



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VYUŽITÍ SIMULACE PRO PREDIKCI VAD A HODNOCENÍ VLASTNOSTÍ U TLAKOVĚ LITÝCH ODLITKŮ Z AL SLITIN

USING SIMULATION TO PREDICT DEFECTS IN AND EVALUATE PROPERTIES OF DIE-CAST
AL-ALLOY CASTINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Mgr. JITKA HAVLÍČKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. JAROSLAV ČECH, CSc.

BRNO 2011

Zadání

Licenční smlouva

ABSTRAKT

Cílem této závěrečné práce je srovnání množství porem v hliníkovém odlitku pomocí slévárenského simulačního programu v tlakově litém hliníkovém odlitku. Odlitky bloku motoru byly vyrobeny dvěma způsoby: vysokotlakým litím a litím s lokálním dotlakem (LSC). Zkoumána byla také závislost porem na mechanických vlastnostech odlitku. K vyhodnocení a porovnání výsledků byla použita vlastní měření a data z předchozích závěrečných prací studentů Fakulty strojního inženýrství VUT. Všechny hodnoty byly vyhodnoceny statistickými testy. Vzájemným porovnáním výsledků simulací a experimentálně naměřených hodnot ze vzorků odebraných z odlitku byla zjištěna dobrá schopnost programu v odhadu porem.

Klíčová slova

Vysokotlaké lití, tlakové lití s lokálním dotlakem, LSC, slitina hliníku, AlSi9Cu3, mechanické vlastnosti, porem, simulace, blok motoru.

ABSTRACT

The purpose of this diploma thesis is comparing the quantity of porosity in die-cast aluminium casting with using simulation. The cast engine blocks were made by high pressure die-casting and a local squeeze casting (LSC) technology. There was also examined the relationship between porosity and mechanical properties of castings. There were evaluated and compared the results of my own measurements with data from previous students theses at the Faculty of Mechanical Engineering BUT.

All data were tested by statistical tests. The comparison of simulation results and experimentally measured values was found a good programme-ability to simulate and estimate porosity.

Key words

Die-casting, local squeeze casting, LSC, Al-alloy, AlSi9Cu3, mechanical properties, porosity, simulation, engine block.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HAVLÍČKOVÁ, J. *Využití simulace pro predikci vad a hodnocení vlastností u tlakově litých odlitků z Al slitin*. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2011. 94 s.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Využití simulace pro predikci vad a hodnocení vlastností u tlakově litých odlitků z Al slitin vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

27. května 2011

.....
Jitka Havlíčková

Poděkování

Děkuji tímto velice panu prof. Ing. Jaroslavu Čechovi, CSc. za pečlivé a důsledné vedení, trpělivost a cenné rady při vypracování mé diplomové práce.

Děkuji také paní Aleně Pavlicové, Ing. Markétě Říhové z Odboru Slévárenství Ústavu strojírenské technologie a Ing. Pavlu Gejdošovi z Ústavu materiálového inženýrství za pomoc s vypracováním experimentální části.

Za poskytnuté materiály k řešení simulací v programu Magma a ochotnou spolupráci děkuji Ing. Martinu Sopkovi z Škoda Auto a.s.v Mladé Boleslavi a za konzultaci statistiky a regresní analýzy panu doc. RNDr. Bohumilu Marošovi, CSc.

Děkuji všem, kteří mi jakkoliv pomohli a podporovali mě během mého studia.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování	6
Obsah	7
Úvod	8
1 TEORETICKÁ ČÁST	10
1.1 Slitiny hliníku a jejich značení	10
1.1.1 Siluminy	11
1.1.2 Struktura siluminů	12
1.1.3 Slitina AlSi9Cu3(Fe).....	14
1.2 Mechanické vlastnosti.....	15
1.3 Tlakově lité Al slitiny.....	18
1.3.1 Tlakové lití se studenou licí komorou	20
1.3.2 Lokální dotlak (local squeeze casting)	21
1.4 Porezita v hliníkových slitinách	22
1.4.1 Zdroje a vznik porezity	23
1.4.2 Snížení porezity hliníkových slitin	26
1.5 Simulace	29
1.5.1 Simulační program Magma	29
1.5.2 Numerická podstata programu Magma.....	33
1.5.3 Potřebné údaje před zahájením simulace	34
1.5.4 Zjištění výskytu porezity simulací.....	36
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	37
2.1 Výběr testovaného místa	41
2.2 Příprava metalografických vzorků	44
2.3 Vyhodnocení porezity programem AnalySIS.....	46
2.4 Vyhodnocení porezity programem Stream Motion.....	48
2.5 Rozdíly mezi AnalySIS a Stream Motion.....	53
2.6 Vyhodnocení měření	55
2.7 Diskuse výsledků	69
2.8 Statistické vyhodnocení porezity	71
2.9 Simulace	74
Závěr	80
Seznam použitých zdrojů.....	83
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	86
Seznam příloh.....	87

ÚVOD

Se vzrůstajícím podílem numerických simulací ve slévárenství se v současné době stále více firem přiklání k přizpůsobení technologie odlévání svých výrobků na základě simulace plnění forem a simulace tuhnutí. Z nich vycházejí predikce porezity, staženin a jiných problémů spojených s plněním a tuhnutím odlitků [1].

