvarově velice složitý. Má velkou vnitřní dutinu, a proto i forma **obr. 5.10**, **obr. 5.11**, do které je slitina odlévána, patří k nejsložitějším a váhově nejtěžším v KH. Dutina se vytváří za pomoci nepravého jádra umístěného na pohyblivé části formy a mazivem natřeného kovového zálitku **obr. 5.9** (do formy je zakládán operátorem).

Obr. 5.9 Kovový zálitek



Obr. 5.10 Horní (pohyblivá) část formy s nepravým jádrem



Obr. 5.11 Spodní (pevná) část formy

5.1 Predikce vzniku vady pomocí simulace

Každý odlitek je originál a o kvalitě rozhoduje velké množství faktorů. Na problémy způsobené při licím procesu nás mohou upozornit simulační programy jako např. ProCAST, MAGMA či FLOW-3D Cast. Tyto programy využívající metody konečných prvků k vytvoření simulace se snaží napodobit skutečné chování slitin při odlévání. Nicméně je to simulace, která může a nemusí odpovídat realitě. Avšak dnešní simulační programy jsou velmi dobrý nástroj usnadňující práci.

K vytvoření simulace tohoto odlitku byl použit software ProCast. S jeho pomocí byly získány simulace, které jasně ukazují na problémy vznikající při plnění formy a následné tuhnutí odlitku. Následující obrázky poukazují na možné nedostatky v konstrukci formy. Hlavní problém je způsob proudění slitiny ve formě. Návrhy na změnu viz **kap.** 8.

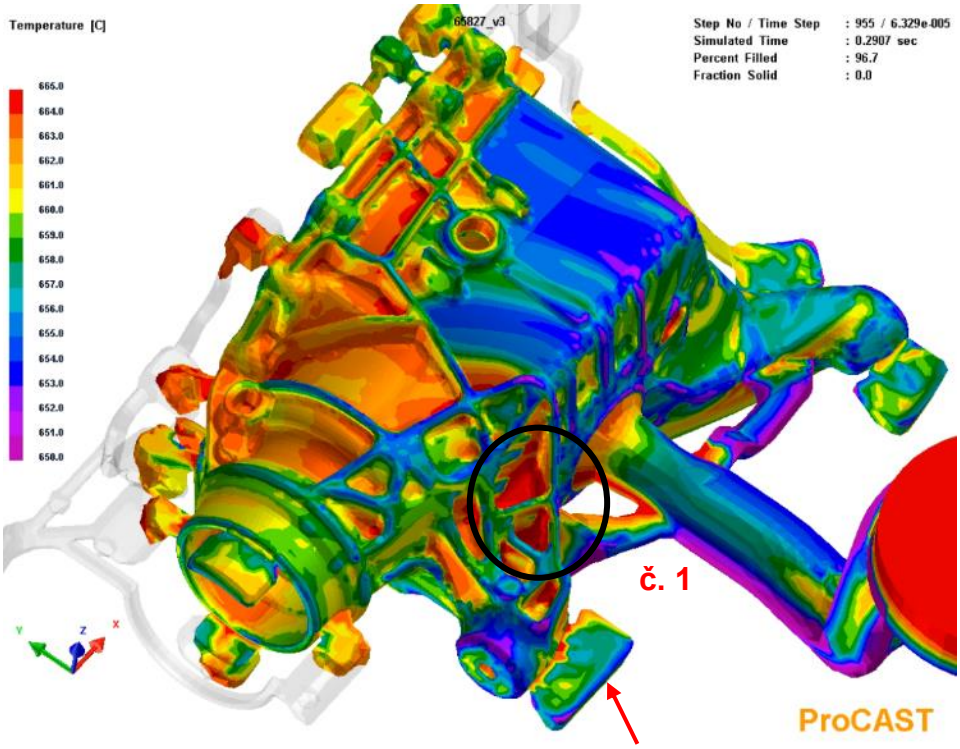
a) Teplota – díky naříznutí č. 1 dochází k proudění kovu o vysoké teplotě přímo přes tepelný uzel. Tento proudící kov prohřívá materiál formy (**obr. 5.12**) na vysoké teploty, a tím dojde ke zpomalení tuhnutí odlitku. Pomalé tuhnutí slitiny zapříčiní dostatečně dlouhou dobu na to, aby vodík rozpuštěný v kovu difundoval do již vzniklých plynových dutin. Výsledkem takto pomalého tuhnutí jsou vnitřní staženiny, bubliny a jejich kombinace. Možná by bylo vhodnější, kdyby se naříznutí č. 1 odstranilo, a tím se zabránilo tak velkému prohřátí formy (tepelného uzlu).

b) Tuhnutí – na obrázcích **obr. 5.13**, **obr. 5.14** a **obr. 5.15** je viditelné, že tuhnutí odlitku probíhá nerovnoměrně. V čase 7,863 s dochází k samovolnému tuhnutí odlitku, bez jakéhokoliv napojení na ledvinku, přetoky či vtokovou soustavu (zkracuje se účinek dotlaku). Ukazatel Niyama znázorňuje kritická místa, kde by mohlo dojít k vytvoření propadliny, hlavně velké rovné plochy a ledvinky (nejkritičtější místa jsou fialová, tedy jdoucí k nule) **obr. 5.22**.

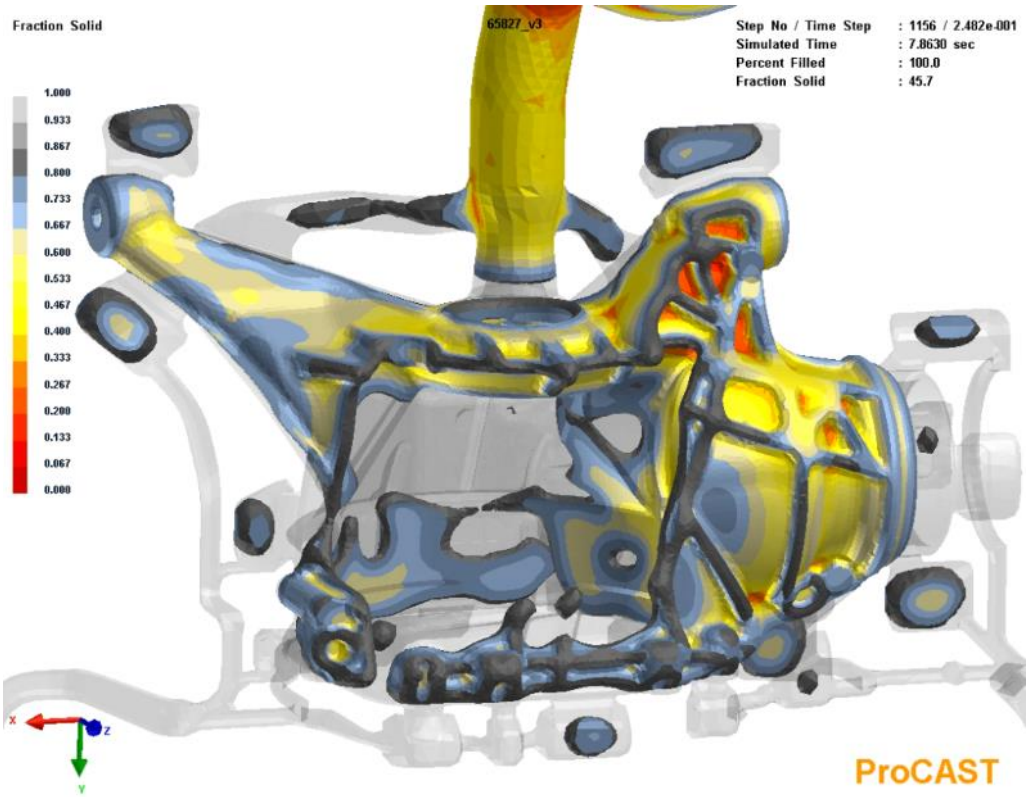
c) Staženiny/porezita – na **obr. 5.16**, **obr. 5.17** a **obr. 5.18** jsou oranžově vyobrazená místa, kde s největší pravděpodobností vzniknou staženiny a porezita. Na prvním z nich jsou staženiny/porezita pouze v ledvinkách (ledvinky plní svoji funkci). Další dva ukazují počátek a konec růstu staženiny/porezity ve zkoumané oblasti a zbytku odlitku.

d) Zahlcený vzduch – simulace „voids“ zobrazuje nezaplněná místa (modrá), kde je s největší pravděpodobností vzduch, který zůstal uzavřený v dutině formy. Na **obr. 5.19** je viditelné, že ve zkoumané oblasti vzniká místo, které se zaplní až potom, co většina části je už plná. Tím pádem nedochází k vytlačení vzduchu taveninou, ale k jeho uzavření.

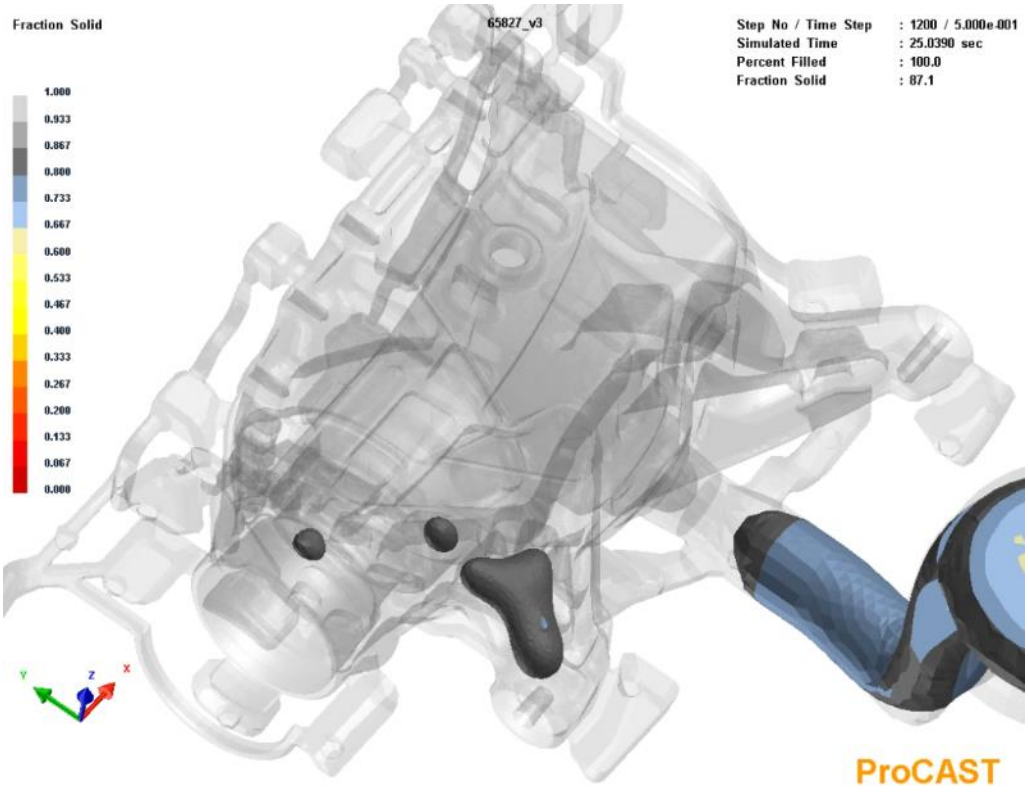
e) Plnění – na **obr. 5.20** je zobrazeno, jak jednotlivá naříznutí plní formu. Naříznutí č. 1 plní část zobrazenou červeně, č. 2 hlavní vtokový kanál plní světle modrou část a 3. naříznutí plní tmavě modrou část formy. Největší část formy plní hlavní vtokový kanál (naříznutí č. 2). Stejně jak u předchozích obrázků je vidět problém s plněním zkoumaného místa. Dochází k míchání taveniny z naříznutí č. 1 a naříznutí č. 2 (**obr. 5.12**).



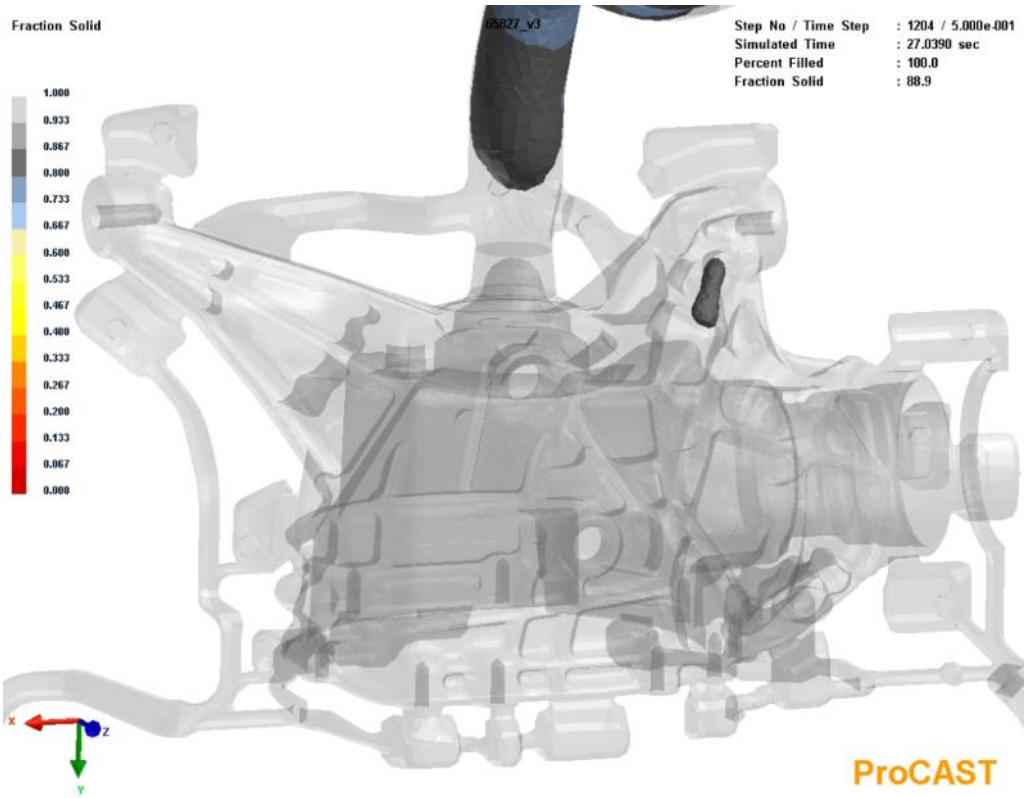
Obr. 5.12 Teplota odlitku při plném zaplnění dutiny s vyznačeným místem velkého prohřátí



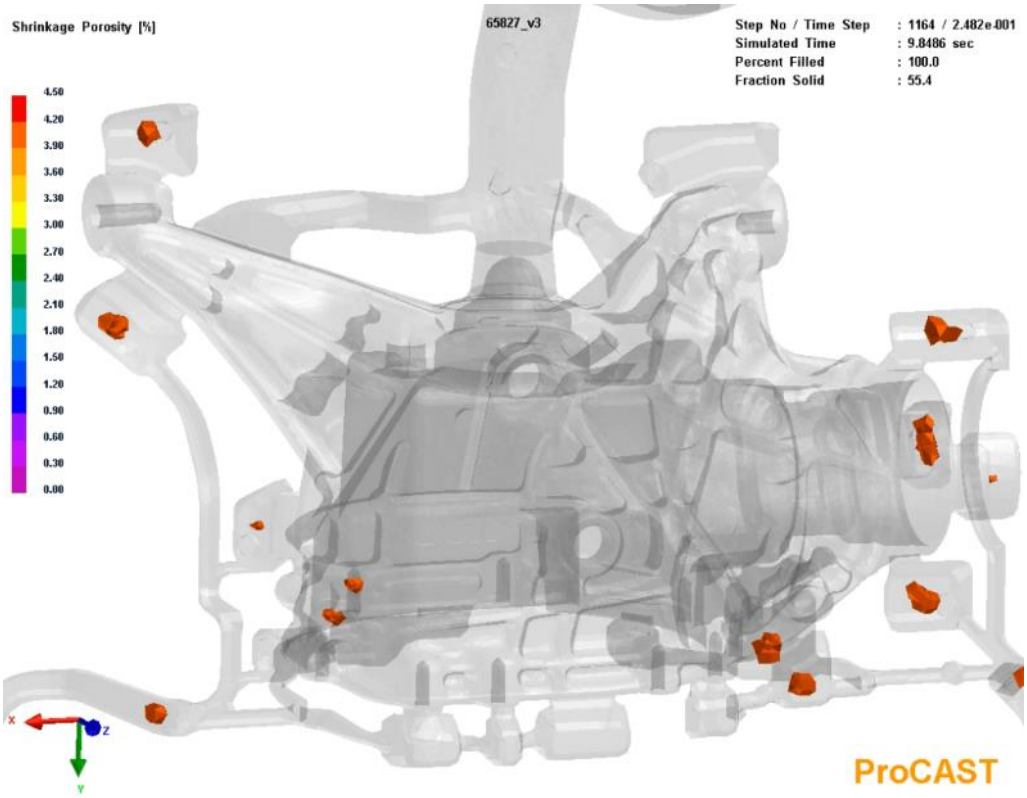
Obr. 5.13 Podíl pevné fáze v čase 7,863 s



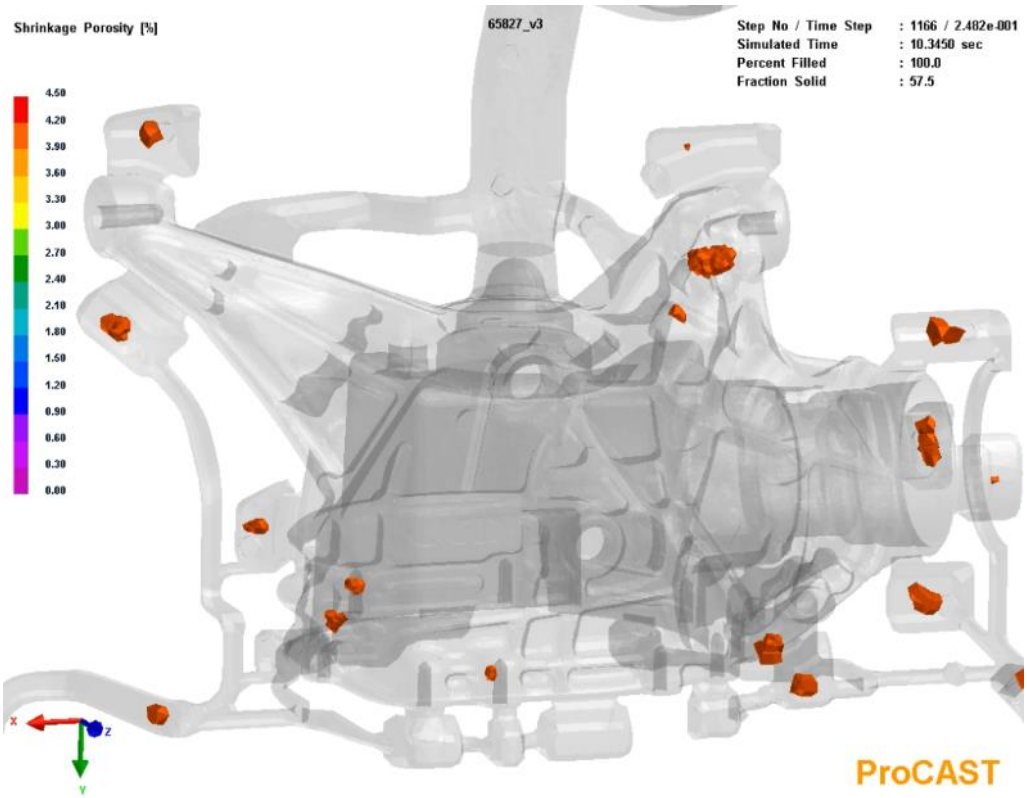
Obr. 5.14 Podíl pevné fáze v čase 25,0390 s



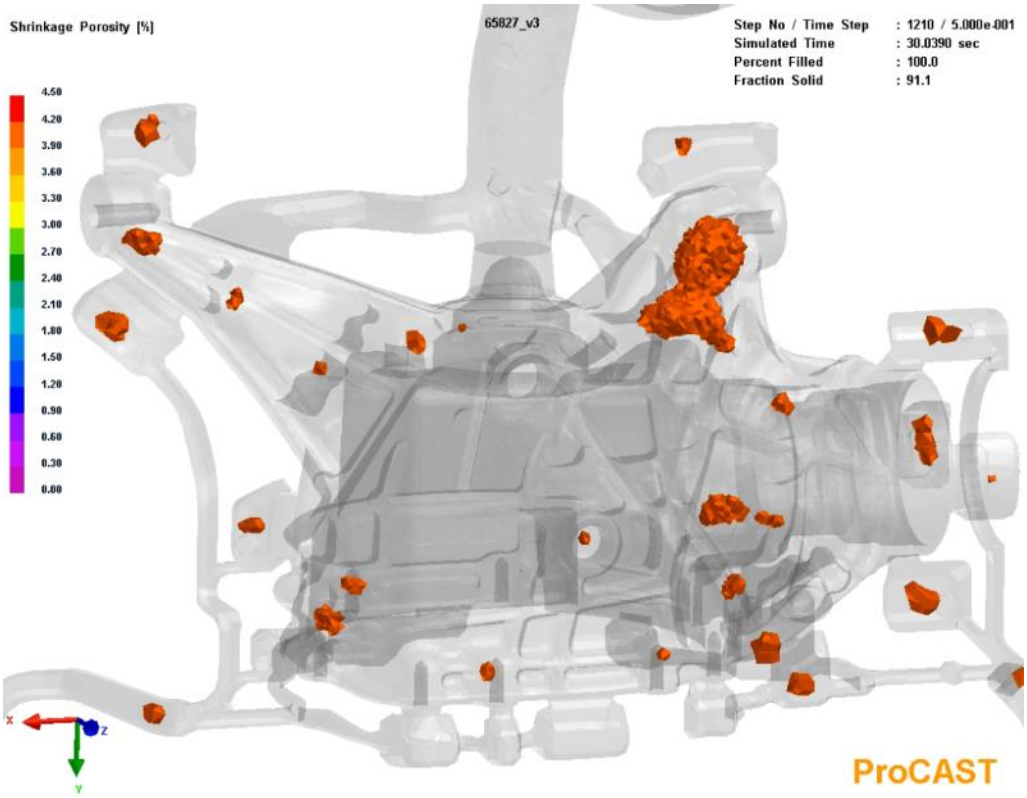
Obr. 5.15 Podíl pevné fáze v čase 27,039 s



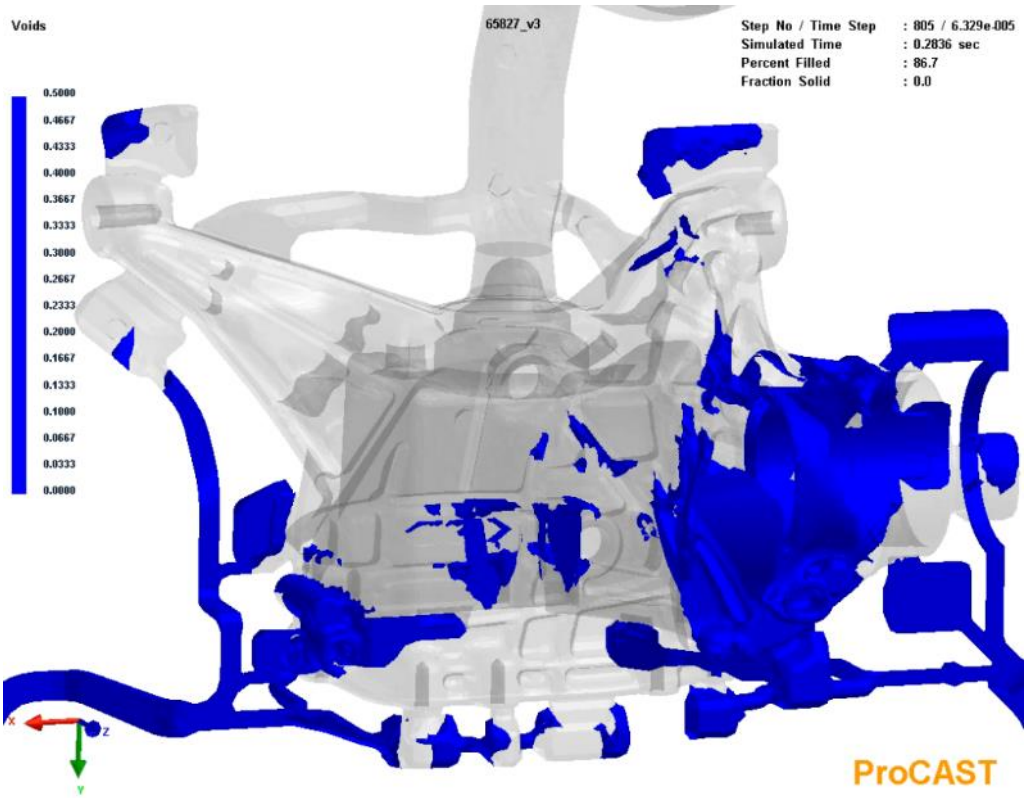
Obr. 5.16 Staženiny/porezita v místech s rychlejším tuhnutím, v ledvinkách



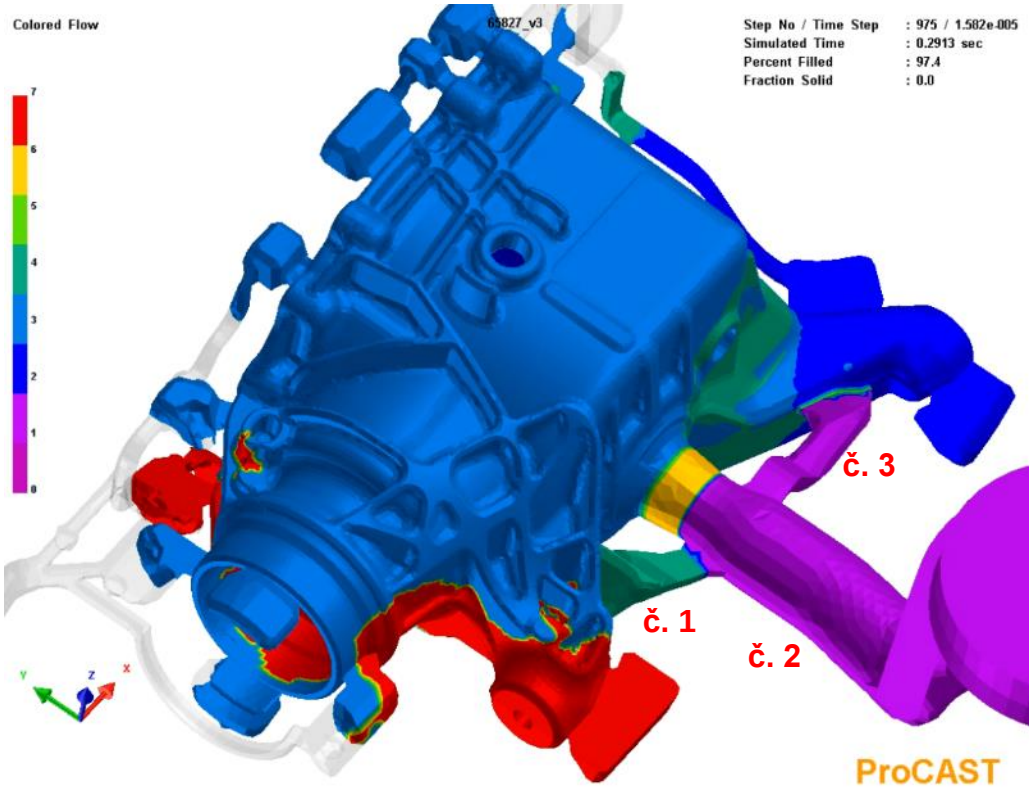
Obr. 5.17 Pravděpodobný začátek vzniku staženiny/porezity ve zkoumané oblasti



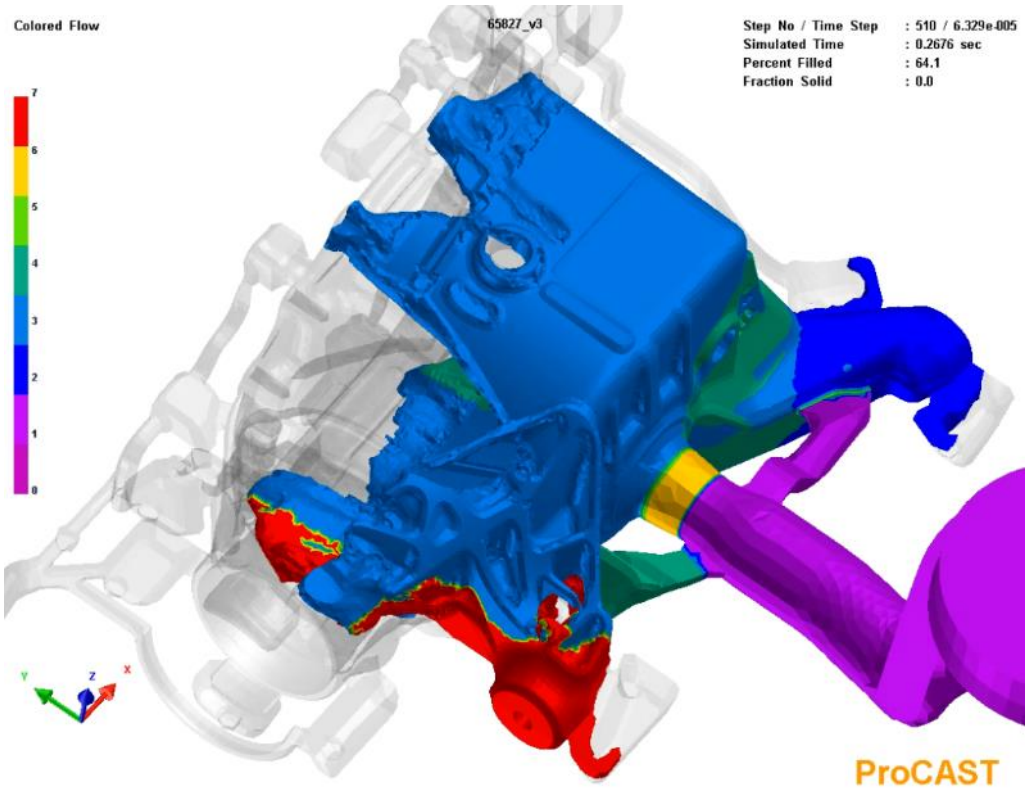
Obr. 5.18 Maximální předpokládaná velikost staženin a porezity v odlitku



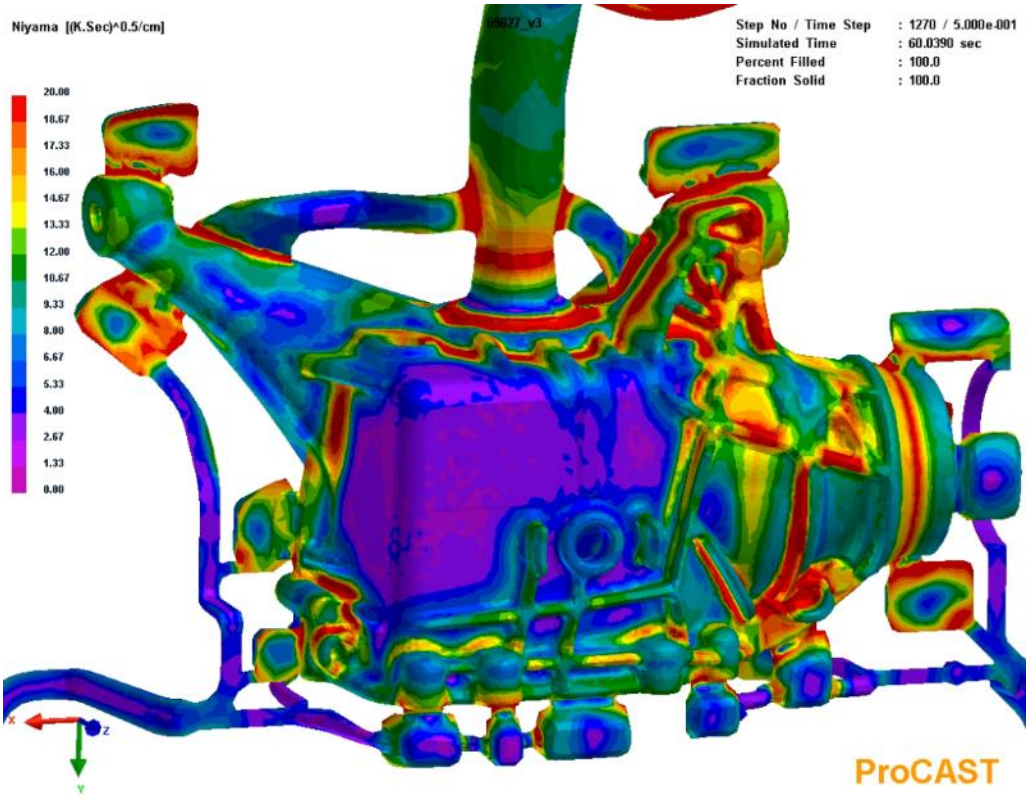
Obr. 5.19 Nezaplněná místa ve kterých zůstává uzavřený vzduch (modrá)



Obr. 5.20 Plnění formy rozdělené podle jednotlivých zářezů



Obr. 5.21 Plnění formy v čase 0,2676 s



Obr. 5.22 Ukazatel Niyama vyznačující místa ohrožená vznikem propadliny (fialová)

6. PRAKTICKÁ ČÁST

Experiment byl proveden na zařízeních uvedených v **kap.** 5. Cílem experimentu bylo ověřit vliv většího množství rozpuštěného vodíku na vznik a tvar defektů u odlitku V65827. Zkoumaná část je ukázána na **obr. 6.1**.

Obr. 6.1 Zkoumaná část odlitku V65827

Pro úpravu taveniny byly použity tři různé režimy:

1. režim

ARSAL 2125[9] + odplynění 240 s (N_2 4.6)

2. režim

ARSAL 2125 + odplynění 50 s (N_2 4.6) + naplynění 180 s (N_2 4.6 + 20 % H_2 v N_2)

3. režim

ARSAL 2125 + odplynění 50 s (N_2 4.6) + naplynění 240 s (N_2 4.6 + 20 % H_2 v N_2)

Experimenty byly rozděleny do dvou dnů. První den bylo odlito 72 odlitků ze slitiny AlSi9Cu3 upravené 1. režimem. Během 1. režimu je tavenina probublávána plynným N_2 (průtok cca 17 l/min). Aby se snížil podíl Al ve strusce, přidává se rafinační sůl ARSAL 2125 Flakes. Výsledkem tohoto zpracování byla odplyněná tavenina s „minimálním“ obsahem rozpuštěných plynů (zejména H_2, N_2) a struska s min. obsahem Al a vysokým obsahem nečistot (tzv. suchá struska) **obr. 6.2**, **obr. 6.3** a **obr. 6.4**. Takto vyčištěná tavenina byla zavezena do vanové udržovací pece a odlita do formy. Průměrná hodnota DI u této taveniny byla DI = 0,71 %[10] a průměrná teplota 691 °C (viz **kap. 6.1**). Z této taveniny bylo odebráno šest vzorků (označených CH1-CH6) na chemickou analýzu (viz **kap. 6.2**).

Během půlnoci téhož dne začali taviči navážet taveninu upravenou 2. režimem. Jednalo se o stejnou slitinu o chemickém složení CH7-CH9. Slitina byla odplyňována po dobu 50 s a zpětně naplyňována formovacím plynem po dobu 180 s.

---

[9] ARSAL 2125 Flakes - obchodní název rafinační soli (přípravek, který z taveniny odstraňuje oxidické vměstky, snižuje obsah hliníku ve strusce a tím snižuje ztráty kovového hliníku)
[10] DI = Dichte index = index hustoty

Naplyňování při druhém režimu je kombinací plynu odplyňovacího (N_2) s plynem formovacím (20 % H_2 v N_2). Objemy jednotlivých plynů byly 7,4 l/min N_2 + 17 l/min formovacího plynu. Výsledkem byla tavenina s DI = 4,66 a chemickým složením CH7-CH9 (měřeno ve vaně).

Pro vyvolání většího efektu na vnitřní vady se tato hodnota nezdála dostatečně vysoká. Proto se použil ještě 3. režim, který spočíval v prodloužení času naplyňování z 180 s na 240 s. Po nalití do vany vzrostl DI na 5,32 %. Výsledné efekty všech tří úprav jsou uvedeny v následujících kapitolách.

Obr. 6.2 Tavenina před odplyněním, na hladině je viditelná struska s vysokým obsahem kovového Al

Obr. 6.3 Tavenina během naplyňování, bouřlivá reakce na hladině je způsobena vyplavováním vodíku na hladinu

Obr. 6.4 Tavenina po odplynění a zpětném naplynění, na hladině je suchá struska (nízký obsah Al a vysokým podílem nečistot)

6.1 Index hustoty – Dichte Index (DI)

Měření DI hodnot probíhalo po celou dobu lití. K měření indexu hustoty byly použity kovové kelímky (impregnované pomocí Boron-Nitride **obr. 6.5**), vakuační zařízení **obr. 6.6** a váha mk 2200 LC **obr. 6.7**. Délka tuhnutí slitiny byla 4 min a tlak 80 mbar.

Obr. 6.5 Impregnační prášek

Obr. 6.6 Zařízení pro tuhnutí vzorku za sníženého tlaku

Obr. 6.7 Váha k měření rozdílu hustoty

Nejprve se odebral vzorek z taveniny, která byla přelita z tavící pece do pánve, tzn. neupravena. Druhý vzorek byl odebrán ihned po úpravě jedním ze tří režimů. Následně se pánev vylila do udržovací pece.

Po vylití pánve do udržovací pece následovalo přibližně hodinové odebírání vzorků. Pro měření DI bylo odebráno celkem 50 hodnot. Z taveniny upravené 1. režimem 20 vzorků, 2. režimem 10 vzorků a 3. režimem 20 vzorků. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Neodplyněná tavenina z pece Striko má DI v rozmezí 8-10 %. Po odplynění plynným N_2 (240 s) dojde k poklesu na DI ~ 1 %, což se potvrdilo již při dřívějších měřeních KH, které nebyly součástí této diplomové práce. Odplyněná tavenina si tuto hodnotu drží i v udržovací peci (při „čekání“ na lití).

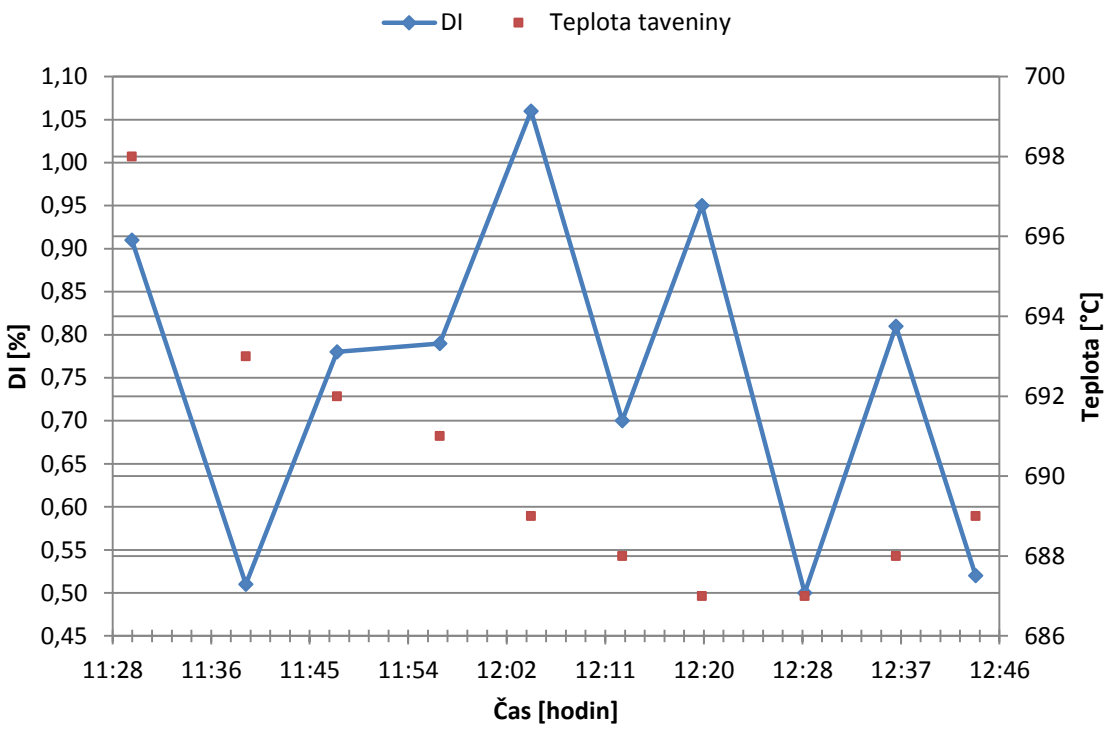
Tabulka 6-1 DI hodnoty taveniny odebrané z tavící pece a upravené 1. režimem.

Čas	Teplota před odplyněním [°C]	DI před odplyněním [%]	DI po odplynění [%]	Teplota po odplynění [°C]	Doba cyklu [s]
11:20	715	7,97	0,48	703	240
15:12	719	9,77	0,97	708	

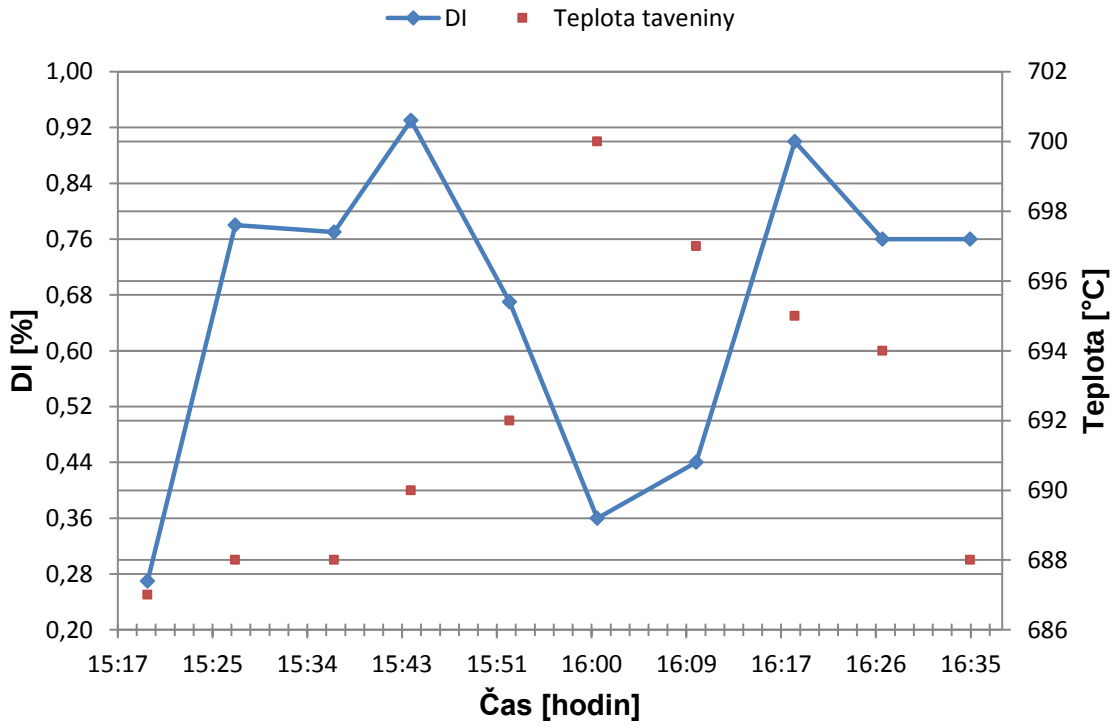
V tabulce (**tabulka 6-2**) a na obrázcích (**obr. 6.8**, **obr. 6.9**) jsou viditelné změny naměřených DI hodnot v závislosti na čase, kdy byl vzorek odebrán.

Tabulka 6-2 DI hodnoty taveniny odebrané z udržovací pece a upravené 1. režimem.

Udržovací pec MARCONI				
Čas	**DI [%]**	**Teplota taveniny [°C]**	**Doba cyklu [s]**	**Označení vzorku chemického složení**
11:30	0,91	698	240	CH1
11:40	0,51	693		
11:48	0,78	692		
11:57	0,79	691		
12:05	1,06	689		CH2
12:13	0,70	688		
12:20	0,95	687		
12:29	0,50	687		
12:37	0,81	688		
12:44	0,52	689		CH3
15:20	0,27	687	240	CH4
15:28	0,78	688		
15:37	0,77	688		
15:44	0,93	690		
15:53	0,67	692		
16:01	0,36	700		CH5
16:10	0,44	697		
16:19	0,90	695		
16:27	0,76	694		
16:35	0,76	688		CH6



Obr. 6.8 Hodnoty DI u slitiny v udržovací peci upravené 1. režimem (240 s)



Obr. 6.9 Hodnoty DI u slitiny v udržovací peci upravené 1. režimem (240 s)

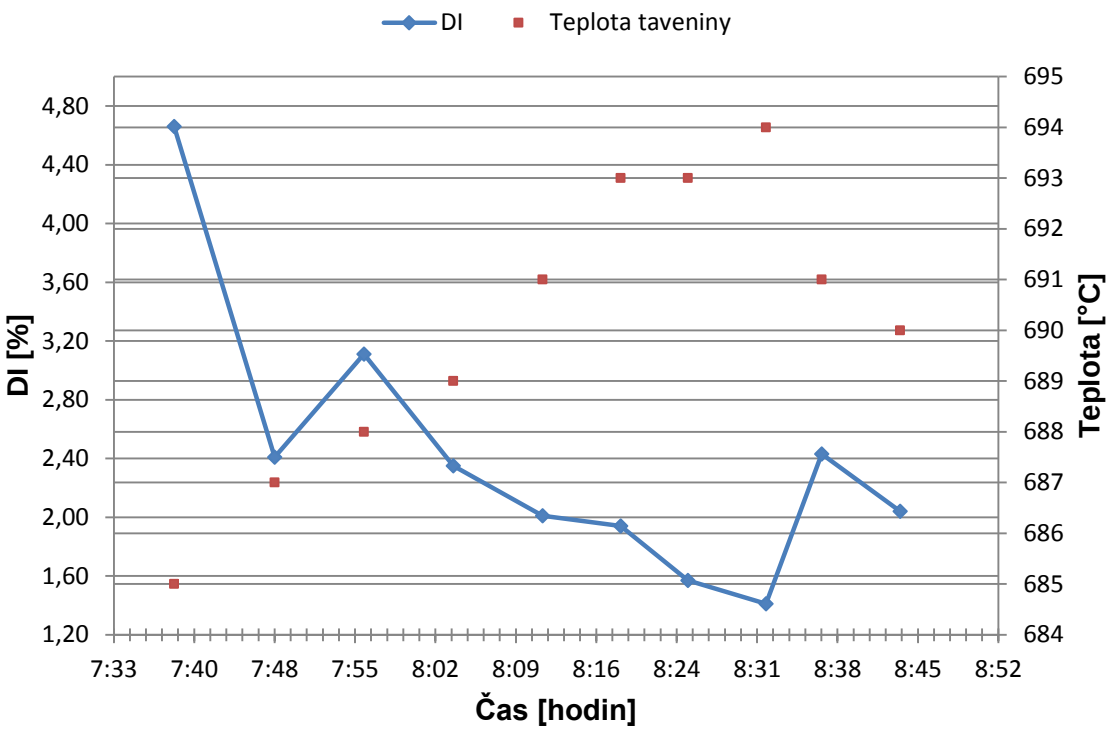
Druhý den byla tavenina upravena nejprve 2. režimem. Vzorky se opět odebírali jak z neupravené, tak z upravené slitiny (**tabulka 6-3**). Poté se tavenina nalila do udržovací pece a výsledná hodnota po promíchání se zbytkovým materiálem dosáhla něco málo přes 5 % (**tabulka 6-4**). Hodnoty jasně ukazují pokles hodnoty DI z cca 5 % na cca 2% během cca 1 hodiny. Dvě procenta jsou hranice, pod kterou DI taveniny neklesl. Lze tady říct, že když se nový materiál cca DI = 7 % smíchal se zbytkovým cca DI = 2 %, dosáhlo se výsledku DI ~ 5 %.

Tabulka 6-3 DI hodnoty taveniny odebrané z tavící pece a upravené 2. režimem.

Čas	Teplota před naplyněním [°C]	DI před naplyněním [%]	DI po naplynění [%]	Teplota po naplynění [°C]	Doba cyklu [s]
7:05	717	9,92	6,67	701	50+180
8:52	718	9,78	7,15	698	

Tabulka 6-4 DI hodnoty taveniny odebrané z udržovací pece a upravené 2. režimem.

Udržovací pec MARCONI				
Čas	DI [%]	Teplota taveniny [°C]	Doba cyklu [s]	Označení vzorku chemického složení
7:39	4,66	685	50+180	CH7
7:48	2,41	687		
7:56	3,11	688		
8:04	2,35	689		
8:12	2,01	691		
8:19	1,94	693		CH8
8:25	1,57	693		
8:32	1,41	694		
8:37	2,43	691		
8:44	2,04	690		CH9



Obr. 6.10 Hodnoty DI u slitiny v udržovací peci upravené 2. režimem (50+180 s)

Protože se hodnota DI = 4,66 % zdála jako nedostatečná, byl prodloužen čas naplnění ze 180 s na 240 s. Prodloužením naplyňovacího času vzrostla hodnota DI u taveniny v pánvi přes 8 % (**tabulka 6-5**). Po smíchání s taveninou v peci bylo dosaženo hodnoty DI = 5,32 %. Po dvou hodinách se do vany nalila druhá pánev a po smíchání byla hodnota DI = 4,86 %. Před nalitím druhé pánve došlo k přibližně hodinové odstávce licího stroje. Díky tomu mohlo probíhat delší samovolné odplynění, a nejspíš proto je DI pod pěti procenty.

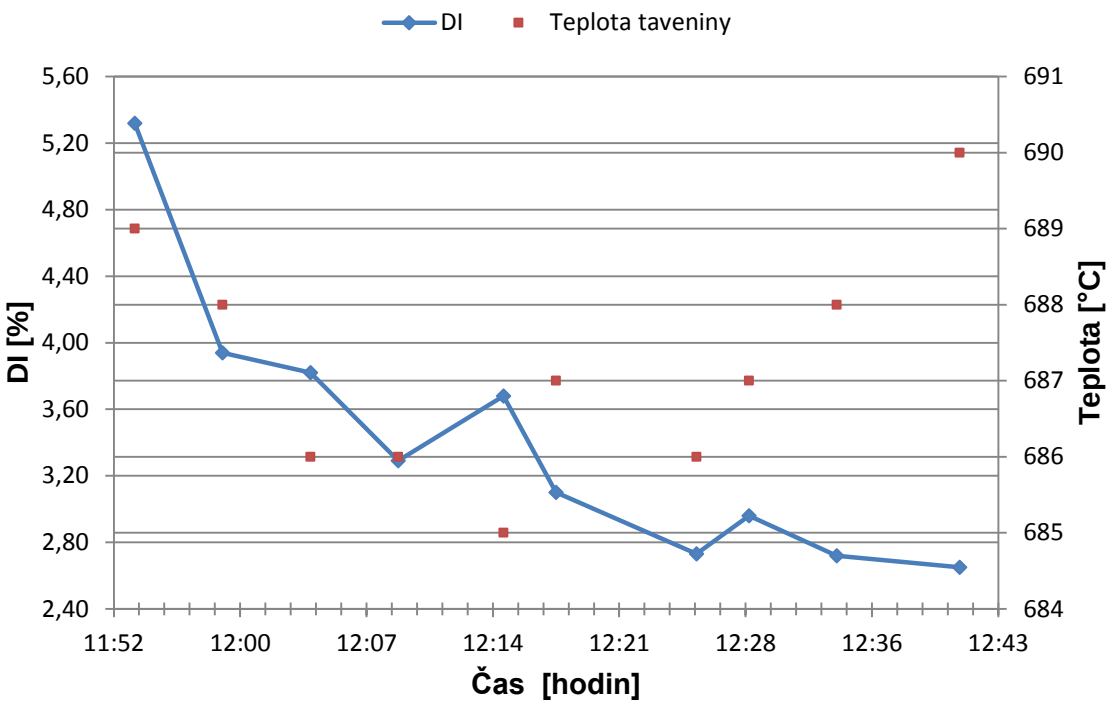
Třetí režim zvýšil hodnotu DI a tím i samotné naplynění slitiny. Přibližně po jedné hodině hodnota DI opět klesla na hodnotu blížící se ke dvěma procentům (**tabulka 6-6**). Pokles na hodnoty pod 3 % je způsoben hlavně tím, že vanové pece mají tzv. samoodplyňovací účinek (vodík samovolně vyplouvá na hladinu a uniká do atmosféry).

Tabulka 6-5 DI hodnoty taveniny odebrané z tavící pece a upravené 3. režimem.

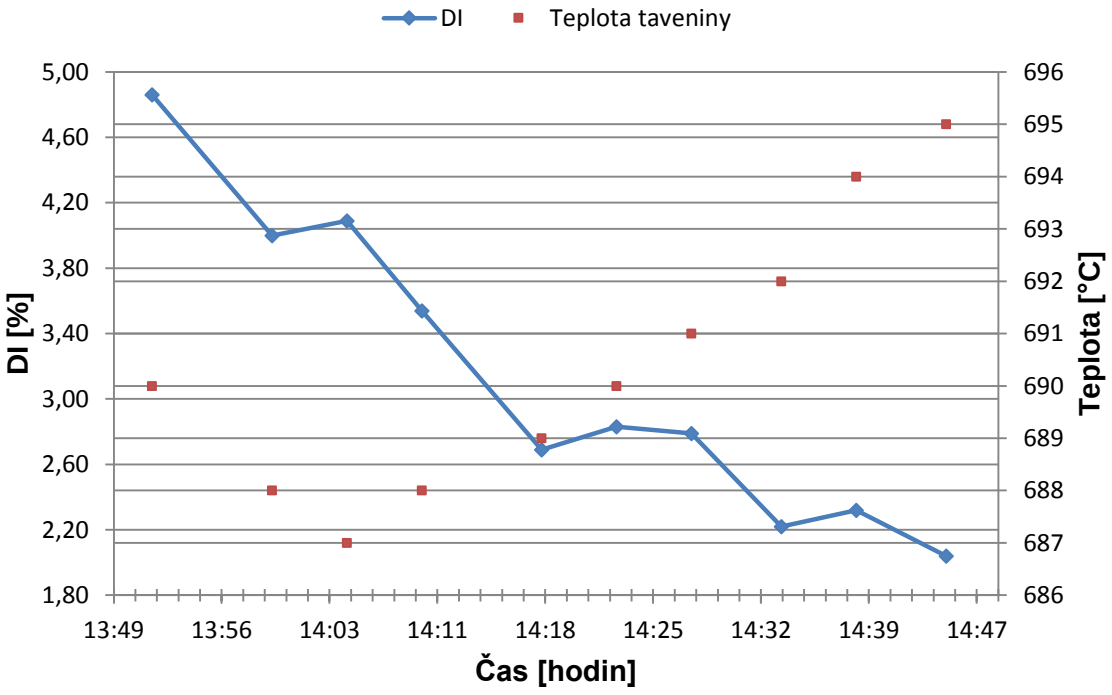
Čas	Teplota před naplyněním [°C]	DI před naplyněním [%]	DI po naplynění [%]	Teplota po naplynění [°C]	Doba cyklu [s]
11:35	720	10,52	8,10	707	50+240
13:30	729	8,76	8,69	717	

Tabulka 6-6 DI hodnoty taveniny odebrané z udržovací pece a upravené 3. režimem.