Tato diplomová práce popisuje rozdíly v množství porezity části odlitků tříválcového motoru z hliníkové slitiny AlSi9Cu3 u výrobku litého technologií vysokotlakého lití a tlakového odlévání s lokálním dotlakem. Zkoumanou slévárenskou vadou je porezita vznikající při tlakovém plnění taveniny do formy. Její výskyt byl v odlitku zjišťován pomocí simulačního programu Magma a experimentálním měřením metodou obrazové analýzy. Práce plynule navazuje na popis mechanických vlastností a vad tohoto odlitku, které ve své diplomové práci popsal Lefner [2].

Mechanické vlastnosti byly zjišťovány experimentálně a cílem je, aby byla potvrzena nebo vyvrácena jejich závislost na množství porezity ve zkušebních vzorcích, které vznikly rozřezáním tohoto odlitku. V experimentální části byly zpracovány údaje z vlastního měření porezity na 26 vzorcích 4. ložiska horního bloku motoru slitiny AlSi9Cu3 a údaje z vlastního měření společně s měřeními z předchozích let na Odboru slévárenské technologie FSI VUT. Jedná se celkem o soubor 130 hodnot z vlastního měření, 51 hodnot měření z předchozích období a hodnoty z aritmetických průměrů jednotlivých skupin měření. I když byly vzorky slitiny dříve zhotoveny Lefnerem [2], v jehož práci je zpracován jen menší soubor hodnot, byly tyto vzorky znovu připraveny k metalografickému zkoumání na více místech metodou obrazové analýzy.

K odhalení vady při výrobě v podniku Škoda Auto, a.s. slouží simulační software Magma, jehož obrazové výstupy byly pomůckou k hodnocení porezity na vybrané části odlitku. Detailně se simulacemi v tomto programu pro automobilový průmysl zabývá práce Bařinové [3]. Zjišťování vnitřního pnutí pomocí simulace z modulu MagmaStress nebylo možné uskutečnit, neboť nebyla k dispozici v Škoda Auto nová verze pro výpočet v rámci Magma 5.0 až do současnosti. Verze programu se stále testuje, odstraňují se chyby a ani starší verze nasimulovaného vnitřního pnutí horního dílu motoru nebyla v archivu firmy nalezena.

Hodnoty experimentálního měření porezity byly dosud získány pro horní díl bloku motoru z produkce Škoda Auto a.s. pouze Lefnerem [2] a v menší míře Talandou v rámci zpracování bakalářské práce [4]. Všechna získaná data byla v této práci zahrnuta do souhrnného měření a statistického vyhodnocování.

Simulaci k zhodnocení vad odlitků z Al slitiny využívá ve své práci Šolc [5] nebo Razska [6]. Problematice horního dílu odlitku motoru se věnuje práce Mikysky [7], který zjišťoval průchod ultrazvukových vln v závislosti na mechanických vlastnostech odlitku. Diplomová práce Tučka [8] porovnává změnu technologie výroby motoru na mechanických vlastnostech.

Teoretický předpoklad závislosti meze pevnosti, smluvní meze kluzu a tažnosti na vzniku této slévárenské vady je pokles mechanických vlastností se vzrůstající porezitou. Podle dosavadních zjištění nebyly všechny grafické závislosti lineární.

Snahou této práce bylo zjistit, jsou-li některé závislosti naměřených mechanických hodnot na porezitě natolik modelové, že jimi lze proložit regresní křivky namísto přímky.

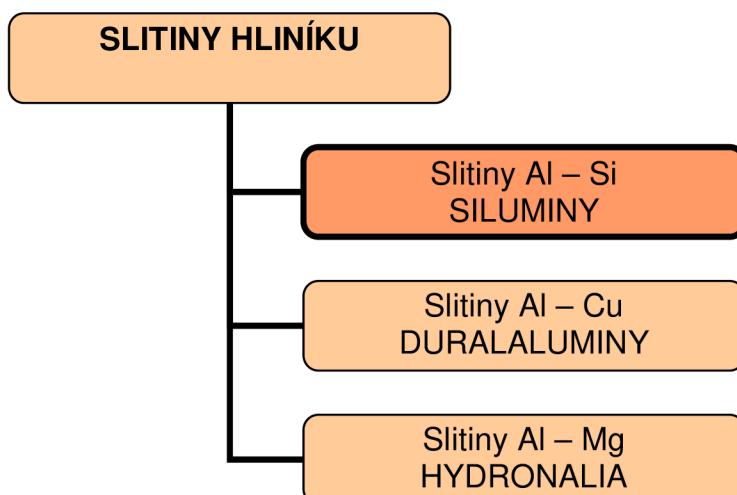
Porezita naměřená pomocí obrazové analýzy na několika místech 26 vzorků podélného a příčného řezu z oblasti ložiska horního dílu motoru slouží jako podklad k rozboru chování plynových makroskopických vad uvnitř odlitku ve vztahu ke konkrétně naměřeným hodnotám meze pevnosti, smluvní meze kluzu a tažnosti. Zhodnocení výsledků je provedeno v programech Mathcad a Excel pomocí statistických testů s 95 % spolehlivostí statisticky vhodného výsledku.