Udržovací pec MARCONI				
Čas	**DI [%]**	**Teplota taveniny [°C]**	**Doba cyklu [s]**	**Označení vzorku chemického složení**
11:54	5,32	689	50+240	CH10
11:59	3,94	688		
12:04	3,82	686		
12:09	3,29	686		
12:15	3,68	685		
12:18	3,10	687		CH11
12:26	2,73	686		
12:29	2,96	687		
12:34	2,72	688		
12:41	2,65	690		CH12
13:52	4,86	690	50+240	CH13
14:00	4,00	688		
14:05	4,09	687		
14:10	3,54	688		
14:18	2,69	689		CH14
14:23	2,83	690		
14:28	2,79	691		
14:34	2,22	692		
14:39	2,32	694		
14:45	2,04	695		CH15



Obr. 6.11 Hodnoty DI u slitiny v udržovací peci upravené 3. režimem (50+240 s)



Obr. 6.12 Hodnoty DI u slitiny v udržovací peci upravené 3. režimem (50+240 s)

6.2 Chemické složení slitiny

Slitina nebyla ani modifikována ani očkována, pouze odplyněna a naplyněna. Vzorky CH1-CH15 byly odebírány z vanové pece pomocí impregnované kovové naběračky a odlity do přípravku určeného k výrobě zkušebních vzorků **obr. 6.13**. Všechny vzorky byly testovány pomocí spektrální analýzy a jejich chemické složení odpovídalo normě KH pro slitinu AlSi9Cu3, viz **tabulka 6-7**. V posledním řádku téže tabulky je uvedena eutektická teplota (T_E), která byla spočítána pomocí vzorce (11) [15]:

$$T_E = 577 - \left(\frac{12{,}5}{\mathrm{Si}}\right) \cdot (4{,}43 \cdot Mg + 4 \cdot Ni + 3 \cdot Mn + 1{,}93 \cdot Cu + 1{,}7 \cdot Zn + 1{,}43 \cdot Fe) \qquad (11)$$

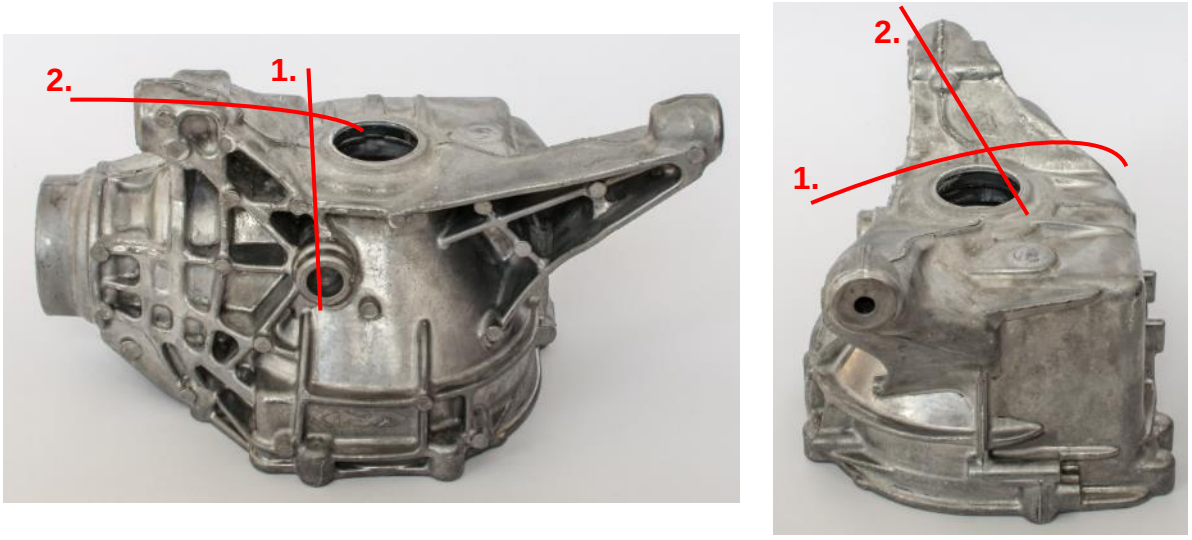
Obr. 6.13 Přípravek na výrobu vzorku pro chemickou analýzu

Tabulka 6-7 Chemické složení všech odebraných vzorku ze slitiny AlSi9Cu3.

Prvek		Vzorek														
		CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	CH10	CH11	CH12	CH13	CH14	CH15
Si	[%]	10,09	10,20	10,09	10,15	10,35	10,01	10,20	10,15	10,18	10,24	10,33	10,35	10,21	10,30	10,19
Fe	[%]	0,734	0,734	0,733	0,734	0,73	0,727	0,731	0,726	0,729	0,694	0,711	0,707	0,713	0,711	0,712
Cu	[%]	2,84	2,83	2,93	2,82	2,81	2,95	2,79	2,81	2,79	2,83	2,85	2,84	2,81	2,88	2,82
Mn	[%]	0,353	0,355	0,356	0,358	0,357	0,353	0,368	0,364	0,367	0,341	0,351	0,35	0,351	0,352	0,352
Mg	[%]	0,237	0,239	0,25	0,244	0,24	0,26	0,255	0,252	0,248	0,254	0,26	0,257	0,256	0,257	0,252
Cr	[%]	0,0296	0,0295	0,0294	0,0297	0,0291	0,0289	0,0298	0,0297	0,03	0,0275	0,0282	0,0281	0,0284	0,0286	0,0282
Ni	[%]	0,0549	0,0543	0,0567	0,0546	0,0532	0,0564	0,0526	0,0519	0,0505	0,0518	0,0516	0,0514	0,0501	0,0511	0,0497
Zn	[%]	0,905	0,903	0,916	0,891	0,897	0,904	0,885	0,891	0,889	0,894	0,898	0,903	0,899	0,901	0,9
Pb	[%]	0,0778	0,0765	0,0792	0,0757	0,0756	0,0808	0,0755	0,0752	0,0744	0,0712	0,072	0,0709	0,0717	0,0713	0,0708
Sn	[%]	0,0256	0,0254	0,0281	0,0272	0,0263	0,0283	0,0267	0,0252	0,0251	0,0263	0,0255	0,0252	0,0249	0,0248	0,0248
Ti	[%]	0,0527	0,0525	0,0527	0,0547	0,0524	0,0531	0,0547	0,0547	0,0547	0,0562	0,056	0,0559	0,0569	0,0564	0,0565
Sr	[%]	0,00044	0,00043	0,00044	0,0012	0,00033	0,00039	0,001	0,001	0,001	0,0025	0,0025	0,0026	0,0025	0,0025	0,0024
Ca	[%]	0,0006	0,0006	0,00078	0,0011	0,00065	0,00089	0,00085	0,00067	0,00067	0,00068	0,00062	0,00066	0,00068	0,0067	0,00074
Sb	[%]	0,003	0,0024	0,0032	0,0033	0,0034	0,003	0,0037	0,0033	0,0031	0,0032	0,0033	0,0036	0,0025	0,0029	0,0031
Bi	[%]	0,0035	0,0035	0,0035	0,0036	0,0034	0,0035	0,0033	0,0033	0,0034	0,0033	0,0033	0,0034	0,0033	0,0032	0,0033
P	[%]	0,00071	0,0008	0,009	0,00076	0,00091	0,00083	0,00079	0,00097	0,0008	0,00091	0,00073	0,00075	0,00089	0,0007	0,00093
Na	[%]	0,00014	0,00012	0,00013	0,0011	0,00013	0,0005	0,0003	0,00016	0,00018	0,00018	0,00022	0,00023	0,00021	0,00017	0,00016
Al	[%]	84,6	84,5	84,4	84,5	84,3	84,5	84,5	84,5	84,5	84,5	84,3	84,3	84,5	84,3	84,5
T_E	[°C]	564,12	564,27	563,79	564,22	564,51	563,63	564,28	564,2	564,3	564,39	564,35	564,41	564,32	564,25	564,29

6.3 Vyhodnocení porezity ve struktuře odlitku

Během licích zkoušek bylo odlito 360 odlitků. Část z nich se zrentgenovala a zjistilo se, že všechny kusy obsahují ve zkoumané oblasti vady. Nejčastější defekty jsou velké staženiny, porezita a řediny. Staženiny jsou nejčastěji v tepelné ose. Mimo osu se nacházejí bubliny. Z celkového počtu 360 ks bylo vybráno 40 ks (20 ks odplyněných a 20 ks naplyněných). Odlitky se pomocí pásové pily zmenšily (1. řez). Tyto zmenšené vzorky se opět rentgenovaly. Z těchto 40 ks se vybralo 20 ks, které se rozřízly řezem číslo 2. Řez číslo 2 byl proveden v předpokládaném místě vady (v největšího objemu materiálu). Další fotky viz příloha.



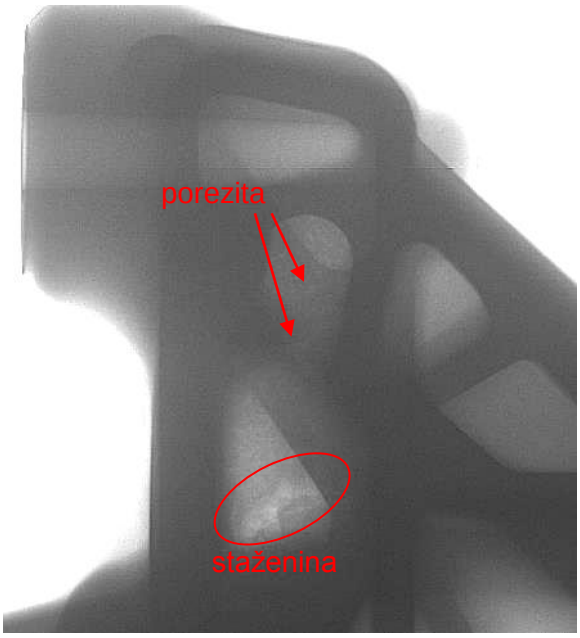
Obr. 6.14 Odlitek s červeně vyznačenými řezy

6.3.1 Rentgenová zkouška

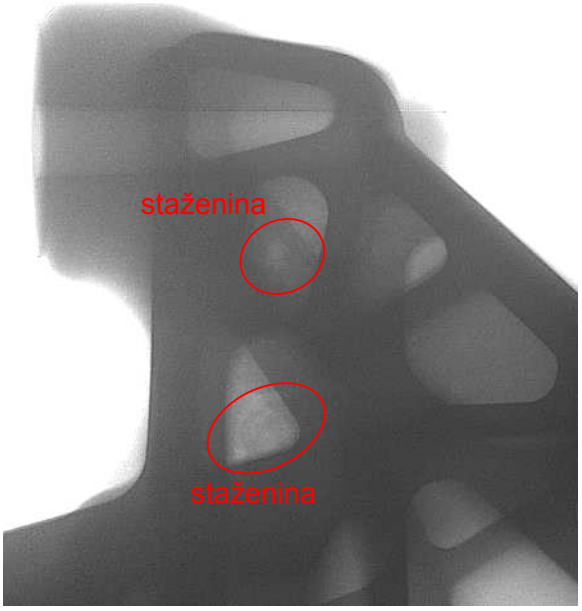
Rentgenem bylo zkontrolováno celkem 216 odlitků (144 ks z taveniny upravené 1. režimem a 72 ks z taveniny upravené 3. režimem). Tato zkouška vnitřních vad jasně ukázala, že úprava režimem číslo 3 nemá prakticky žádný vliv na snížení vzniku vnitřní vady. Někdy se u těchto odlitků vyskytovaly vady větší než u odlitků z taveniny upravené 1. režimem. Po tomto zjištění se rozhodlo, že není třeba řezat všechny odlitky. Z 216 odlitků bylo vybráno 40 kusů pro opětovné zrentgenování. Osm vybraných snímků je uvedeno níže (od každé úpravy 4 fotky) a dalších 16 vybraných obrázků je uvedeno v příloze. Jedná se o výběr z 216 rentgenových snímků. U každého obrázku je uvedena přibližná teplota a přibližný DI. Nebylo možné odebírat DI před každým nalitím odlitku, a proto je přiřazeno 7 RTG snímků k jedné hodnotě DI.

Všechny rentgenové snímky uvedené v této diplomové práci mají kvůli lepší viditelnosti při tisku upravený kontrast a jas. Zvýrazněním černé vynikají světlé vady.

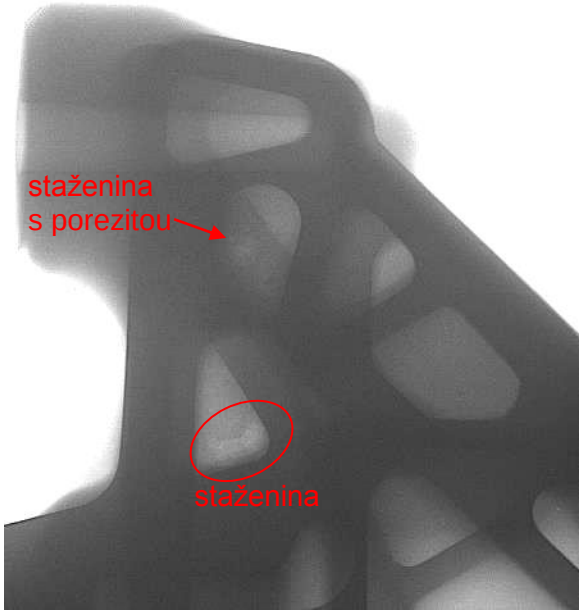
Vybrané snímky odlitků upravené 1. režimem (240 s).



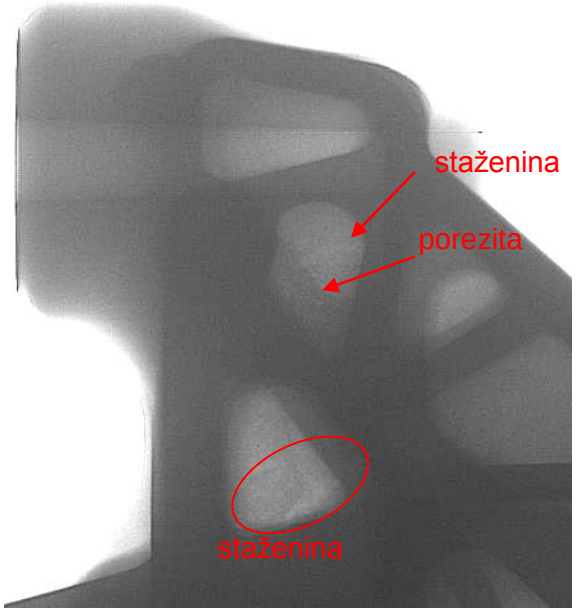
Obr. 6.15 Rentgenový snímek odlitku č. 67, DI = 0,91 %, teplota lití = 698 °C



Obr. 6.16 Rentgenový snímek odlitku č. 143, DI = 0,27 %, teplota lití = 687 °C

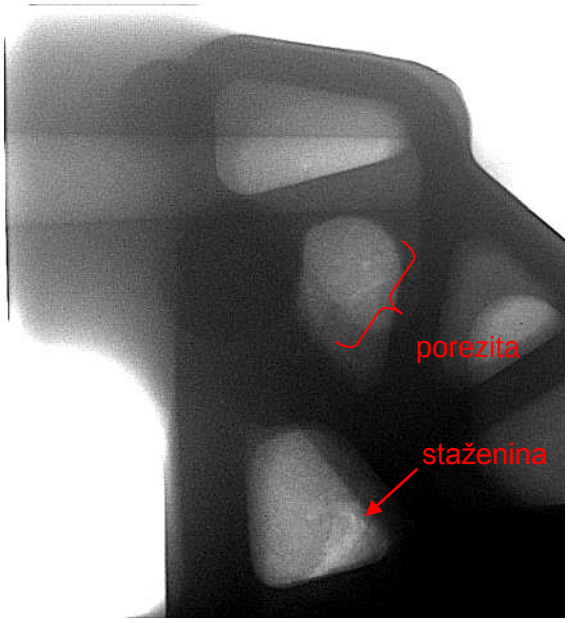


Obr. 6.17 Rentgenový snímek odlitku č. 93, DI = 0,90 %, teplota lití = 695 °C

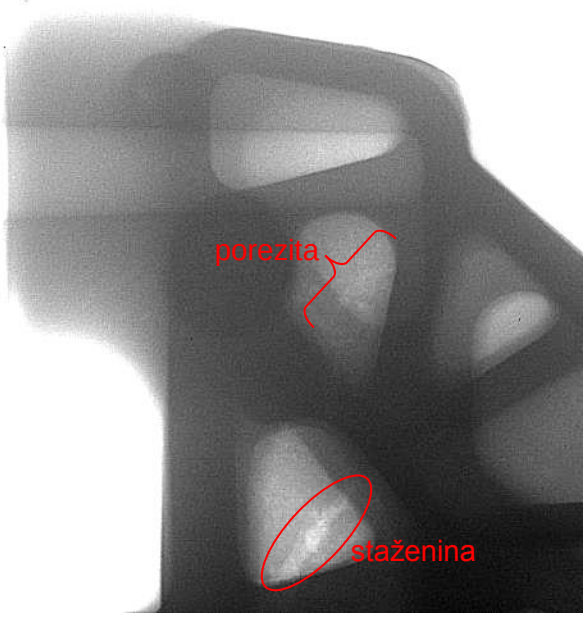


Obr. 6.18 Rentgenový snímek odlitku č. 38, DI = 1,06 %, teplota lití = 689 °C

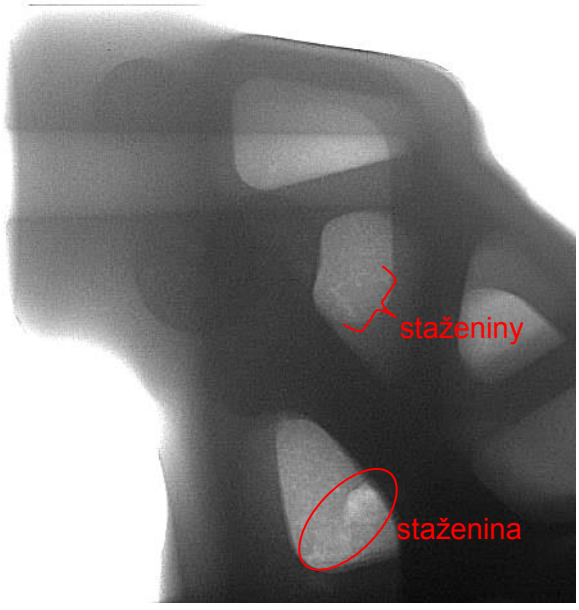
Vybrané snímky odlitků upravené 3. režimem (50+240s).



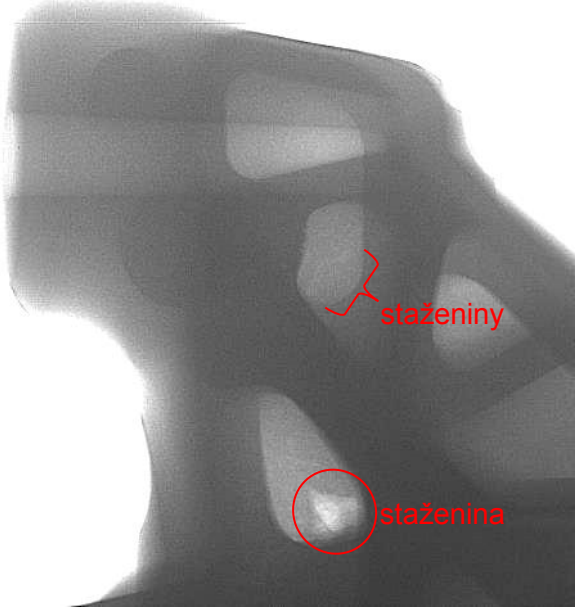
Obr. 6.19 Rentgenový snímek odlitku č. 69, DI = 0,91 %, teplota lití = 689 °C



Obr. 6.20 Rentgenový snímek odlitku č. 62, DI = 3,94 %, teplota lití = 688 °C



Obr. 6.21 Rentgenový snímek odlitku č. 27, DI = 2,73 %, teplota lití = 686 °C

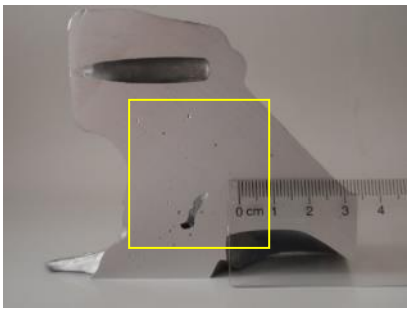


Obr. 6.22 Rentgenový snímek odlitku č. 3, DI = 2,65 %, teplota lití = 690 °C

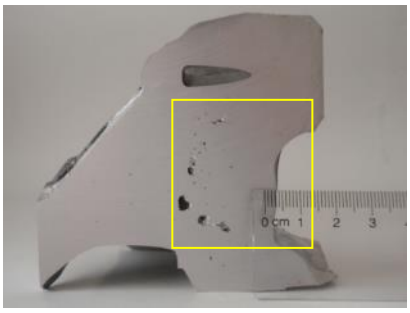
6.3.2 Porovnání makroskopických fotek defektů s RTG snímky

Jak bylo uvedeno, vybralo se 40 odlitků, které byly znovu zrentgenovány. Z nich se 20 ks rozřezalo a vybrousilo. Vady, které se tímto odhalily, jsou tak velké, že po jejich zdokumentování nebyl důvod dělat metalografické výbrusy. Stačily makroskopické snímky. Hodnotící parametry jsou velikost a tvar vady. Byly nalezeny až několik milimetrů velké vady typu: uzavřené staženiny a bubliny (plus jejich kombinace). Při broušení místa řezu došlo k odbroušení menších vad, což je běžný problém. U některých odlitků se pomocí řezu nepodařilo „trefit“ správnou polohu vady, tudíž se podle fotky může zdát, že byl „čistý“. Nicméně ve většině případů byly nalezeny velké vady, a proto je možné usoudit, že výše uvedené naplyňování nemělo významný vliv na kvalitu odlitků. Dále jsou uvedené jen dva příklady. Zbylých 18 vzorků je uvedeno v příloze diplomové práce. Odlitky vyrobené z taveniny upravené 1. režimem (240 s) jsou označené číslem a písmenem A (např. 3A) a odlitky odlité z taveniny upravené 3. režimem (50+240 s) jsou značeny číslem a písmenem B (např. 11B).

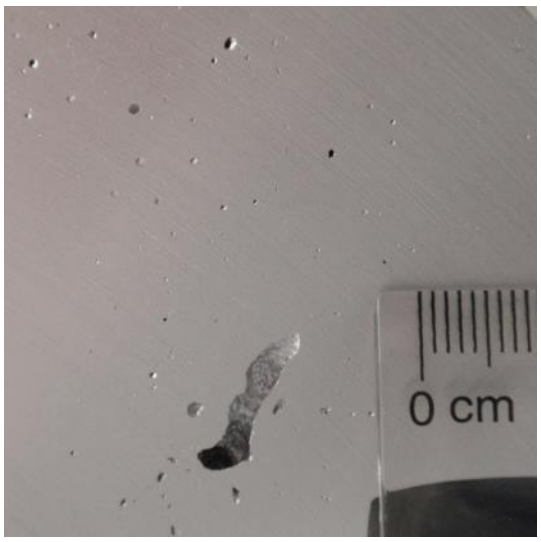
Snímky vady nalezené v odlitku č. 6A, upraven 1. režimem (240 s).



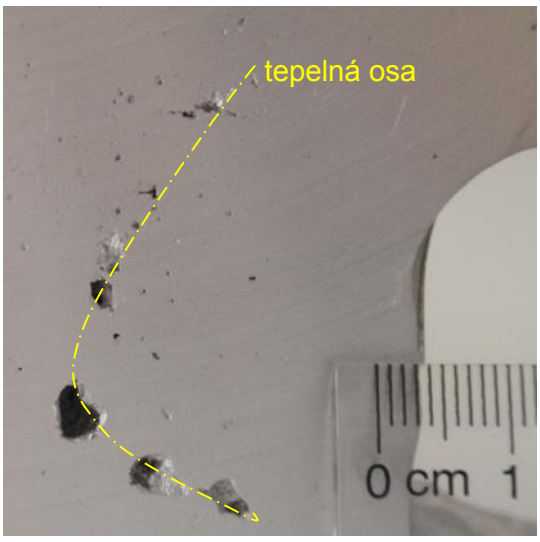
Obr. 6.23 Levá část



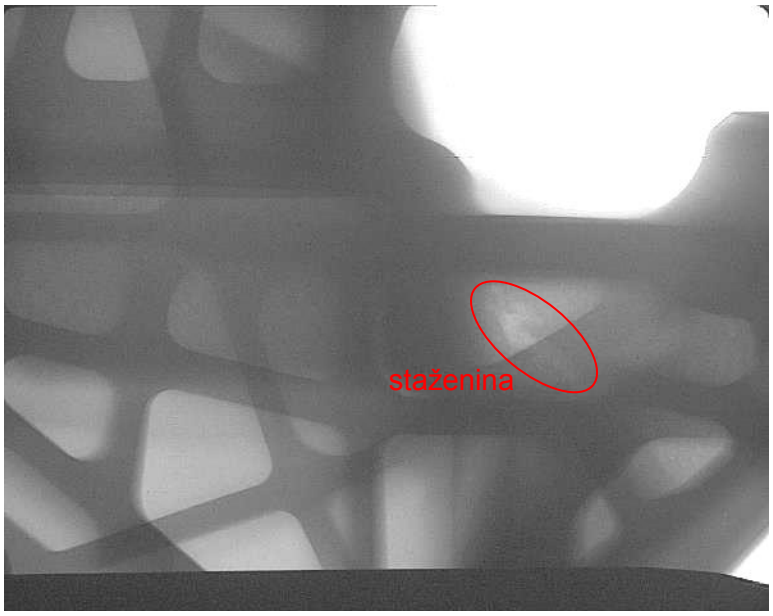
Obr. 6.24 Pravá část



Obr. 6.25 Detail vady levé části

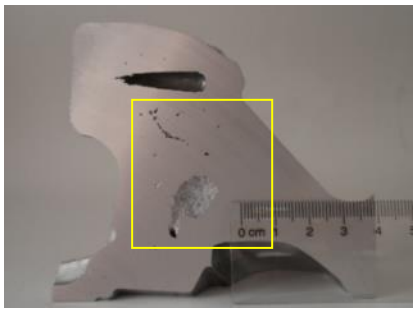


Obr. 6.26 Detail vady pravé části

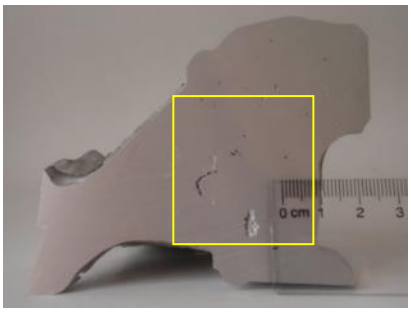


Obr. 6.27 Rentgenový snímek vady

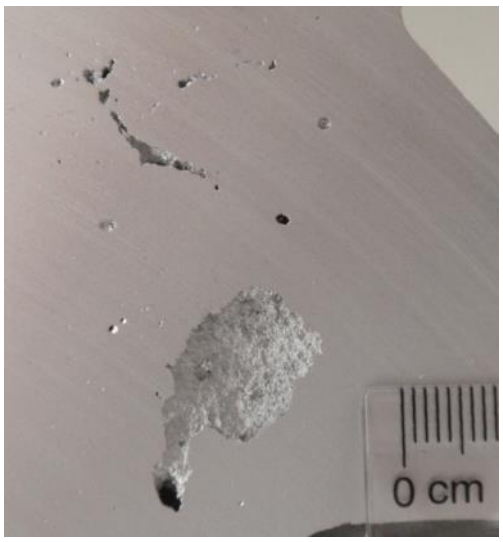
Snímky vady nalezené v odlitku č. 3B, upraven 3. režimem (50+240 s).



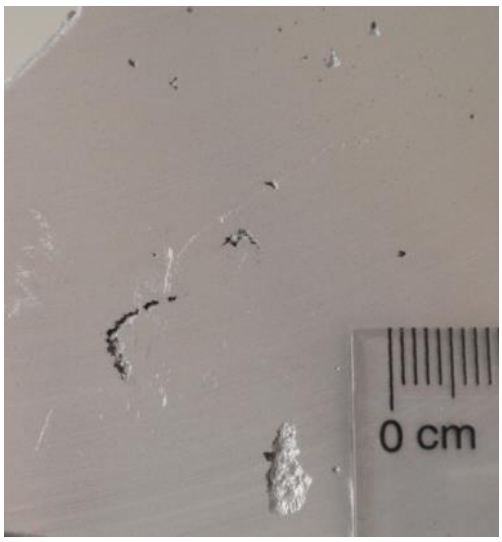
Obr. 6.28 Levá část



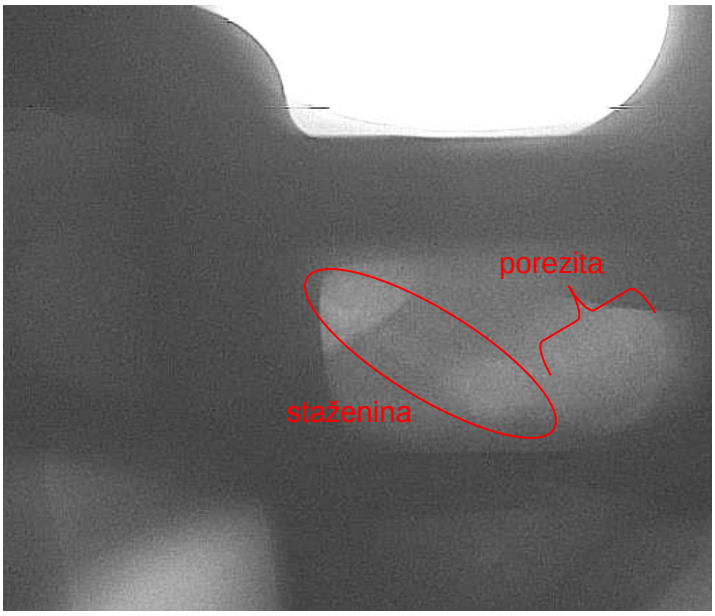
Obr. 6.29 Pravá část



Obr. 6.30 Detail vady



Obr. 6.31 Detail vady



Obr. 6.32 Rentgenový snímek vady

7. SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ

Slitina AlSi9Cu3 natavená v šachtové peci Striko měla DI = 8-10 %. Tato slitina se v transportní pánvi dále upravovala třemi různými režimy:

1. režim

ARSAL 2125 + odplynění 240 s (N_2 4.6)

Po odplynění dusíkem dojde k poklesu DI na přibližně 1 %. Při nalití do udržovací pece si tavenina drží průměrnou hodnotu DI = 0,71 % a průměrnou teplotu 691 °C. Dobře vysušená vanová udržovací pec drží obě tyto hodnoty v požadovaném rozmezí po dlouhou dobu. Odlitky vyrobené z pouze odplyněné taveniny mají v daném místě poměrně velké vnitřní defekty.

2. režim

ARSAL 2125 + odplynění 50 s (N_2 4.6) + naplynění 180 s (N_2 4.6 + 20 % H_2 v N_2)

Výsledkem této úpravy byla slitina, která při nalití do udržovací pece dosáhla hodnoty DI = 4,66 %. Tato hodnota se nezdála dostatečně vysoká, a proto se prodloužil naplyňovací čas.

3. režim

ARSAL 2125 + odplynění 50 s (N_2 4.6) + naplynění 240 s (N_2 4.6 + 20 % H_2 v N_2)

Prodloužení naplyňovacího času způsobilo vyšší DI materiálu. Avšak po smíchání „nové“ a „staré“ taveniny nebylo možné dosáhnout hodnot vyšších než cca 5,3 %. To je výsledek promíchání taveniny z transportní pánve s DI ~ 8,3 % a taveniny v udržovací peci s DI ~ 2,5 %. Hodnota DI ~ 2,5 % materiálu v udržovací peci je důsledkem samovolného odplyňování materiálu na poloviční hodnoty, a to za pouhou hodinu. Nicméně efekt tohoto naplynění byl takový, že u některých odlitků vznikaly mnohem větší vady než u odlitků vyrobených z pouze odplyněné taveniny.

Rentgenová zkouška

Rentgenem bylo zkontrolováno celkem 216 odlitků. 144 ks odlitých ze slitiny upravené 1. režimem a 72 ks vyrobených ze slitiny upravené 3. režimem. Tato zkouška vnitřních vad jasně ukázala, že úprava slitiny režimem číslo 3 nemá prakticky žádný vliv na snížení tvorby vnitřních vad. Někdy se u odlitků vyrobených ze slitiny upravené 3. režimem vyskytovali vady větší než u odlitků odlitých ze slitiny upravené 1. režimem. Byly nalezeny až několik milimetrů velké vady typu: uzavřené staženiny, bubliny a jejich kombinace.

Vady struktury

Dvacet odlitků se zrentgenovalo a rozřezalo. Vady, které se tímto odhalily, jsou tak velké, že pro jejich zdokumentování nebyl důvod dělat metalografické výbrusy. Stačily makroskopické snímky. Velikosti nalezených vad jasně potvrzují dříve zmíněné tvrzení, že výše uvedené naplyňování nemělo významný vliv na kvalitu odlitků.

8. NÁVRHY NA ZMĚNY

Pro snížení zmetkovitosti odlitku č. 65827/00 bude nutné provést jiná opatření než jen samotné naplynění taveniny. Jako nejvhodnější změny se ukazují: úprava formy a úprava taveniny.

8.1 Úprava formy

Formy pro tlakové lití jsou velice nákladné. Jakékoliv zásahy do její konstrukce stojí hodně peněz. Každá forma má omezenou životnost a po nějakém čase se musí vyrobit nová. Firma KH používá dvě formy. Nová má vyrobené kanálky pro systém Jet-Cooling, stará tyto kanálky nemá (ilustrační schéma chladicího systému Jet-Cooling viz příloha).

8.1.1 Konstrukce formy

Obě formy mají stejně konstruovanou dutinu. Odlitky vyrobené v těchto formách mají vady na totožných místech. Simulace potvrzují nevhodné proudění a tuhnutí kovu v dutině formy. Před výrobou další nové formy by bylo vhodné zvážit následující úpravy:

- úprava konstrukce formy, která by změnila způsob proudění kovu,
- odstranění nářiznutí č. 1 (způsobuje velké prohřátí formy viz **kap. 5.1**) a zvětšení dvou zbývajících nářiznutí (v případě, že se podaří zaslepit nářiznutí č. 1, mohlo by se vyzkoušet, jak se forma plní ze zbývajících dvou nářiznutí),
- změna zaústění problémového místa. Namísto ledvinky použít vakuační kanál, který povede do odsávací valchy (viz. **kap. 5.1**).

8.1.2 Jet-Cooling

Jet-Cooling je technologie, která celkem přesně reguluje teplotu určitých problematických míst formy během tuhnutí odlitku. Tato technologie může být velice užitečná k odstranění některých metalurgických defektů.

Hlavní výhody technologie Jet-Cooling:

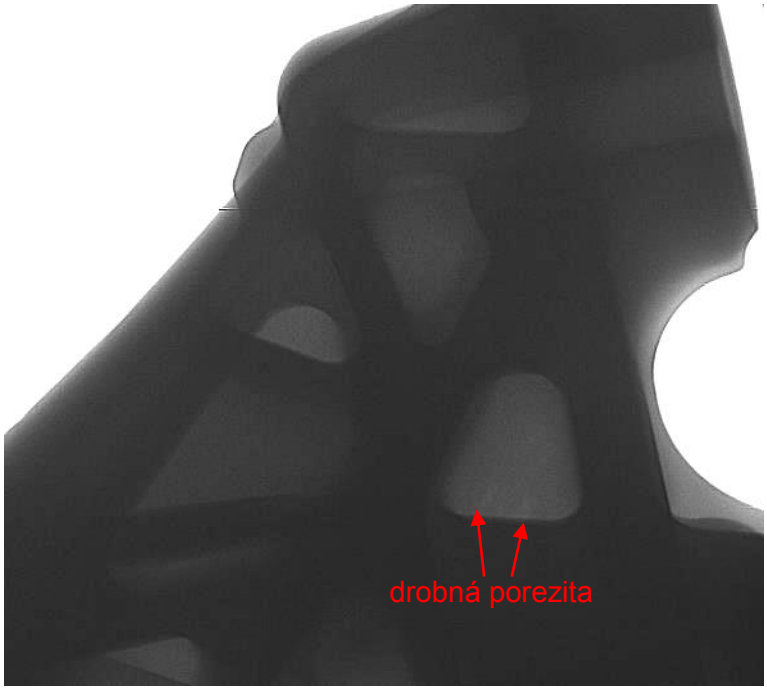
- zabraňuje vzniku staženin a porezity
- snižuje dobu licího cyklu a zkracuje dobu postřiku formy
- zjemňuje strukturu, a tím snižuje hodnotu DAS[11] = lepší mechanické vlastnosti
- zvyšuje životnost jader a formy

V současné době se odlitek V65827/00 odlévá do formy osazené tímto chladicím systémem. Všechny chladící trysky jsou umístěny v problematickém místě formy. Z tohoto místa odvádějí velké množství tepla a napomáhají rychlejšímu tuhnutí odlitku. Díky tomu se zkrátí čas potřebný pro vyloučení bublin. Výsledkem je, že kusy vyrobené v této formě mají mnohem menší výskyt staženin

[11] DAS = dendritic arm space = vzdálenost mezi větvemi dendritu

a porezity, než odlitky vyrobené ve formě bez tohoto chladicího systému **obr. 8.1** (více snímků je uvedeno v příloze). Nicméně drobné defekty stále obsahují.

Forma se v problematickém místě velice prohřívá. Je proto na zváženou, zda neprodloužit délku chlazení daného místa nebo by se mohlo zapnout o chvíli dříve, než dojde k proudění kovu do formy.



Obr. 8.1 Odlitek vyrobené ve formě s chladicím systémem Jet-Cooling

8.2 Úprava taveniny

Chemické složení bylo dle normy, a proto je nutné zaměřit se na kvalitu a úpravu taveniny. Návrhy na změnu:

- použít čistější N_2 pro odplyňování taveniny (místo N_2 4.6 použít N_2 5.0),
- změnit odplyňovací plyn N_2 4.6 za Ar 5.0,
- měření vlhkosti odplyňovacího plynu, naplyňovacího plynu a rafinační soli,
- prodloužení odplyňovacího času,
- zpomalit otáčky odplyňovacího rotoru, a tím omezit víření hladiny,
- hluboce odplynit taveninu pomocí Ar 5.0 a zpětně naplynit pomocí 35 %H_2 v Ar,
- změnit způsob plnění (místo keramické naběračky použít dávkovací pec),
- častější stahování hladiny kovu v udržovací peci.

9. ZÁVĚR

Po vyhodnocení všech rentgenových snímků lze jednoznačně říci, že způsob, jakým byla tavenina upravována, neměl vliv na snížení množství vnitřních vad.

Možné důvody neúspěchu popsaného experimentu:

- krátký odplyňovací čas (tavenina nebyla dostatečně vyčištěná),
- nevhodný odplyňovací plyn N_2 4.6,
- nevhodný naplyňovací plyn 20 % H_2 v N_2,
- velké víření hladiny způsobené rychlým otáčením rotoru,
- forma byla bez chlazení Jet-Cooling.

Hlavním problémem je proudění velkého množství materiálu přes tepelný uzel. Proudící kov ohřívá materiál formy na vysoké teploty, a tím zpomaluje tuhnutí odlitku. Díky pomalému tuhnutí odlitku se vytvoří dostatečně dlouhá doba na to, aby vodík rozpuštěný v kovu difundoval do již vzniklých dutin. Výsledkem takto pomalého tuhnutí jsou vnitřní staženiny a porezita.

Nicméně stále existují možnosti, jak tento efekt omezit nebo úplně odstranit (viz **kap** 8).

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Mirzaei, Behzad. Oxide hydrogen interaction and porosity development in Al-Si foundry alloys. www.diva-portal.org. [Online] září 2011. [Cited: 18 únor 2015.] http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A517109&dswid=-7760.

2. Roučka, Jaroslav.Odlévání neželezných kovů. Brno : CERN, 2006.

3. Seniw, M. E., Conley, J. G. and Fine, M. E. The effect of microscopic inclusion locations and silicon segregation on fatigue lifetimes of aluminum alloy A356 castings. http://www.sciencedirect.com. [Online] 2000. [Cited: 13 březen 2015.] http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509300006638.

4. Campbell, John.Castings. 2. s.l. : Butterworth-Heinemann, 2003. 0080488447, 9780080488448.

5. Gruzleski, John E. and Closset, Bernard M.Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys. s.l. : Amer Foundrymens Society, 1990. ISBN-10:0874331218.

6. Vogel, Wolfgang, Dr, et al. Zabránění vzniku vad odlitků způsobených smršťováním při tuhnutí odlitků prostřednictvím nanooxidů. Slévárentví. Česká slévárenská společnost, 2013, Bd. LXI, S. 11-12.

7. Alba-Baena, Noé, Eskin, Dmitry.Kinetics of ultrasonic degassign of aluminum alloys. www.brunel.ac.uk. [Online] 2013. [Cited: února 18, 2015.] http://www.brunel.ac.uk/__data/assets/pdf_file/0010/296470/TMS_degassing-ch162.pdf.

8. Zemčík, Ladislav, prof. Vodík ve slitinách hliníku. Slévárenství. 2012, Sv. LX.

9. Schumacher, Peter, prof.Gussgefüge und Eigenschaften, Vorlesung 7, Porosity & Micro-shrinkage. Leoben : s.n., 2014.

10. Berylco, NGK. NGK Berylco. NGK Berylco. [Online] NGK Berylco France. [Cited: 3 května 2015.] http://www.ngk-alloys.com/chillvent_data_list2.html.

11. Fondarex. Fondarex swiss vacuum technology. Fondarex swiss vacuum technology. [Online] Fondarex. [Cited: 3 květen 2015.] http://www.fondarex.com/en/produits/fonderie-sous-pression/chill-blocks.

12. —. Fondarex swiss vacuum technology. Fondarex swiss vacuum technology. [Online] Fondarex. [Cited: 3 květen 2015.] http://www.fondarex.com/en/produits/fonderie-sous-pression/valves-de-vide.

13. Foundry-Lexicon. Rotary degassing. Foundry-Lexicon. [Online] Foundry Technologies & Engineering GmbH. [Cited: 16 duben 2015.] http://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/?tx_contagged[source]=default&tx_contagged[uid]=4427&cHash=9a5703beac93fd3b2e3be43e701b5777.

14. ŠEBESTA-služby slévárnám s.r.o. Katalog Leichtmetall Neu Englisch. [Online] [Cited: 6 květen 2015.] http://www.sebestasro.cz/cz/dodavatele/schafer.

15. Schumacher, Peter, prof.Gussgefüge und Eigenschaften, Vorlesung 9, Al-Gusslegierungen. Leoben : s.n., 2014.

16. Ilethiguel. Jet cooling. www.sebestasro.cz. [Online] [Citace: 30. březen 2015.] http://www.sebestasro.cz/cz/get.php?id=221.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Oxidace roztavené slitiny hliníku [2] 10
Obr. 1.2 Reakce Al s vlhkostí (H_2O) za vzniku oxidu hlinitého (Al_2O_3) a vodíku (H_2) [6] 12
Obr. 1.3 Rozpustnost vodíku v čistém hliníku a ve dvou slitinách [4] 14
Obr. 1.4 Rozpustnost vodíku v roztaveném hliníku a obsah vodíku v atmosféře [4] 15
Obr. 1.5 Vliv přísadových prvků na snižování rozpustnosti vodíku v Al-slitině [8] 16
Obr. 1.6 Vliv přísadových prvků na zvyšování rozpustnosti vodíku v Al-slitině [8] 16
Obr. 1.7 Homogenní tvorba pórů v Al slitině [6] 17
Obr. 1.8 a) Heterogenní vznik pórů na nanooxidickém filmu; vodík difunduje do dutiny, která se může vytvořit roztržením krystalové mřížky; b) při ideálním dosazování jsou nanooxidy vestavěny v krystalické mřížce [6] 18
Obr. 1.9 Geometrie bubliny při kontaktu s pevnou a tekutou fází: (a) nízká smáčivost a jednoduché rozpojení taveniny s pevnou fází; (b) střední smáčivost; (c) dobrá smáčivost, při vysoké kohezi taveniny k pevné fázi, a proto je bublina posunutá tak, že je ve větším kontaktu s taveninou než s pevnou fází [1] 19
Obr. 1.10 Poměr mezi kontaktním úhlem a změnou pevné fáze (ze smáčivé na nesmáčivou) při nukleaci pórů, jakmile se překročí úhel cca 65° začne na pevné fázi heterogenní nukleace [9] 20
Obr. 1.11 Poměr mezi koncentrací vodíku, odvodem tepla a porezitou (f_p) [1] 21
Obr. 1.12 Interpretace modelu tvorby oxidických blan [4] 22
Obr. 1.13 Rozdíl kvality mezi filtrovanou a nefiltrovanou slitinou A356 [1] 23
Obr. 1.14 Nepohyblivá část formy s ledvinkami 24
Obr. 1.15 Valcha [10] 24
Obr. 1.16 Odsávaná valcha od firmy Fondarex [11] 25
Obr. 1.17 Vakuační ventily od firmy Fondarex [12] 25
Obr. 1.18 Ukázka umístění vakuačního ventilu na formě společně s celou odvzdušňovací soustavou (modře zbarvená) [11] 25
Obr. 2.1 Osové staženiny vytvořené v tepelné ose 27
Obr. 2.2 Otevřená staženina 27
Obr. 2.3 Uzavřená staženina 28
Obr. 2.4 Bubliny 28
Obr. 3.1 Struska, která vznikla natavením hliníkových housek a vratu v plynové peci, obsahuje velké množství kovového hliníku 30
Obr. 3.2 Suchá struska vytvořená po odplynění a rafinaci (nízký obsah Al a vysoký obsah nečistot) 30
Obr. 3.3 Difuze vodíku z taveniny do bubliny dusíku [9] 31
Obr. 3.4 Princip fungování rotačního odplyňovacího zařízení (na obrázku chybí přívodní trubice rafinační soli) [13] 32
Obr. 3.5 Ukázka víru bublin, vytvořených rotační hlavou [13] 32
Obr. 4.1 Bubliny ve struktuře odlitku vyrobeného nízkotlakým litím z naplyněné slitiny AlSi7Mg0,3 34
Obr. 5.1 Odlitek číslo 65827/00 s červeně vyznačeným místem vzniku vady na snímcích a), b), c), d) 36
Obr. 5.2 Rentgenový snímek odlitku č. 16, DI = 0,50 %, teplota lití = 687 °C 36
Obr. 5.3 Rentgenový snímek odlitku č. 18, DI = 0,50 %, teplota lití = 687 °C 36
Obr. 5.4 Tavící pec StrikoWestofen MH II-T 3000/1500 37
Obr. 5.5 Rotační odplyňovací zařízení Foseco, během provozu 37
Obr. 5.6 Přelévání taveniny z pece do transportní pánve 37
Obr. 5.7 Keramická naběračka při nabírání roztavení slitiny 37
Obr. 5.8 Celá licí stanice: licí stroj TOSHIBA DC800 a vanová pec MARCONI 38
Obr. 5.9 Kovový zálitek 38
Obr. 5.10 Horní (pohyblivá) část formy s nepravým jádrem 39
Obr. 5.11 Spodní (pevná) část formy 39
Obr. 5.12 Teplota odlitku při plném zaplnění dutiny s vyznačeným místem velkého prohřátí 41
Obr. 5.13 Podíl pevné fáze v čase 7,863 s 41
Obr. 5.14 Podíl pevné fáze v čase 25,0390 s 42
Obr. 5.15 Podíl pevné fáze v čase 27,039 s 42
Obr. 5.16 Staženiny/porezita v místech s rychlejším tuhnutím, v ledvinkách 43

Obr. 5.17 Pravděpodobný začátek vzniku staženiny/porezity ve zkoumané oblasti 43
Obr. 5.18 Maximální předpokládaná velikost staženin a porezity v odlitku 44
Obr. 5.19 Nezaplněná místa ve kterých zůstává uzavřený vzduch (modrá) 44
Obr. 5.20 Plnění formy rozdělené podle jednotlivých zářezů 45
Obr. 5.21 Plnění formy v čase 0,2676 s 45
Obr. 5.22 Ukazatel Niyama vyznačující místa ohrožená vznikem propadliny (fialová) 46
Obr. 6.1 Zkoumaná část odlitku V65827 47
Obr. 6.2 Tavenina před odplyněním, na hladině je viditelná struska s vysokým obsahem kovového Al....48
Obr. 6.3 Tavenina během naplyňování, bouřlivá reakce na hladině je způsobena vyplavováním vodíku na hladinu 48
Obr. 6.4 Tavenina po odplynění a zpětném naplynění, na hladině je suchá struska (nízký obsah Al a vysokým podílem nečistot)....49
Obr. 6.5 Impregnační prášek 49
Obr. 6.6 Zařízení pro tuhnutí vzorku za sníženého tlaku 49
Obr. 6.7 Váha k měření rozdílu hustoty 50
Obr. 6.8 Hodnoty DI u slitiny v udržovací peci upravené 1. režimem (240 s) 52
Obr. 6.9 Hodnoty DI u slitiny v udržovací peci upravené 1. režimem (240 s) 52
Obr. 6.10 Hodnoty DI u slitiny v udržovací peci upravené 2. režimem (50+180 s) 54
Obr. 6.11 Hodnoty DI u slitiny v udržovací peci upravené 3. režimem (50+240 s) 56
Obr. 6.12 Hodnoty DI u slitiny v udržovací peci upravené 3. režimem (50+240 s) 56
Obr. 6.13 Přípravek na výrobu vzorku pro chemickou analýzu 57
Obr. 6.14 Odlitek s červeně vyznačenými řezy 59
Obr. 6.15 Rentgenový snímek odlitku č. 67, DI = 0,91 %, teplota lití = 698 °C 60
Obr. 6.16 Rentgenový snímek odlitku č. 143, DI = 0,27 %, teplota lití = 687 °C 60
Obr. 6.17 Rentgenový snímek odlitku č. 93, DI = 0,90 %, teplota lití = 695 °C 60
Obr. 6.18 Rentgenový snímek odlitku č. 38, DI = 1,06 %, teplota lití = 689 °C 60
Obr. 6.19 Rentgenový snímek odlitku č. 69, DI = 0,91 %, teplota lití = 689 °C 61
Obr. 6.20 Rentgenový snímek odlitku č. 62, DI = 3,94 %, teplota lití = 688 °C 61
Obr. 6.21 Rentgenový snímek odlitku č. 27, DI = 2,73 %, teplota lití = 686 °C 61
Obr. 6.22 Rentgenový snímek odlitku č. 3, DI = 2,65 %, teplota lití = 690 °C 61
Obr. 6.23 Levá část 63
Obr. 6.24 Pravá část 63
Obr. 6.25 Detail vady levé části 63
Obr. 6.26 Detail vady pravé části 63
Obr. 6.27 Rentgenový snímek vady 63
Obr. 6.28 Levá část 64
Obr. 6.29 Pravá část 64
Obr. 6.30 Detail vady 64
Obr. 6.31 Detail vady 64
Obr. 6.32 Rentgenový snímek vady 64
Obr. 8.1 Odlitek vyrobené ve formě s chladicím systémem Jet-Cooling 67

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1-1 Zdroje nečistot ve slitinách hliníku [4]. 11
Tabulka 1-2 Rozpustnost vodíku ve vybraných binárních slitina Al-Si a Al-Cu [5]. 13
Tabulka 1-3 Tvary čtyř různých druhů pórů [1]. 21
Tabulka 6-1 DI hodnoty taveniny odebrané z tavící pece a upravené 1. režimem. 50
Tabulka 6-2 DI hodnoty DI taveniny odebrané z udržovací pece a upravené 1. režimem. 51
Tabulka 6-3 DI hodnoty taveniny odebrané z tavící pece a upravené 2. režimem. 53
Tabulka 6-4 DI hodnoty u taveniny odebrané z udržovací pece a upravené 2. režimem. 53
Tabulka 6-5 DI hodnoty taveniny odebrané z tavící pece a upravené 3. režimem. 54
Tabulka 6-6 DI hodnoty taveniny odebrané z udržovací pece a upravené 3. režimem. 55
Tabulka 6-7Chemické složení všech odebraných vzorku ze slitiny AlSi9Cu3 58

SEZNAM PŘÍLOH

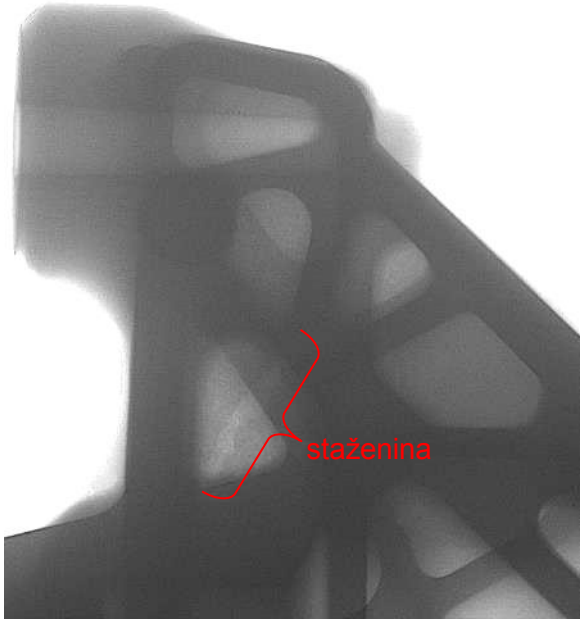
Příloha č. 1: Ukázka řezání odlitků pomocí pásové pily.
Příloha č. 2: Vybrané snímky odlitků upravených 1. režimem (240 s).
Příloha č. 3: Vybrané snímky odlitků upravených 1. režimem (240 s).
Příloha č. 4: Vybrané snímky odlitků upravených 3. režimem (50+240 s).
Příloha č. 5: Vybrané snímky odlitků upravených 3. režimem (50+240 s).
Příloha č. 6: Snímky vady nalezené v odlitku č. 2A, odplyňován 240 s.
Příloha č. 7: Snímky vady nalezené v odlitku č. 3A, odplyňován 240 s.
Příloha č. 8: Snímky vady nalezené v odlitku č. 7A, odplyňován 240 s.
Příloha č. 9: Snímky vady nalezené v odlitku č. 8A, odplyňován 240 s.
Příloha č. 10: Snímky vady nalezené v odlitku č. 9A, odplyňován 240 s.
Příloha č. 11: Snímky vady nalezené v odlitku č. 11A, odplyňován 240 s.
Příloha č. 12: Snímky vady nalezené v odlitku č. 14A, odplyňován 240 s.
Příloha č. 13: Snímky vady nalezené v odlitku č. 15A, odplyňován 240 s.
Příloha č. 14: Snímky vady nalezené v odlitku č. 4B, úprava 50+240 s.
Příloha č. 15: Snímky vady nalezené v odlitku č. 5B, úprava 50+240 s.
Příloha č. 16: Snímky vady nalezené v odlitku č. 8B, úprava 50+240 s.
Příloha č. 17: Snímky vady nalezené v odlitku č. 9B, úprava 50+240 s.
Příloha č. 18: Snímky vady nalezené v odlitku č. 12B, úprava 50+240 s.
Příloha č. 19: Snímky vady nalezené v odlitku č. 13B, úprava 50+240 s.
Příloha č. 20: Snímky vady nalezené v odlitku č. 14B, úprava 50+240 s.
Příloha č. 21: Snímky vady nalezené v odlitku č. 15B, úprava 50+240 s.
Příloha č. 22: Snímky vady nalezené v odlitku č. 17B, úprava 50+240 s.
Příloha č. 23: Snímky vady nalezené v odlitku č. 20B, úprava 50+240 s.
Příloha č. 24: Ilustrační schéma chladicího systému Jet-Cooling[16].
Příloha č. 25: Rentgenové snímky odlitků vyrobených ve formě chlazené systémem Jet-Cooling.

Příloha č. 1: Ukázka řezání odlitků pomocí pásové pily.

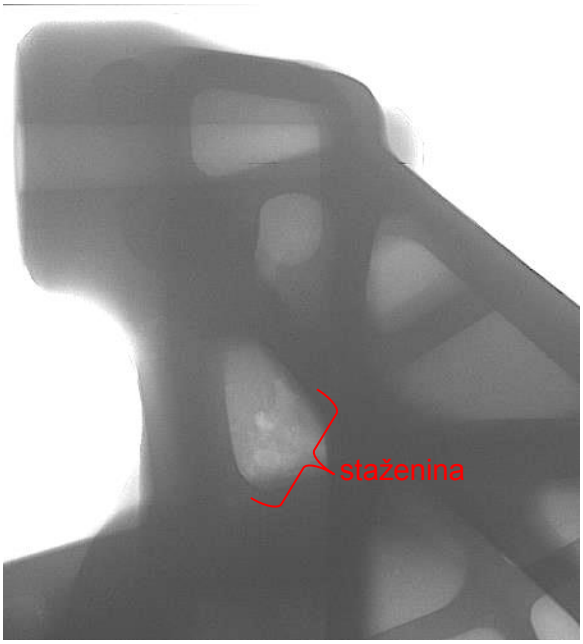
Boční pohled na část odlitku s vyznačenou dráhou řezu

Horní pohled na řez

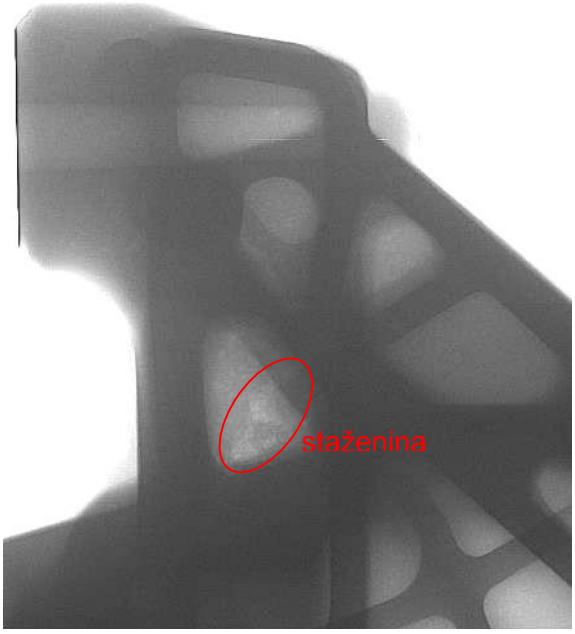
Příloha č. 2: Vybrané snímky odlitků upravených 1. režimem (240 s).



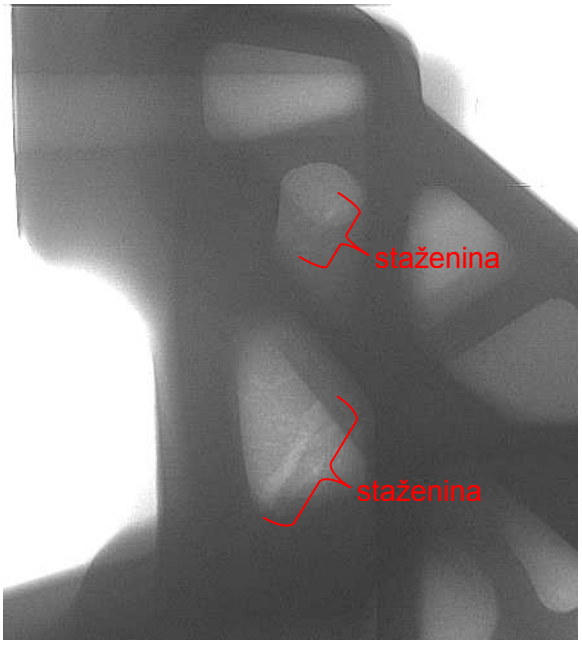
Rentgenový snímek odlitku č. 95,
DI = 0,90 %, teplota lití = 695 °C



Rentgenový snímek odlitku č. 13,
DI = 0,81 %, teplota lití = 688 °C

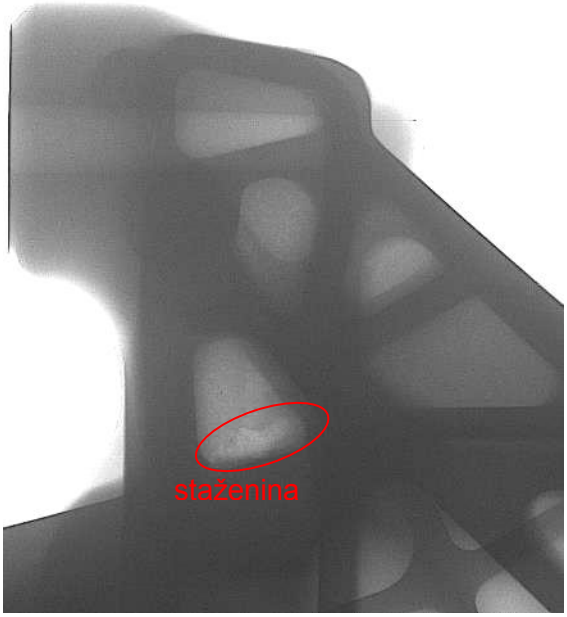


Rentgenový snímek odlitku č. 26,
DI = 0,95 %, teplota lití = 687 °C

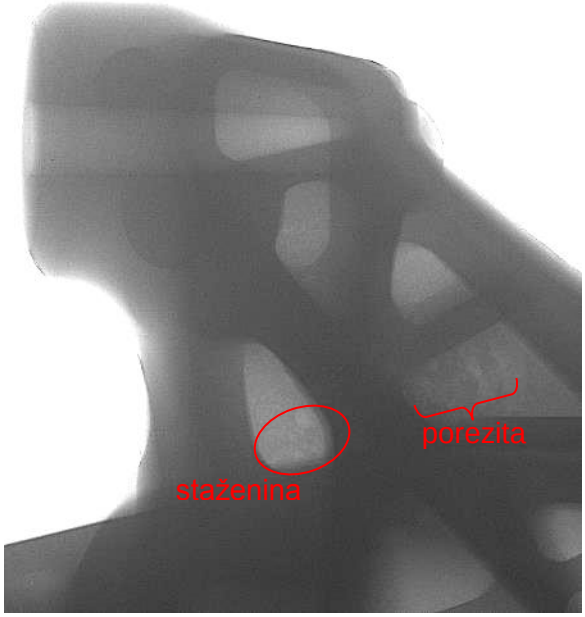


Rentgenový snímek odlitku č. 48,
DI = 0,79 %, teplota lití = 691 °C

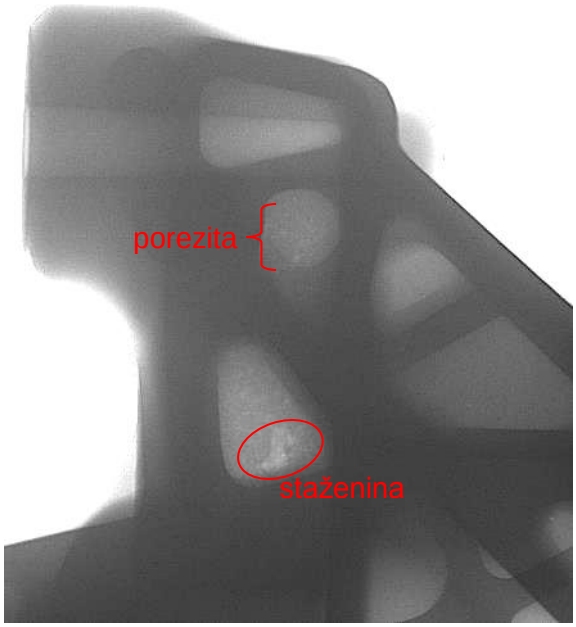
Příloha č. 3: Vybrané snímky odlitků upravených 1. režimem (240 s).



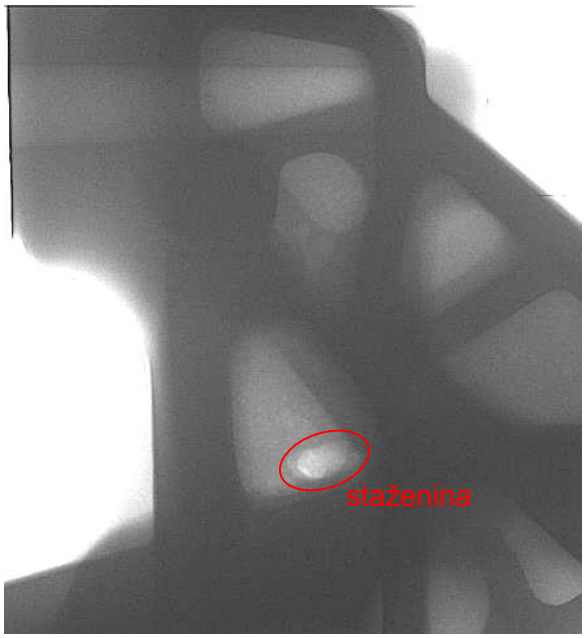
Rentgenový snímek odlitku č. 123,
DI = 0,93 %, teplota lití = 690 °C



Rentgenový snímek odlitku č. 110,
DI = 0,67 %, teplota lití = 692 °C

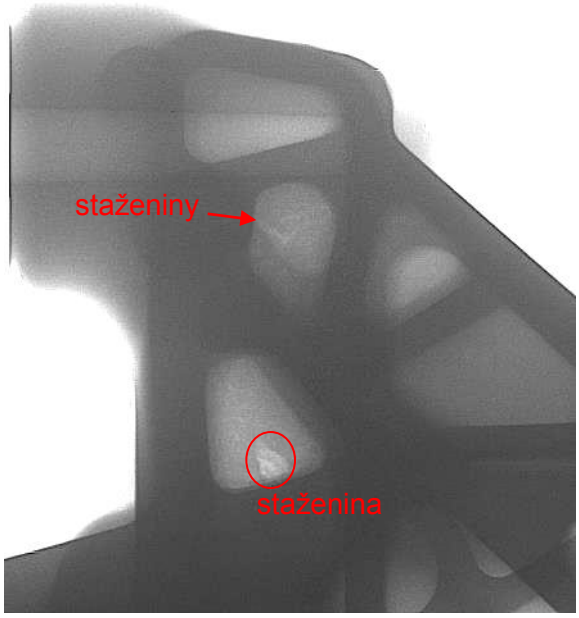


Rentgenový snímek odlitku č. 106,
DI = 0,36 %, teplota lití = 700 °C

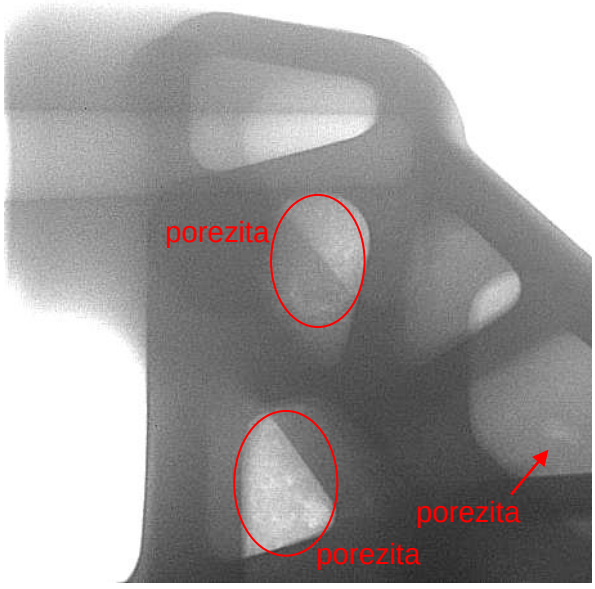


Rentgenový snímek odlitku č. 38,
DI = 0,91 %, teplota lití = 687 °C

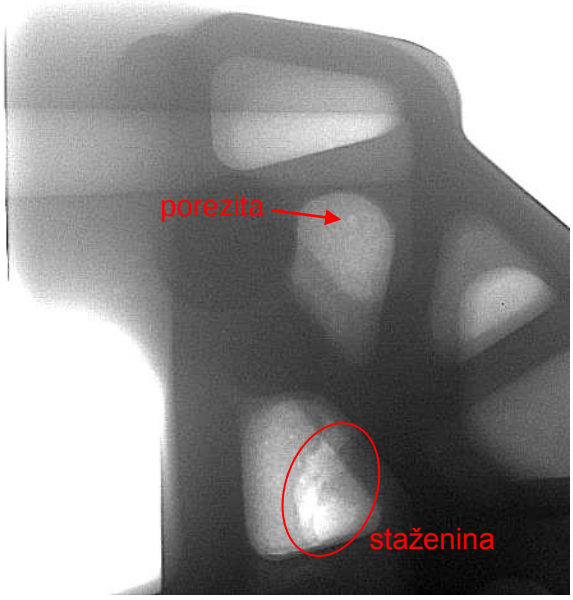
Příloha č. 4: Vybrané snímky odlitků upravených 3. režimem (50+240 s).



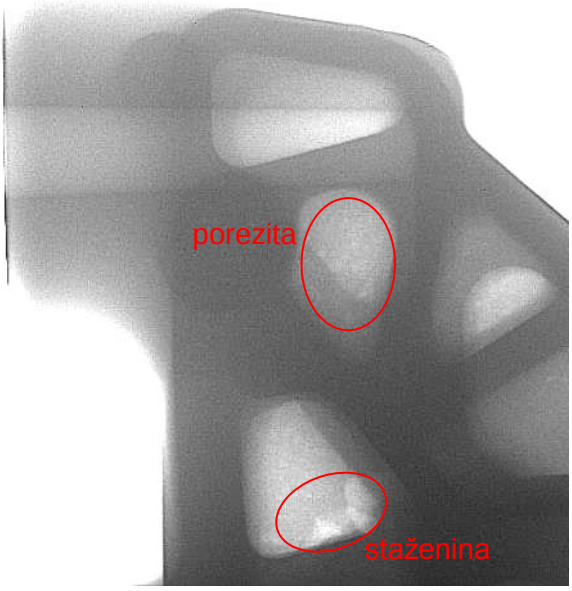
Rentgenový snímek odlitku č. 1,
DI = 2,65 %, teplota lití = 690 °C



Rentgenový snímek odlitku č. 71,
DI = 5,32 %, teplota lití = 689 °C

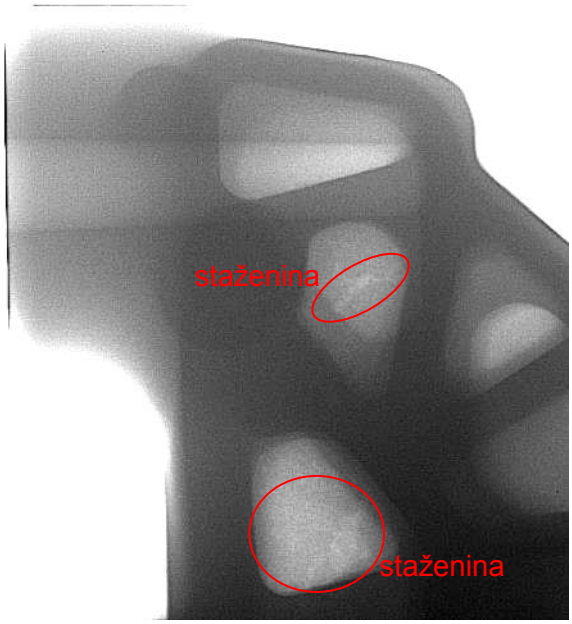


Rentgenový snímek odlitku č. 18,
DI = 2,96 %, teplota lití = 687 °C

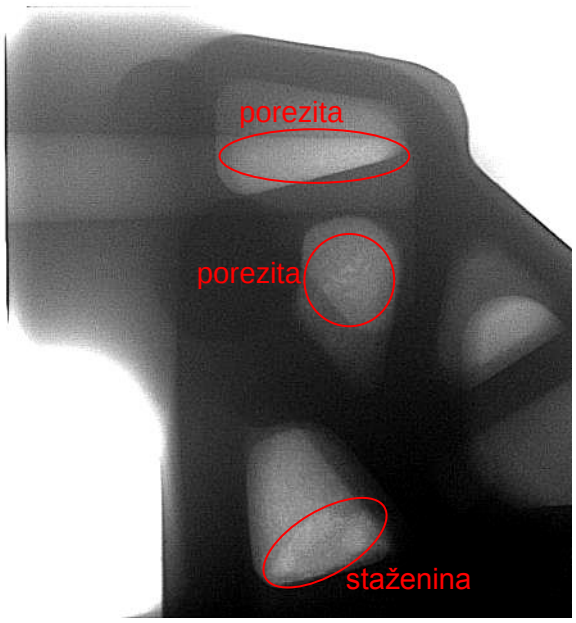


Rentgenový snímek odlitku č. 42,
DI = 3,68 %, teplota lití = 685 °C

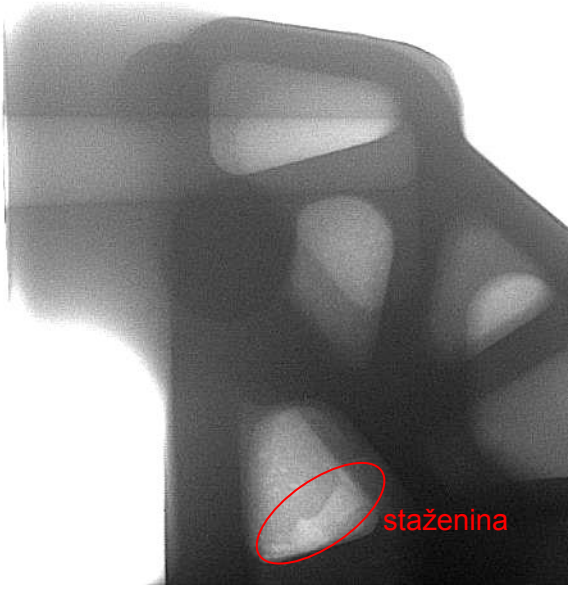
Příloha č. 5: Vybrané snímky odlitků upravených 3. režimem (50+240 s).



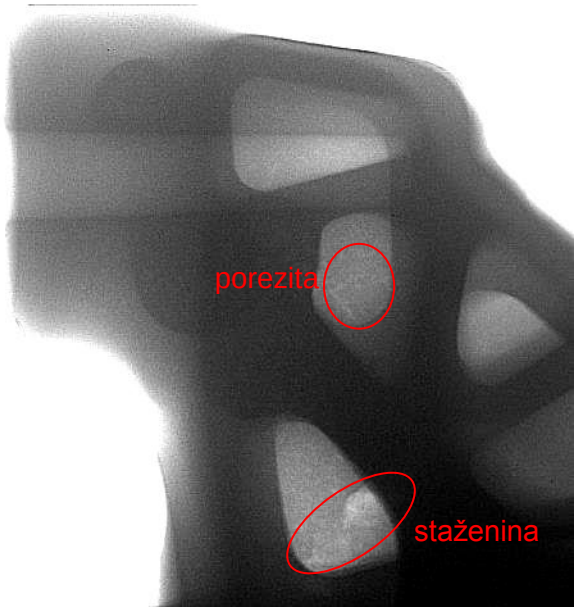
Rentgenový snímek odlitku č. 55,
DI = 3,82 %, teplota lití = 686 °C



Rentgenový snímek odlitku č. 51,
DI = 3,29 %, teplota lití = 686 °C

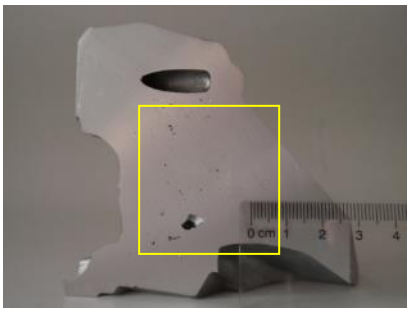


Rentgenový snímek odlitku č. 35,
DI = 3,10 %, teplota lití = 687 °C

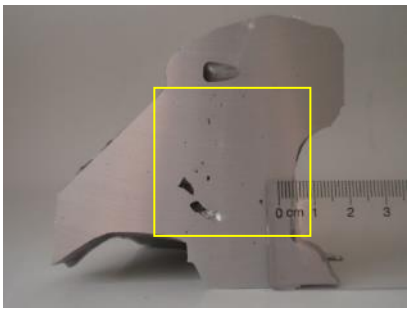


Rentgenový snímek odlitku č. 27,
DI = 2,73 %, teplota lití = 686 °C

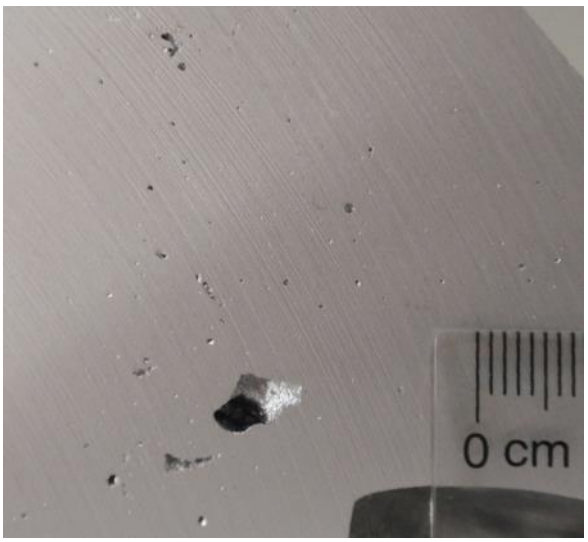
Příloha č. 6: Snímky vady nalezené v odlitku č. 2A, odplyňován 240 s.



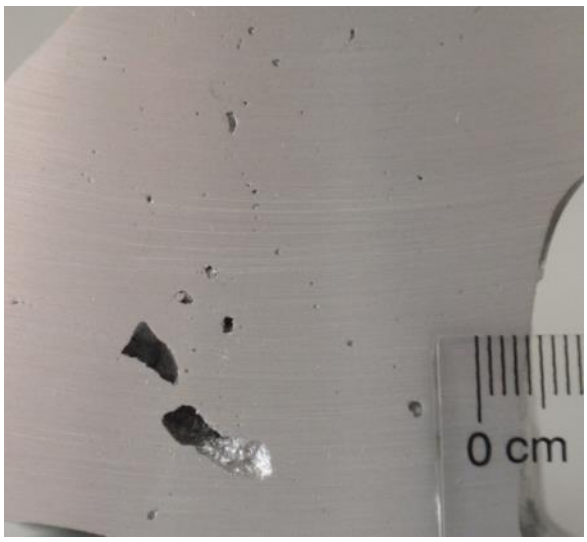
Levá část



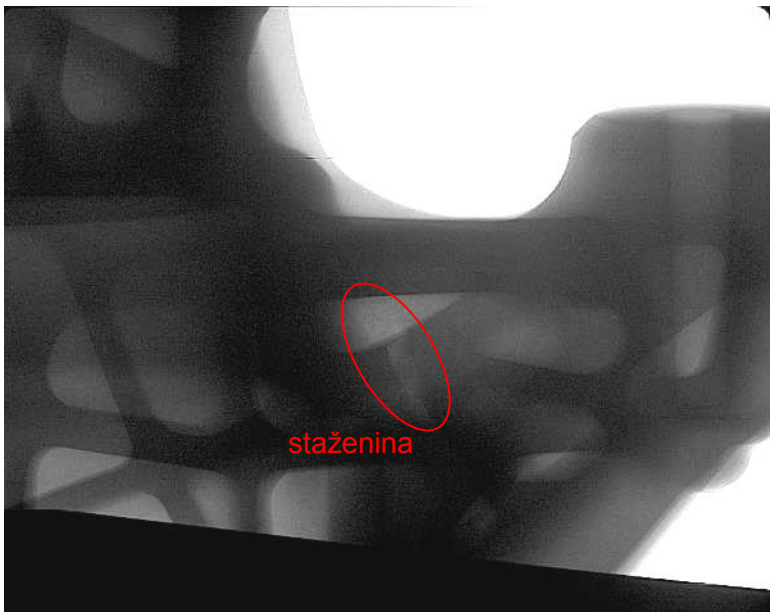
Pravá část



Detail vady levé části

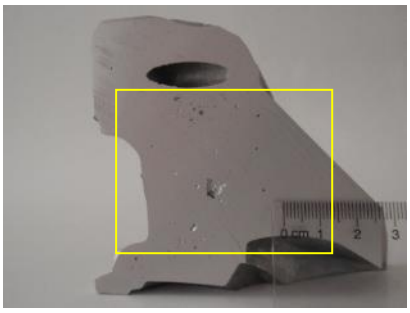


Detail vady pravé části

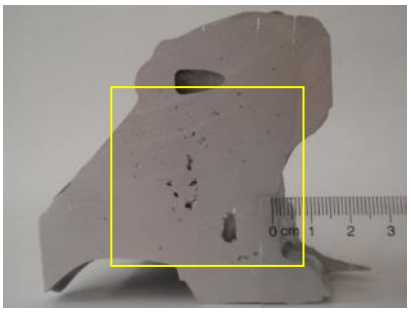


Rentgenový snímek vady

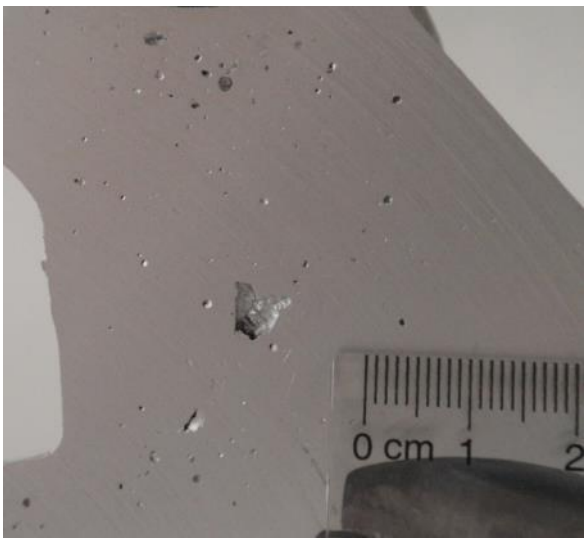
Příloha č. 7: Snímky vady nalezené v odlitku č. 3A, odplyňován 240 s.



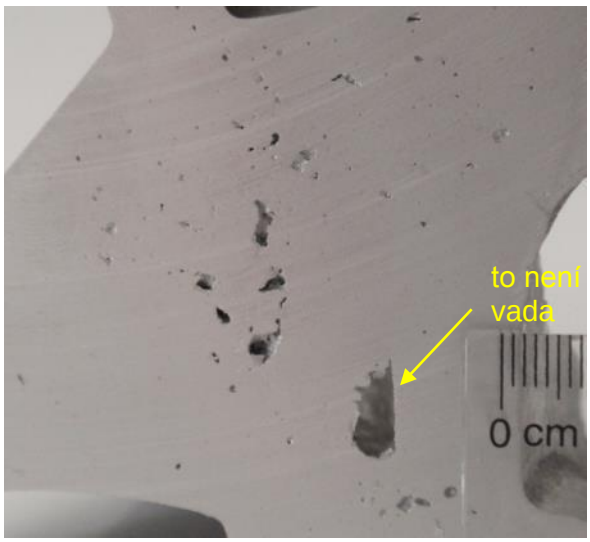
Levá část



Pravá část

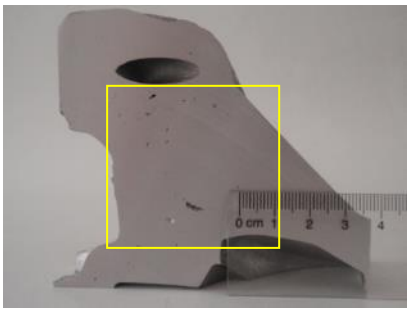


Detail vady levé části

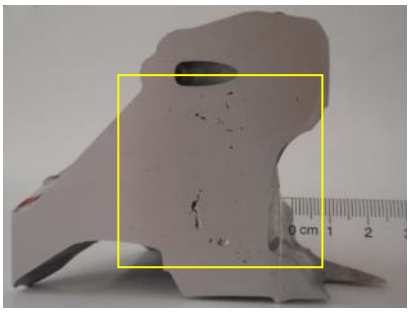


Detail vady pravé části

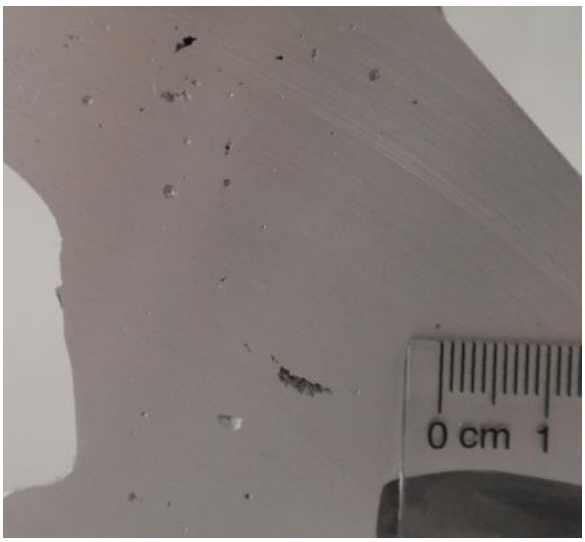
Příloha č. 8: Snímky vady nalezené v odlitku č. 7A, odplyňován 240 s.



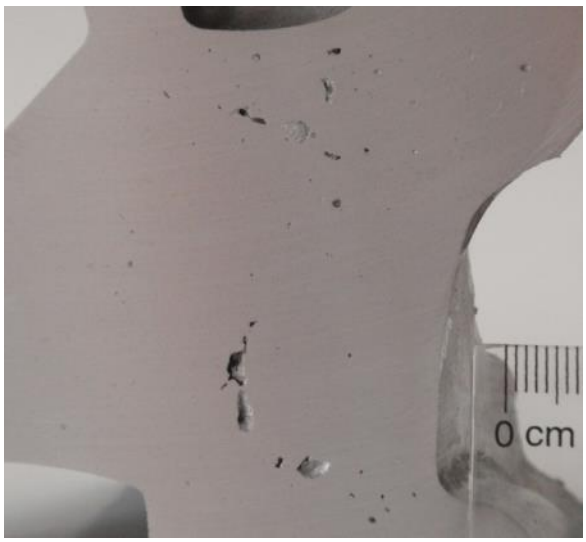
Levá část



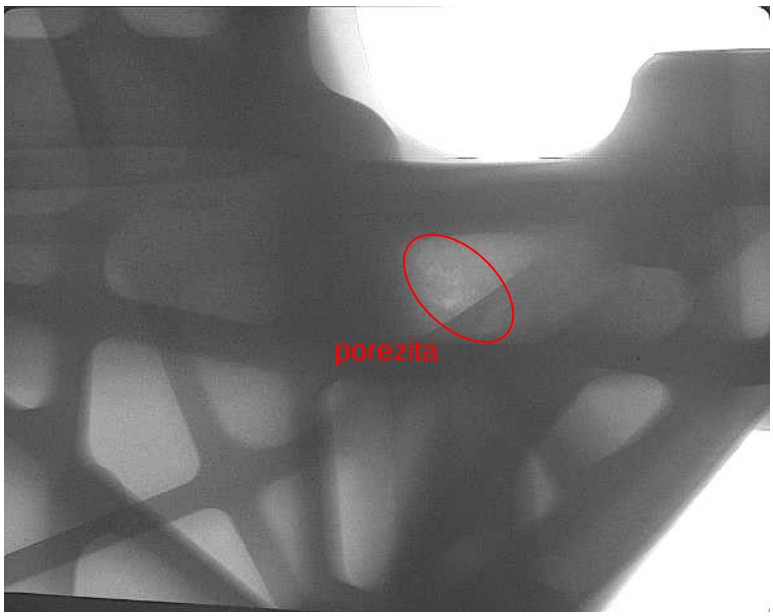
Pravá část



Detail vady levé části

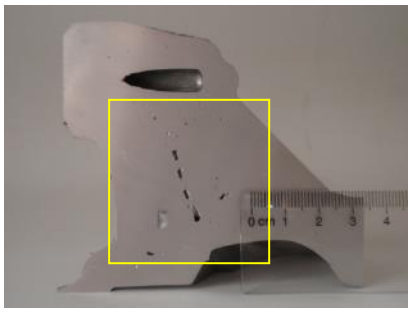


Detail vady pravé části

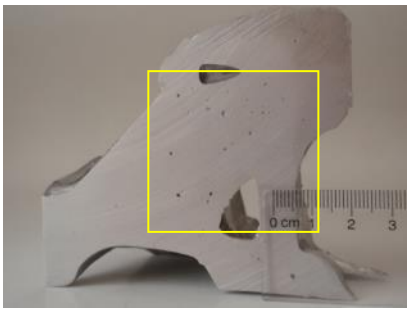


Rentgenový snímek vady

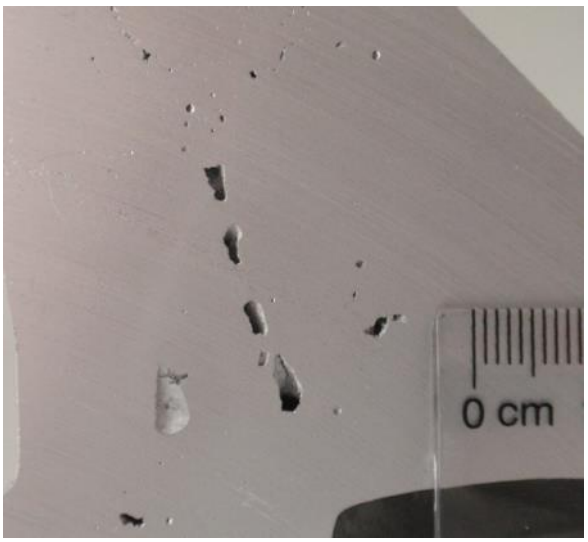
Příloha č. 9: Snímky vady nalezené v odlitku č. 8A, odplyňován 240 s.



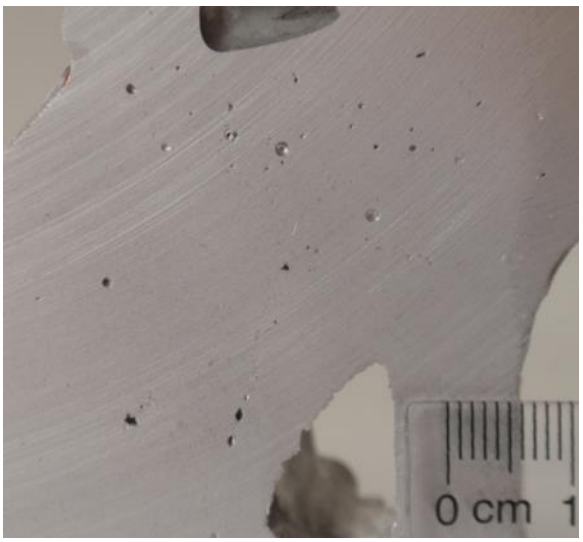
Levá část



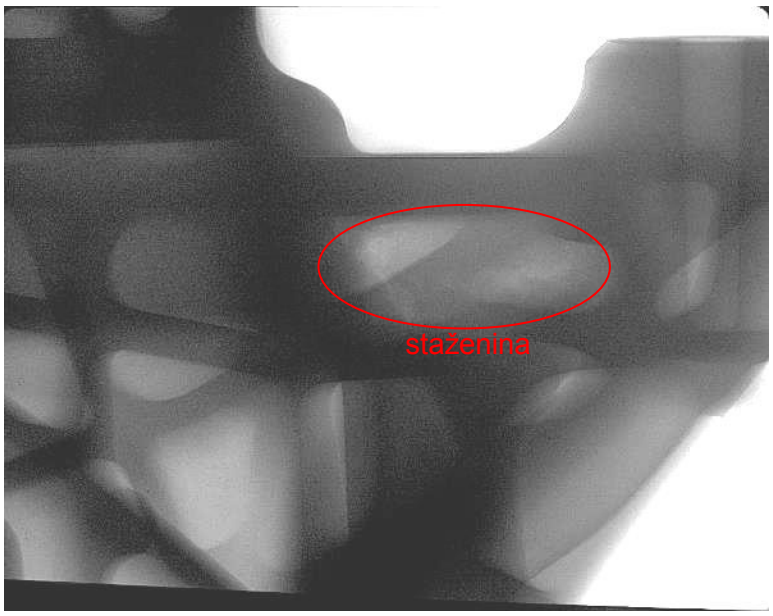
Pravá část



Detail vady levé části

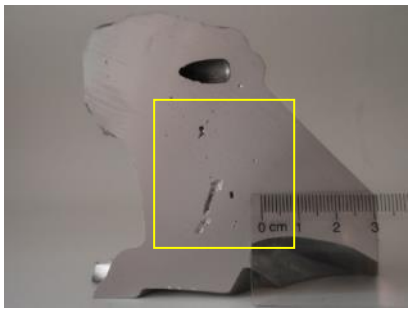


Detail vady pravé části

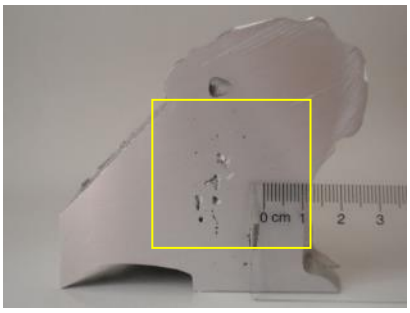


Rentgenový snímek vady

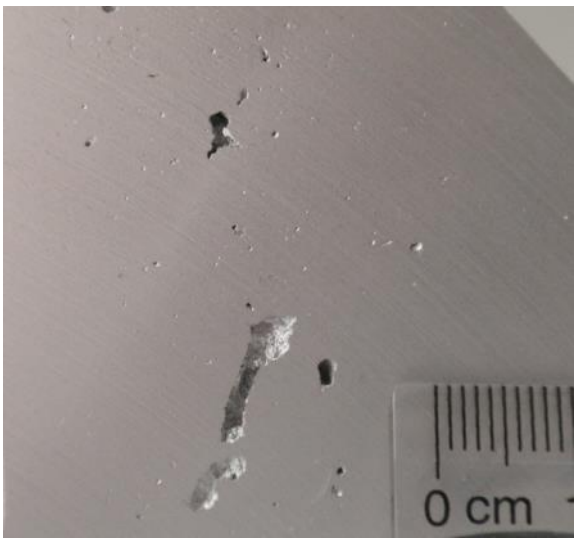
Příloha č. 10: Snímky vady nalezené v odlitku č. 9A, odplyňován 240 s.



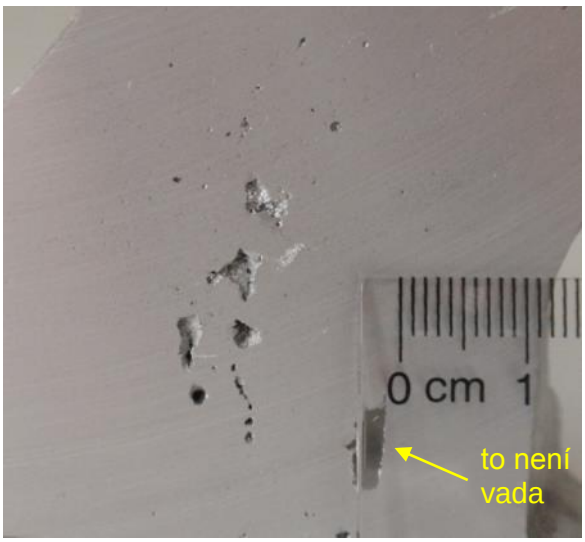
Levá část



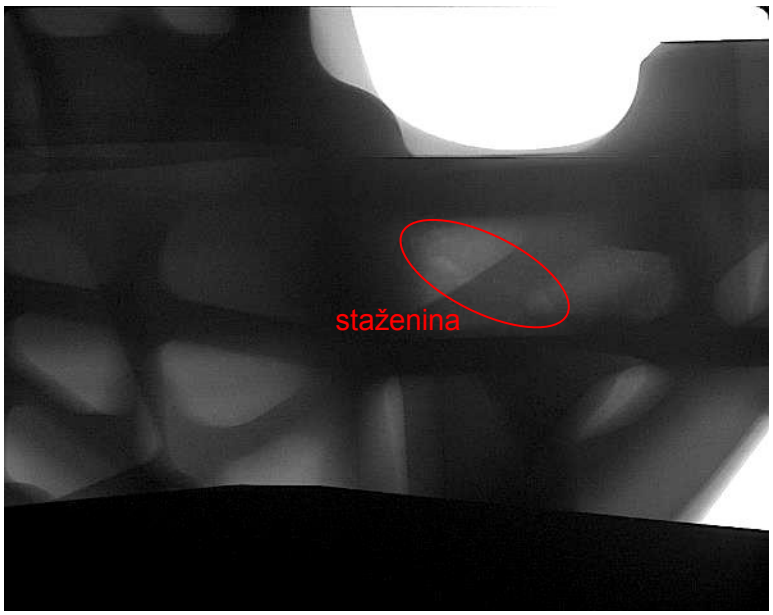
Pravá část



Detail vady levé části

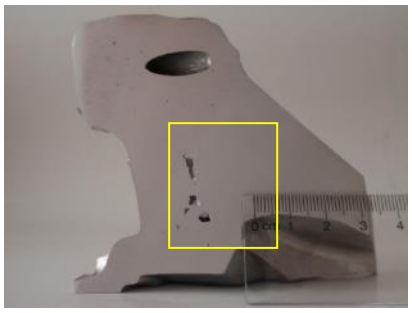


Detail vady pravé části

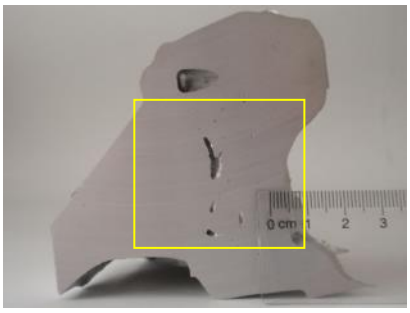


Rentgenový snímek vady

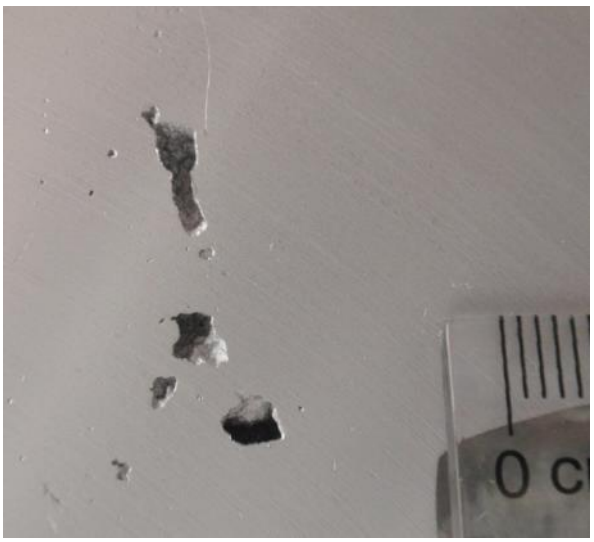
Příloha č. 11: Snímky vady nalezené v odlitku č. 11A, odplyňován 240 s.



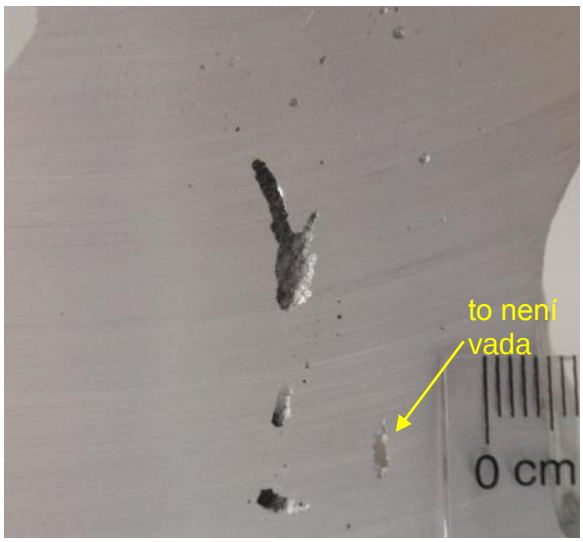
Levá část



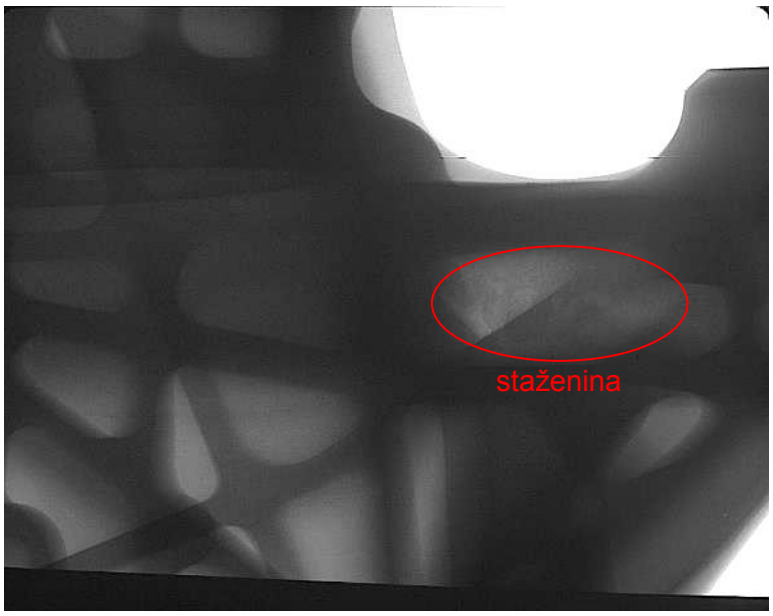
Pravá část



Detail vady levé části

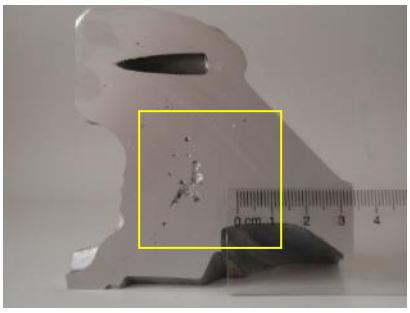


Detail vady pravé části

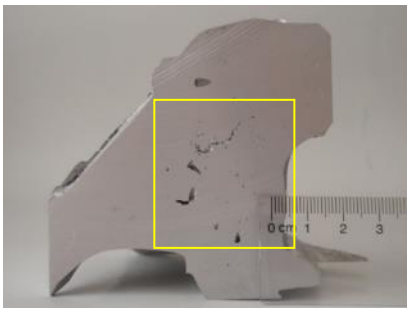


Rentgenový snímek vady

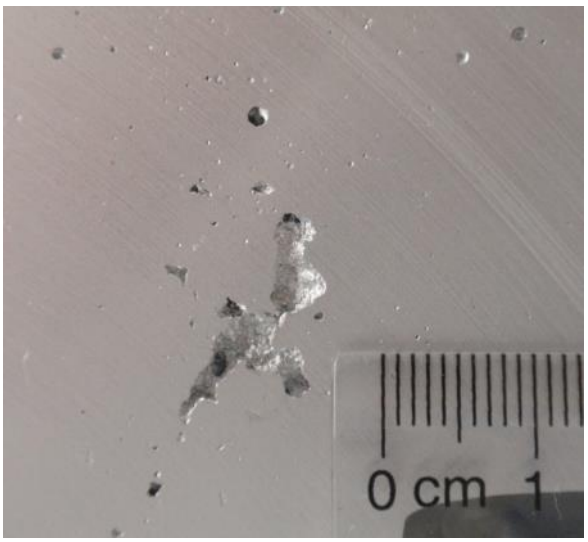
Příloha č. 12: Snímky vady nalezené v odlitku č. 14A, odplyňován 240 s.



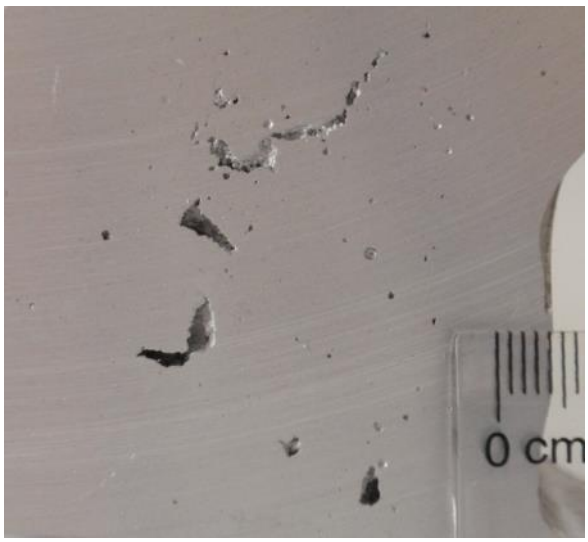
Levá část



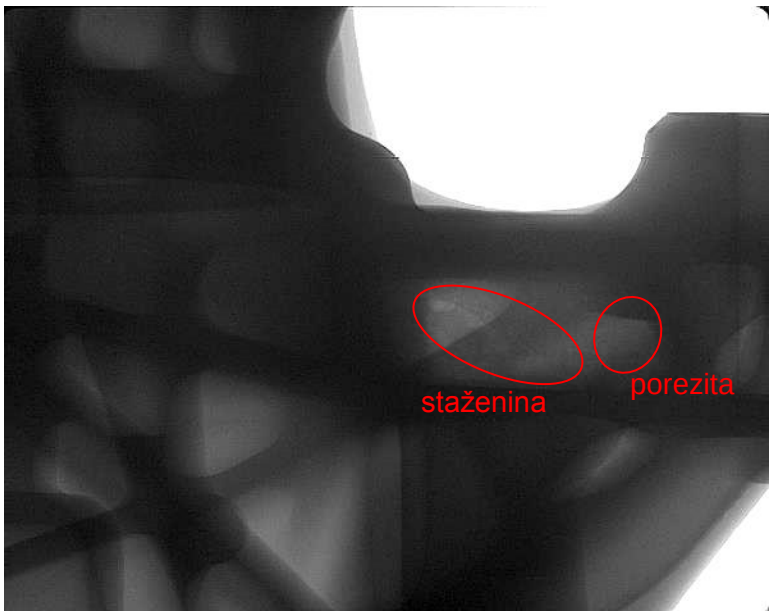
Pravá část



Detail vady levé části

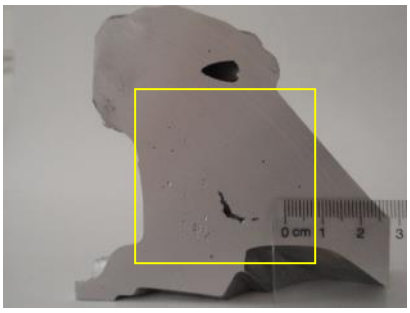


Detail vady pravé části

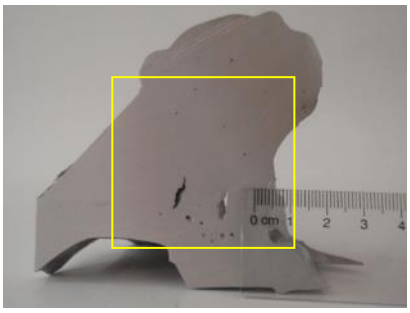


Rentgenový snímek vady

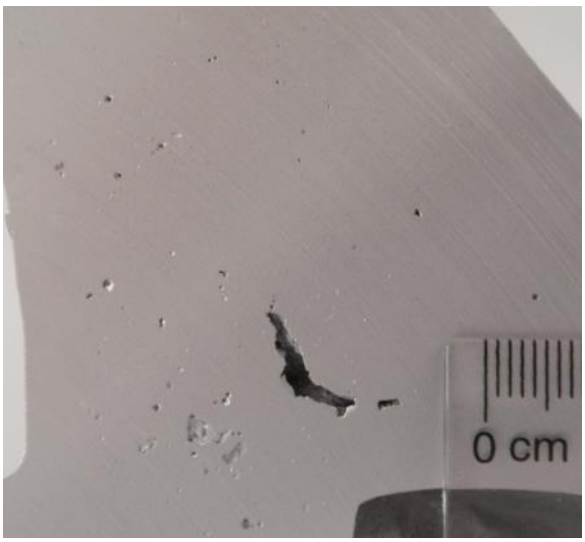
Příloha č. 13: Snímky vady nalezené v odlitku č. 15A, odplyňován 240 s.



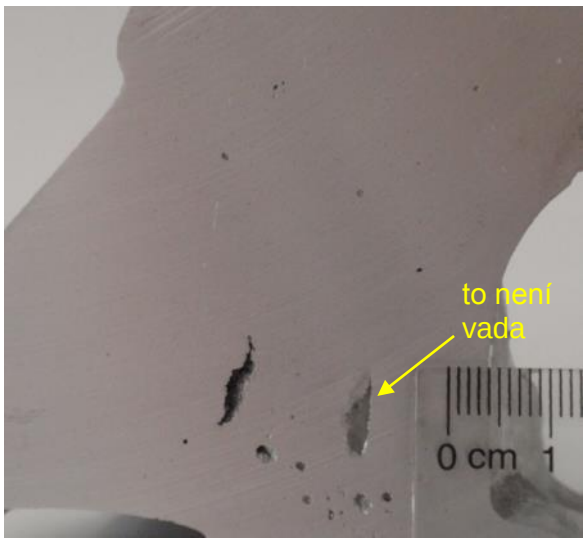
Levá část



Pravá část



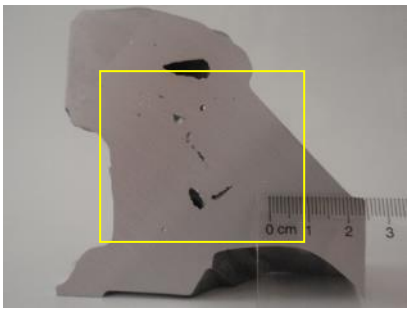
Detail vady levé části



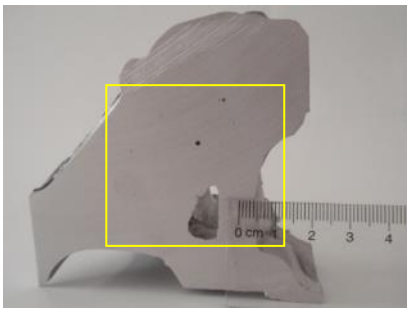
Detail vady pravé části

Rentgenový snímek vady

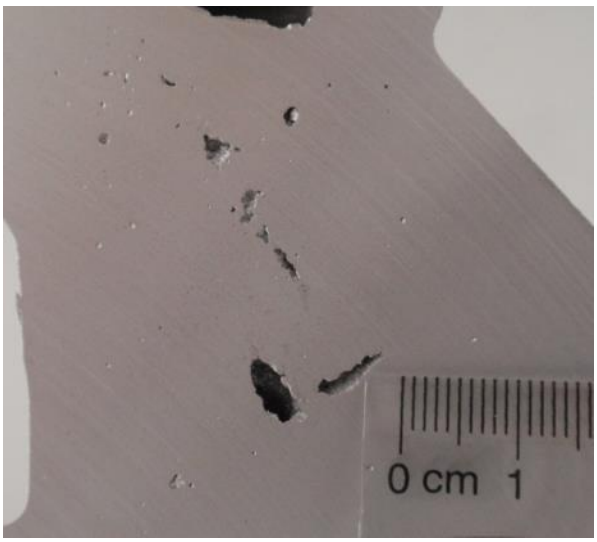
Příloha č. 14: Snímky vady nalezené v odlitku č. 4B, úprava 50+240 s.



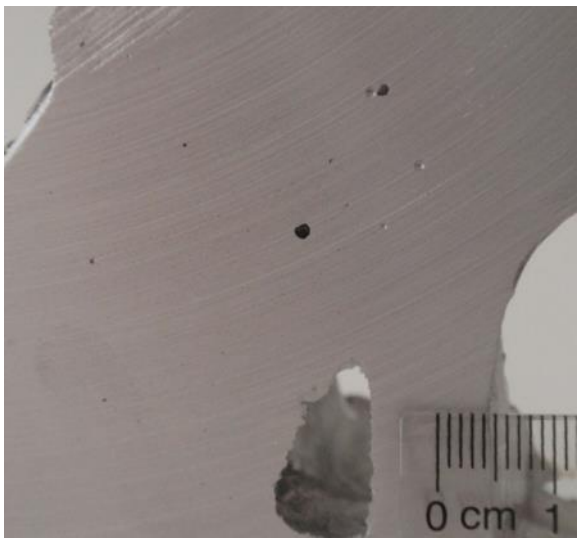
Levá část



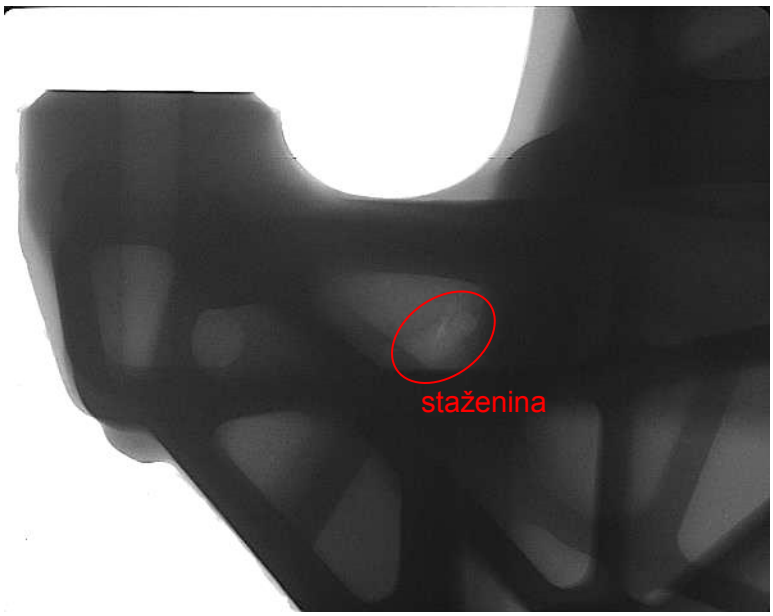
Pravá část



Detail vady levé části

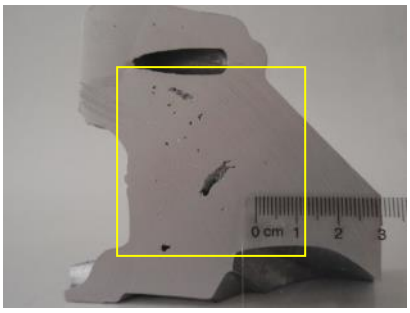


Detail vady pravé části

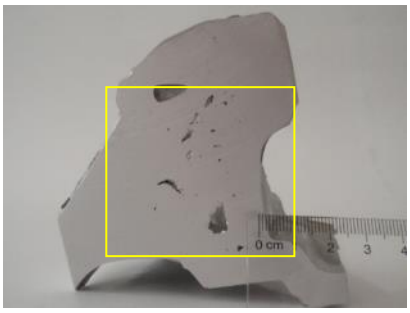


Rentgenový snímek vady

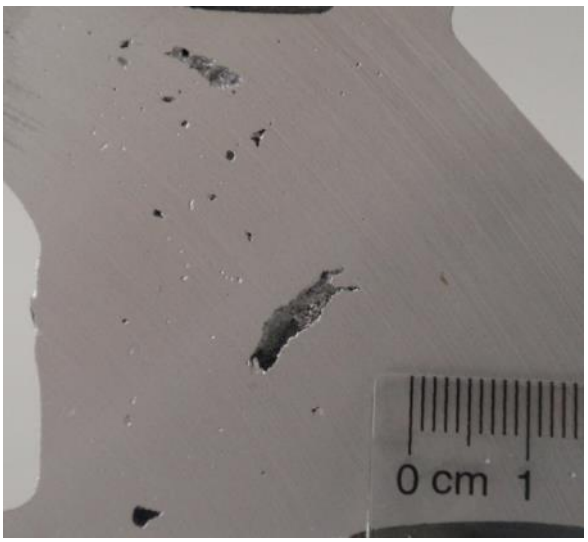
Příloha č. 15: Snímky vady nalezené v odlitku č. 5B, úprava 50+240 s.



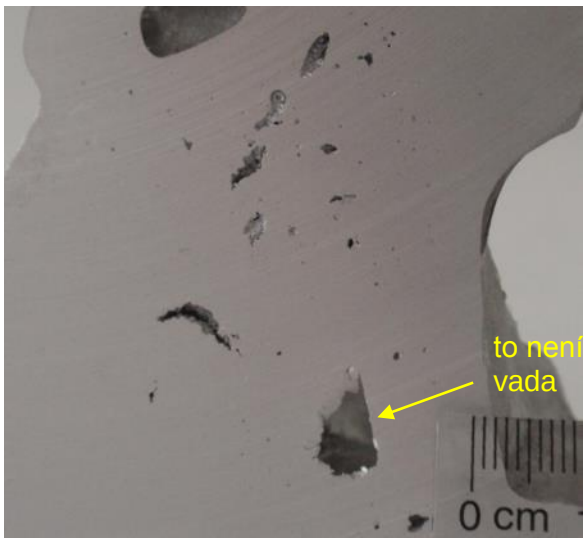
Levá část



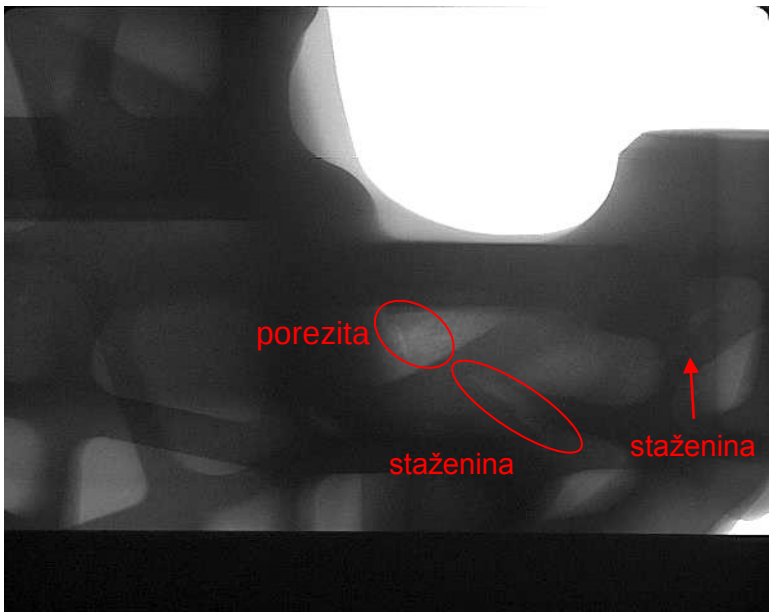
Pravá část



Detail vady levé části

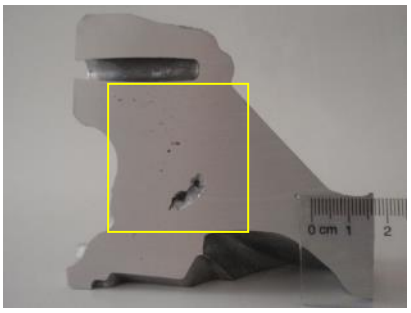


Detail vady pravé části

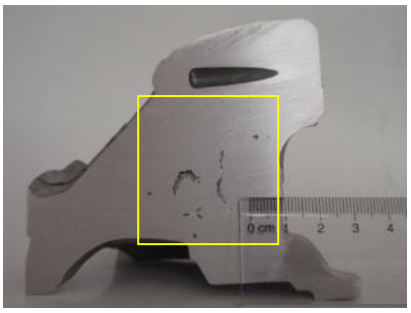


Rentgenový snímek vady

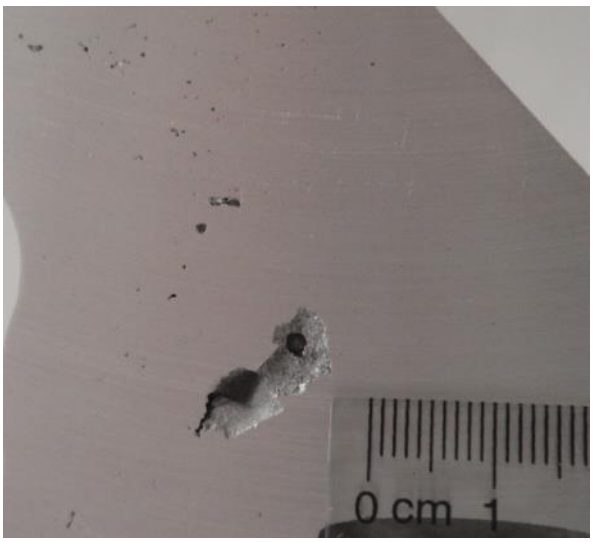
Příloha č. 16: Snímky vady nalezené v odlitku č. 8B, úprava 50+240 s.



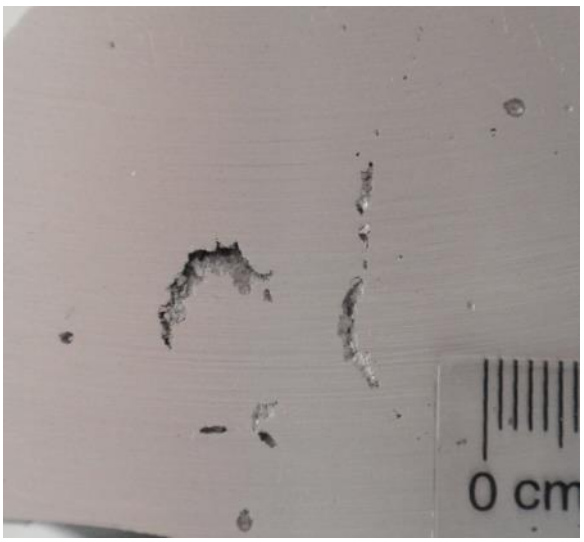
Levá část



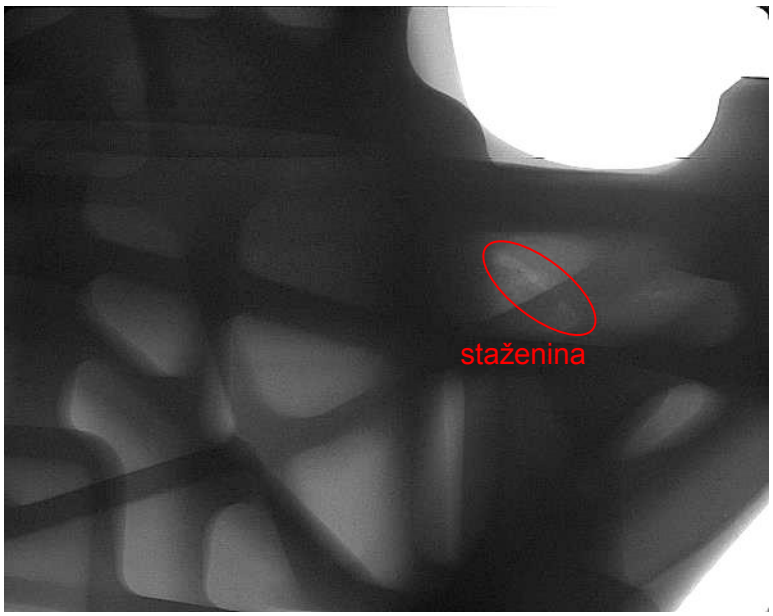
Pravá část



Detail vady levé části

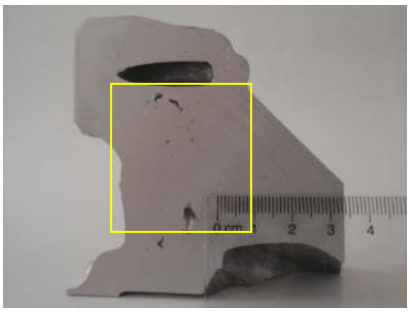


Detail vady pravé části

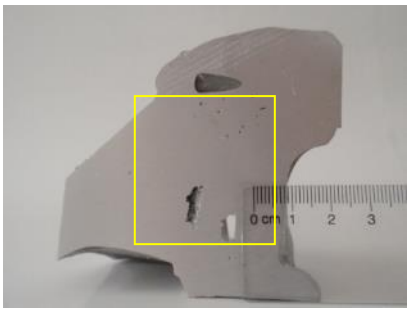


Rentgenový snímek vady

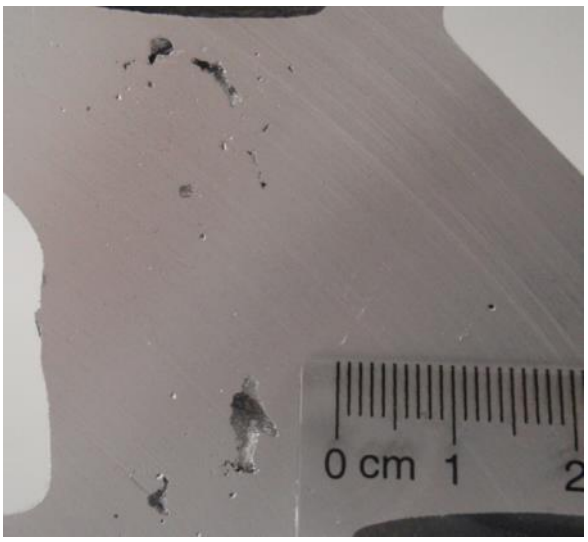
Příloha č. 17: Snímky vady nalezené v odlitku č. 9B, úprava 50+240 s.



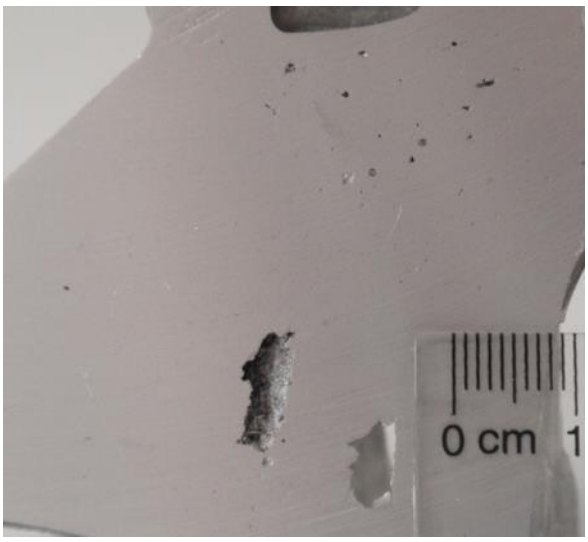
Levá část



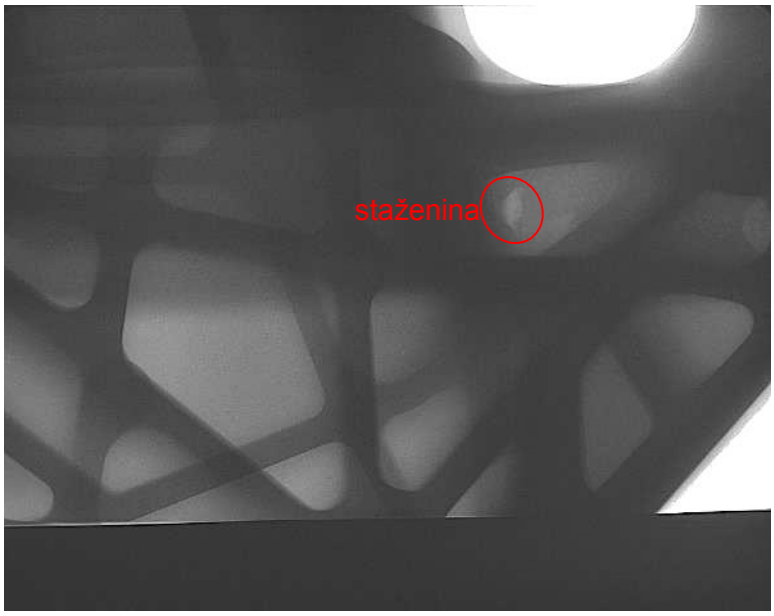
Pravá část



Detail vady levé části

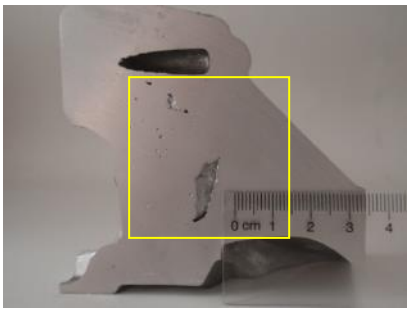


Detail vady pravé části

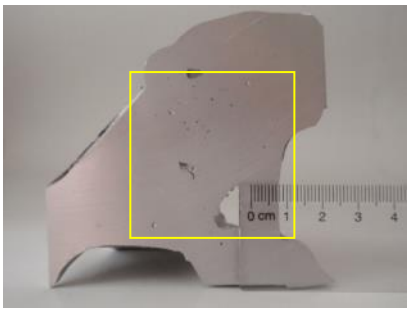


Rentgenový snímek vady

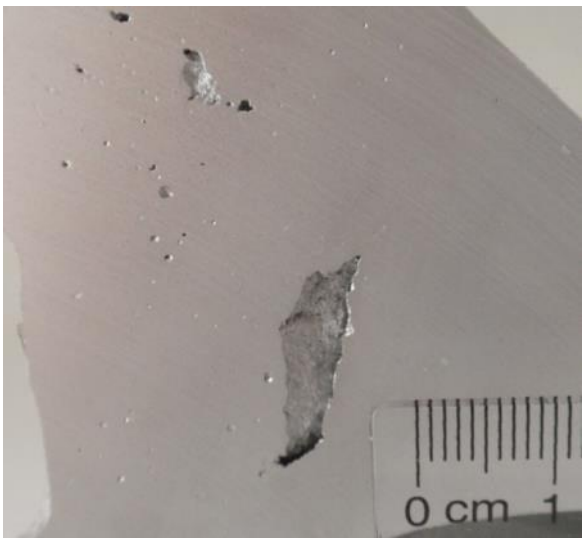
Příloha č. 18: Snímky vady nalezené v odlitku č. 12B, úprava 50+240 s.



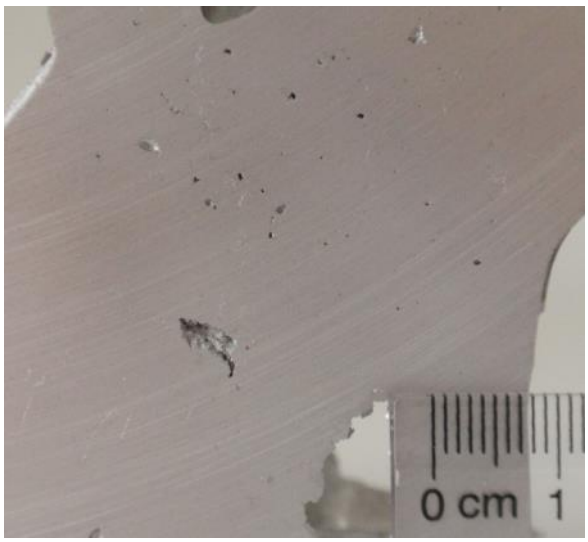
Levá část



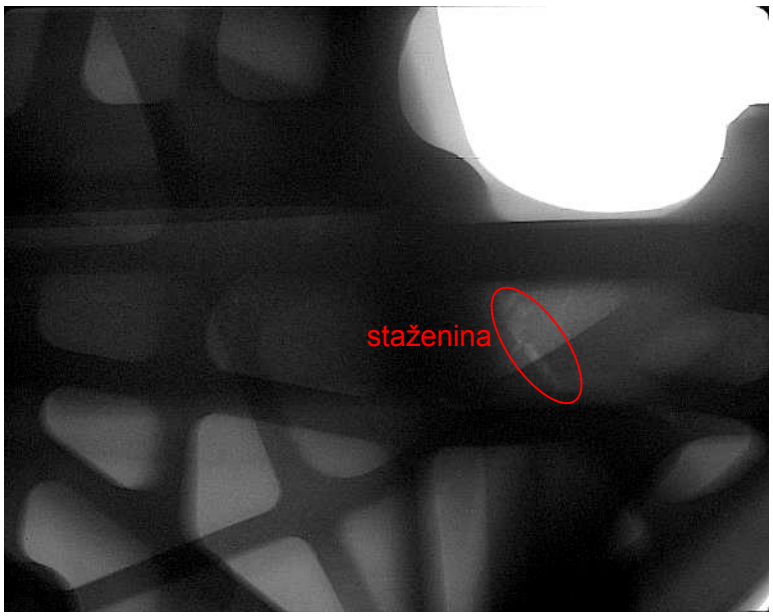
Pravá část



Detail vady levé části

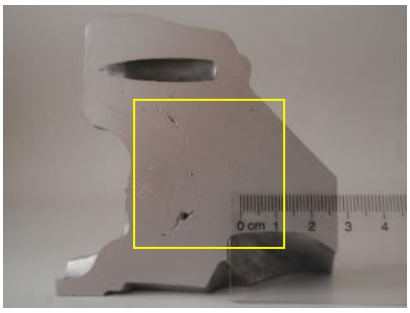


Detail vady pravé části

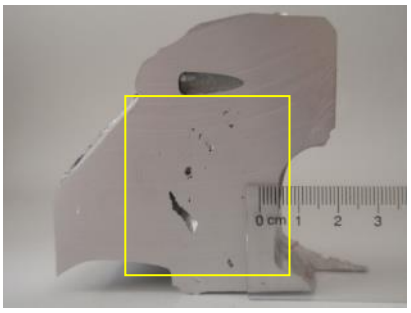


Rentgenový snímek vady

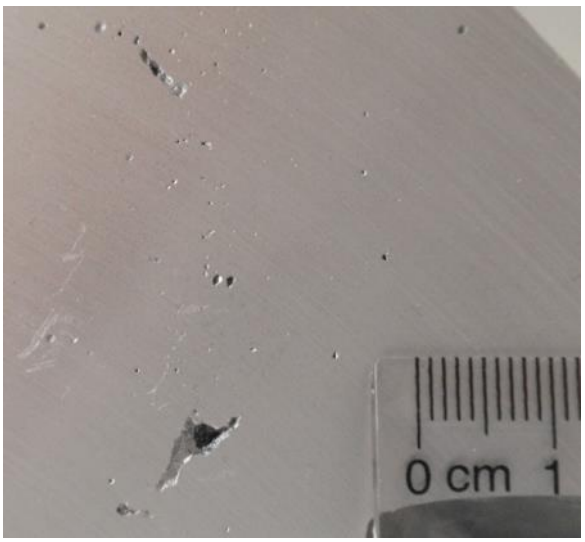
Příloha č. 19: Snímky vady nalezené v odlitku č. 13B, úprava 50+240 s.



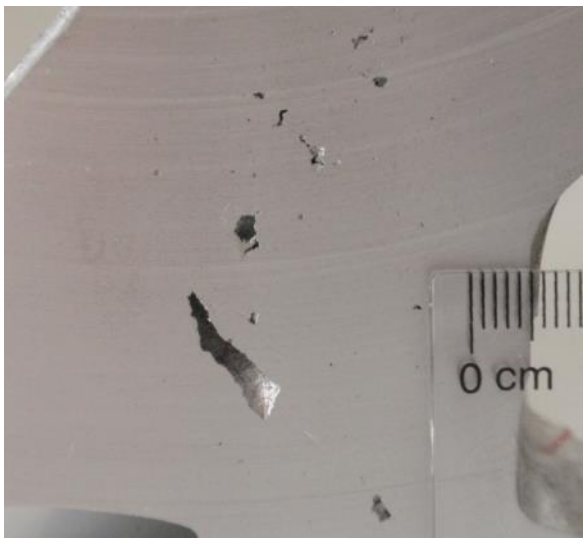
Levá část



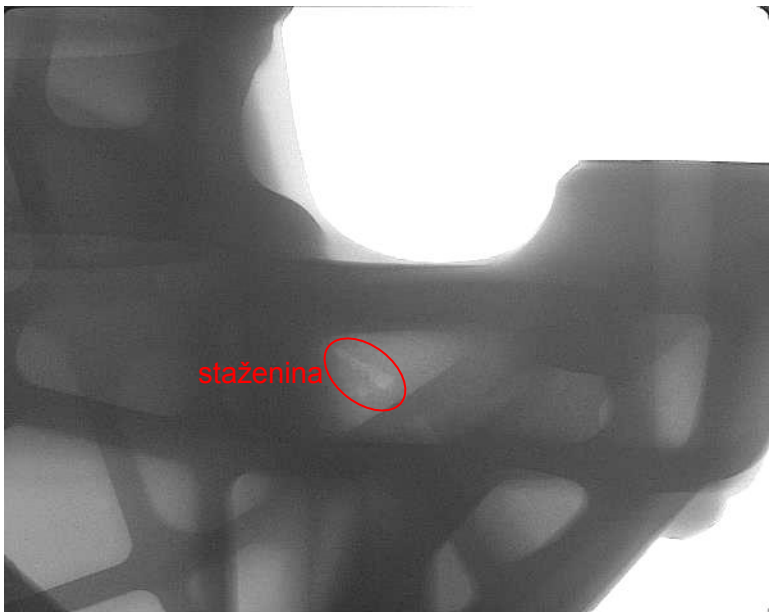
Pravá část



Detail vady levé části

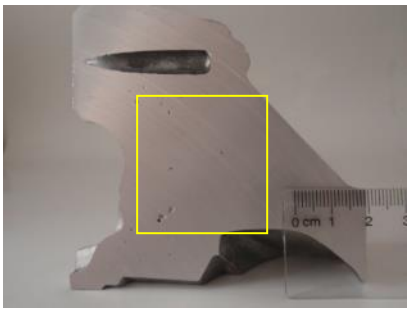


Detail vady pravé části

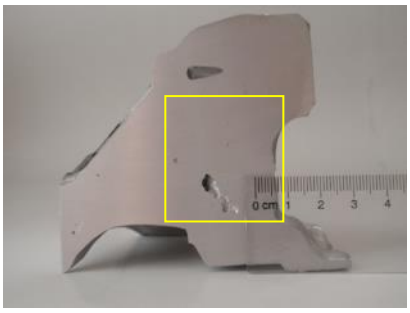


Rentgenový snímek vady

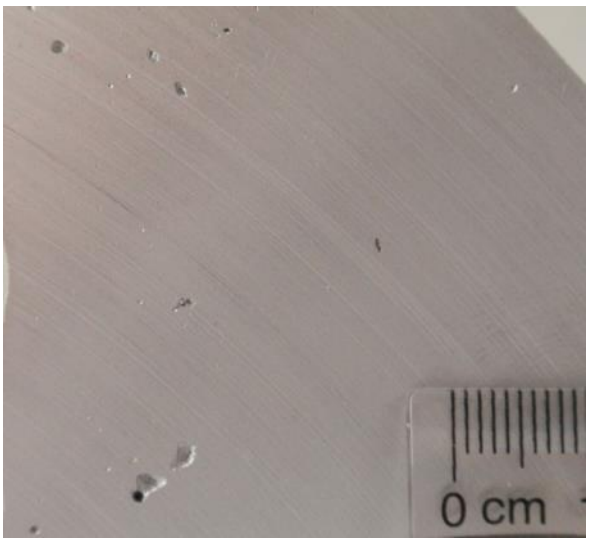
Příloha č. 20: Snímky vady nalezené v odlitku č. 14B, úprava 50+240 s.



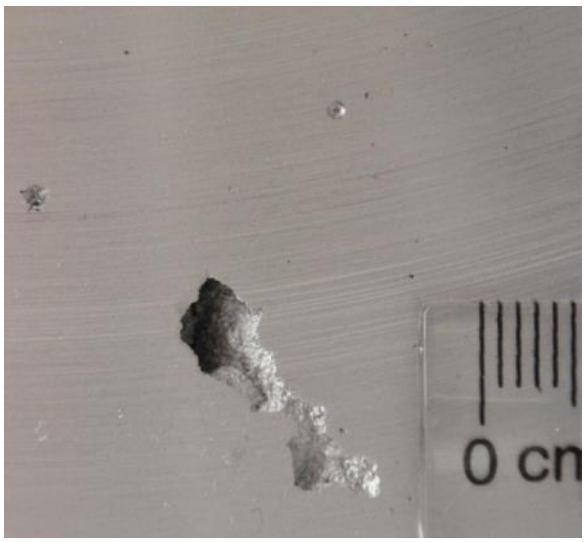
Levá část



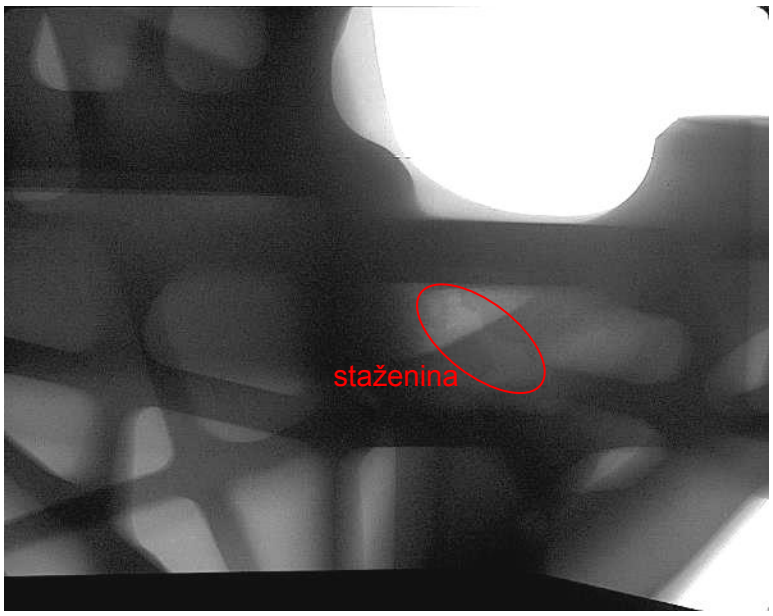
Pravá část



Detail vady levé části

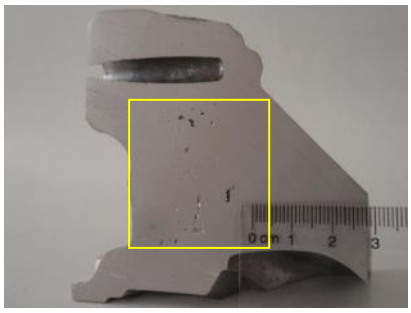


Detail vady pravé části

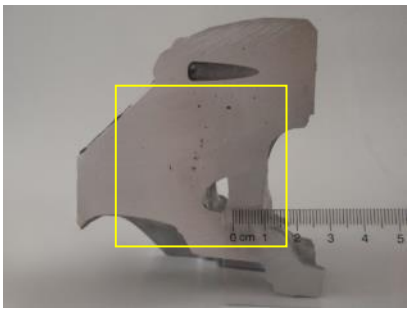


Rentgenový snímek vady

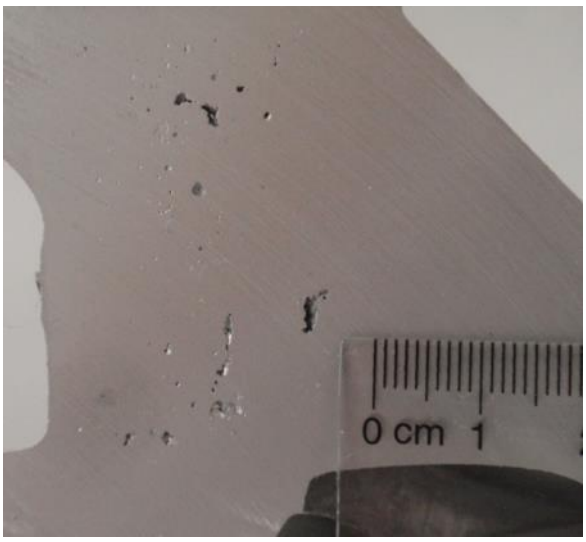
Příloha č. 21: Snímky vady nalezené v odlitku č. 15B, úprava 50+240 s.



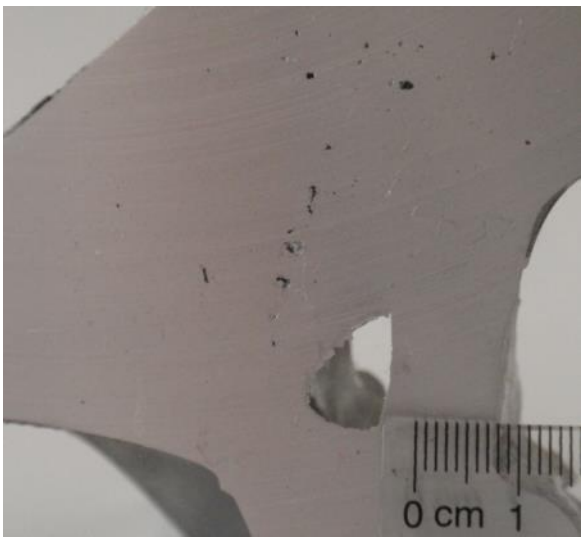
Levá část



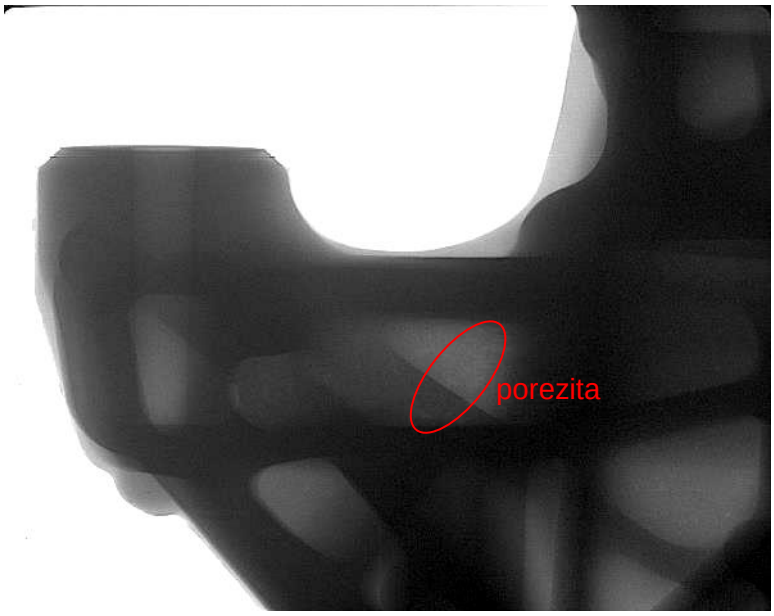
Pravá část



Detail vady levé části

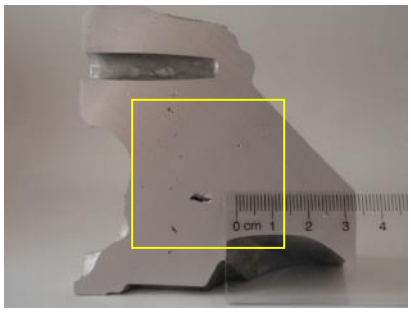


Detail vady pravé části

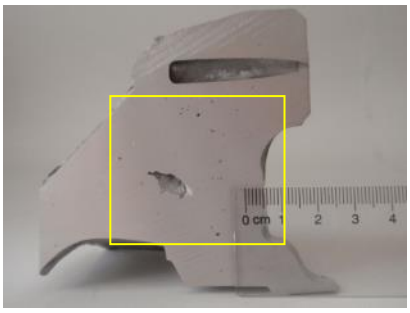


Rentgenový snímek vady

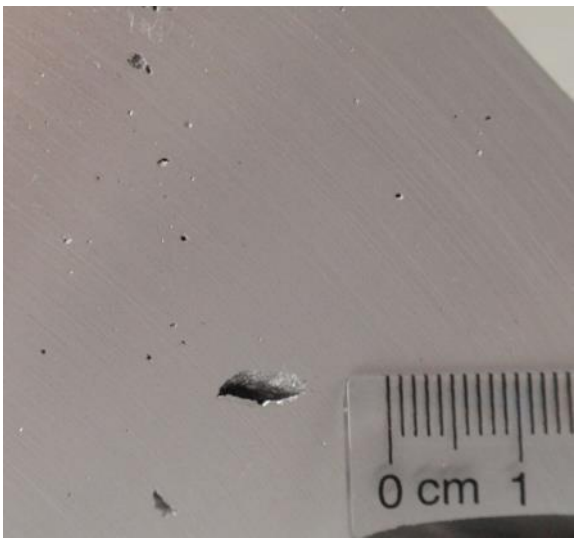
Příloha č. 22: Snímky vady nalezené v odlitku č. 17B, úprava 50+240 s.



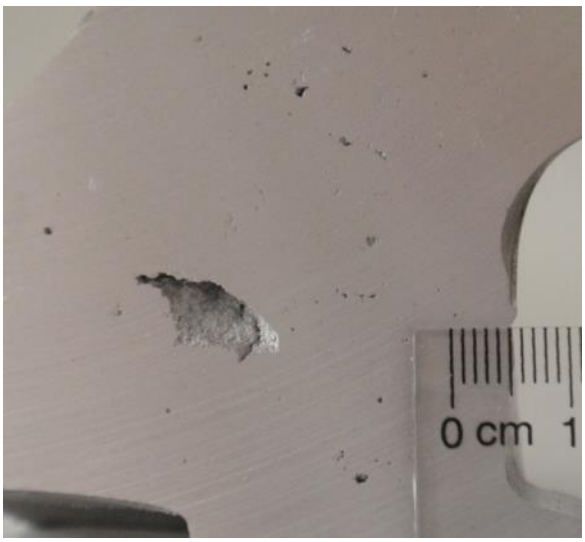
Levá část



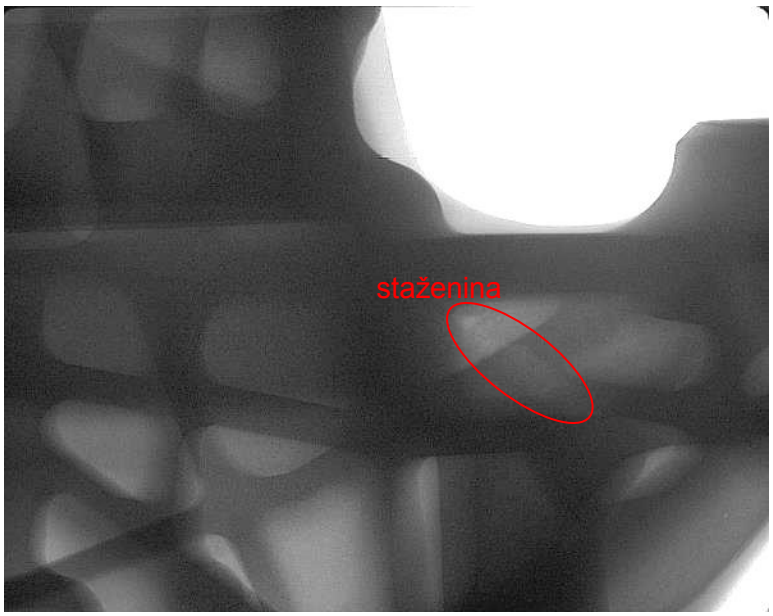
Pravá část



Detail vady levé části

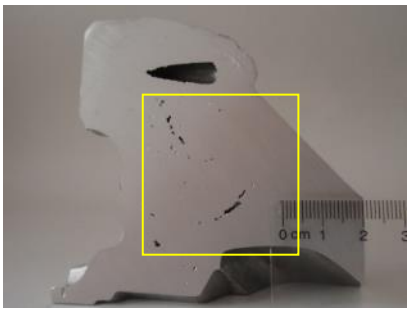


Detail vady pravé části

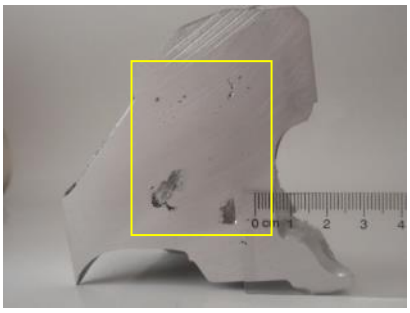


Rentgenový snímek vady

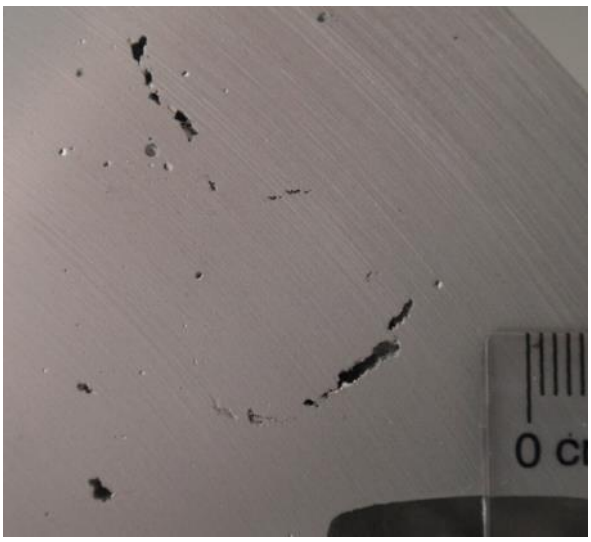
Příloha č. 23: Snímky vady nalezené v odlitku č. 20B, úprava 50+240 s.



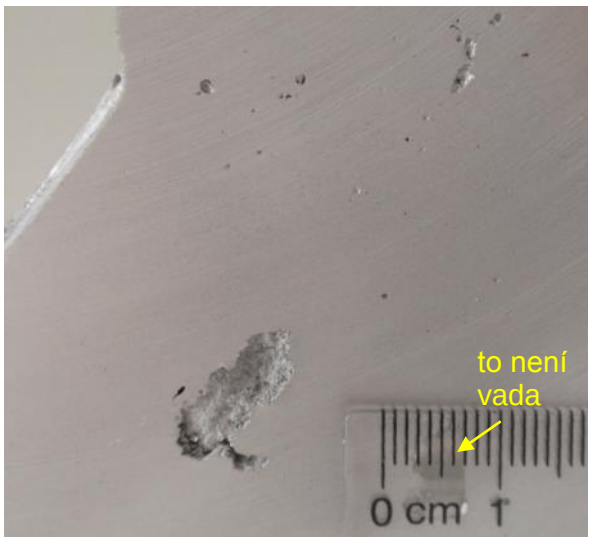
Levá část



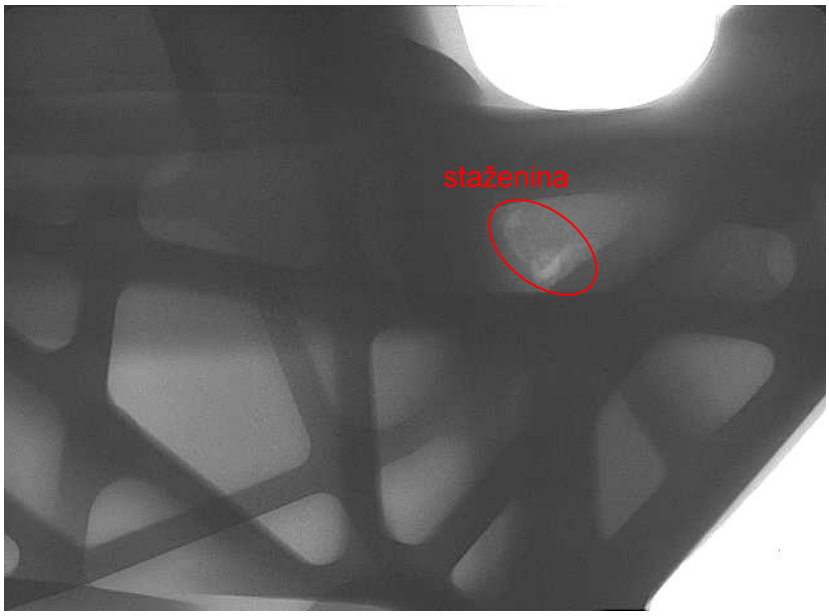
Pravá část



Detail vady levé části

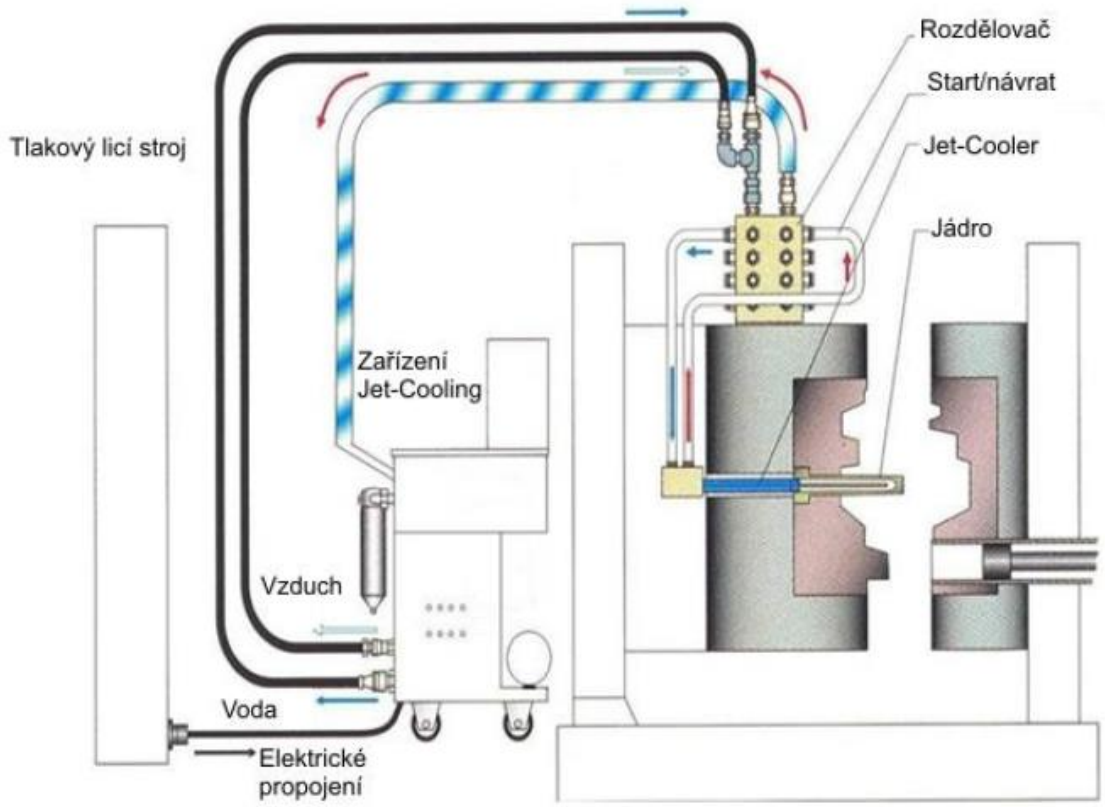


Detail vady pravé části

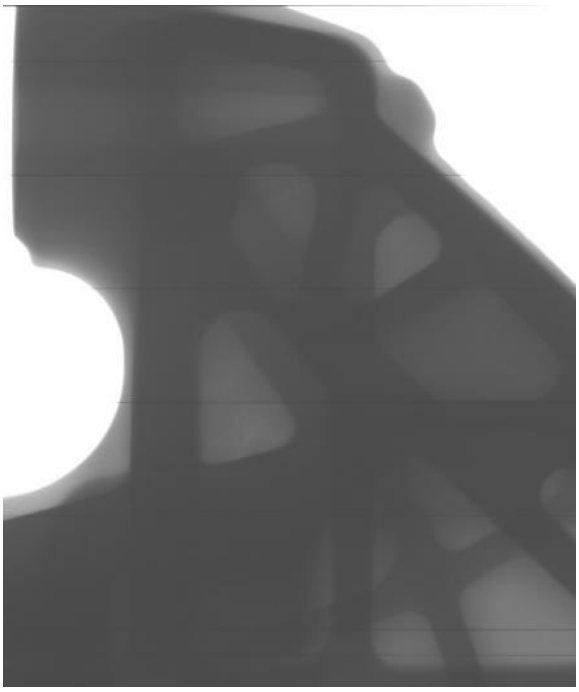


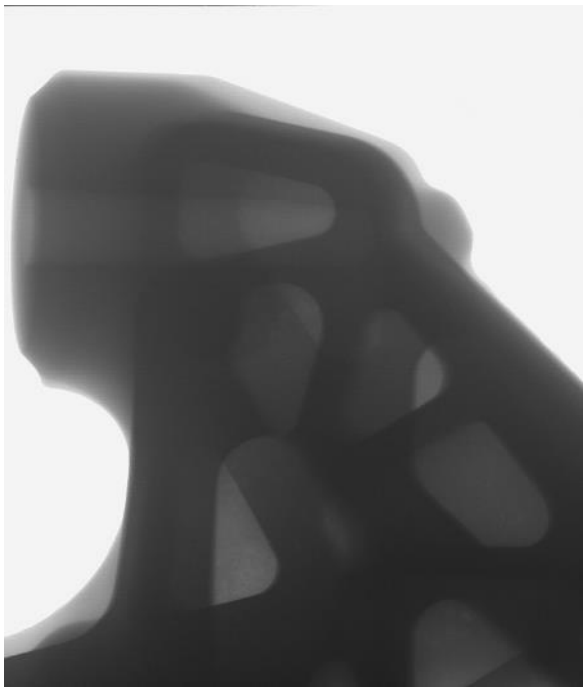
Rentgenový snímek vady

Příloha č. 24: Ilustrační schéma chladicího systému Jet-Cooling[16]**.**



Příloha č. 25: Rentgenové snímky odlitků vyrobených ve formě chlazené systémem Jet-Cooling.





drobná porezita

drobná porezita
drobná porezita
drobná porezita