Cílem práce je také zjistit schopnost predikce porezity pomocí simulačního programu a takto zjištěné množství porovnat s výsledky experimentu.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Slitiny hliníku a jejich značení

V závislosti na přítomnosti hlavních přísadových prvků se slitiny hliníku dělí na tři základní skupiny. Předmětem zkoumání této diplomové práce je slitina, jejíž hlavními složkami jsou hliník a křemík.



Obr. 1.1 Rozdělení slitin hliníku dle chemického složení

Pro slitiny hliníku na odlitky se v současnosti používá evropská norma ČSN EN 1706 (42 1433), která od září 2010 nahradila původní normu stejného značení z roku 1999. Došlo v ní také k menší úpravě složení pro slitinu AlSi9Cu3 (Například k snížení obsahu Sn z 0,25 na 0,15 %).

Tab. 1.1 Chemické složení slitiny AlSi9Cu3(Fe) dle normy ČSN EN 1706 [9]

Chemické složení v hmotnostních %											
Al	Si	Cu	Mg	Mn	Fe	Zn	Ni	Sn	Cr	Ti	Pb
zbytek	8,0 – 11,0	2,0 – 4,0	0,05 - 0,55	max. 0,55	max. 1,3	max. 1,2	max. 0,55	max. 0,15	max. 0,15	max. 0,25	max. 0,35

Norma ČSN EN 1706 dělí slitiny hliníku buď číselně, nebo chemickými značkami.
Číselné značení:

Slitina se označuje písmeny EN AC a pětimístným číslem ve tvaru:

EN AC-XXXXX

1. číslice označuje hlavní přísadový prvek
2. číslice charakterizuje skupinu slitin: 4 - Si
3. číslice udává pořadové číslo ve skupině
4. a 5. číslice jsou 0

Pro slitinu AlSi9Cu3 bude mít značení následující tvar: EN AC-46000

Označení slitin chemickými značkami:

Za úvodním EN AC-Al se uvádí přísadové prvky v pořadí od hlavního přísadového prvku k vedlejším prvkům, které jsou seřazeny v sestupném pořadí. Pokud je obsah legury větší než 1%, udává se procentuální množství za značkou příslušného prvku [10].

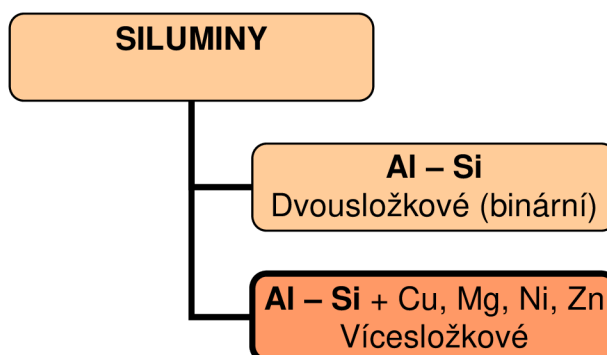
Pro slitinu AlSi9Cu3 bude mít značení následující tvar: EN AC-AlSi9Cu3(Fe)

Obsahy jednotlivých přísadových prvků a jejich vliv na vlastnosti odlitků [6]:

- Křemík (Si) - ve slévárenských slitinách se ho používá (6 až 22)%, nejčastěji však od 6% do 14%. Jeho větší množství zlepšuje slévárenské vlastnosti,
- Měď (Cu) - do 5%, zvyšuje pevnost, snižuje tažnost, zlepšuje obrobitelnost,
- Hořčík (Mg) - (0,3 až 0,4)% pro vytvrzování, 0,7% ve vysokopevných slitinách ,
- Nikl (Ni) - do 2%, zvyšuje pevnost za vysokých teplot,
- Železo (Fe) - je nečistota a ve slitině v podstatě vadí, snižuje tažnost, obsah Fe je (0,15 až 0,2)% při odlévání do pískových forem a (0,8 až 1)% při tlakovém odlévání do kokil, přidává se proto, aby se odlitek nelepil na stěnu formy případně na kokilu,
- Mangan (Mn) - kompenzuje škodlivý vliv Fe, přidává se ho asi (0,2 až 0,5)%.

1.1.1 Siluminy

Slitina AlSi9Cu3 se řadí mezi slitiny Al-Si, které se nazývají siluminy, patří k nejpoužívanějším a tudíž i nejdůležitějším typům slévárenských slitin. Tomu, že zaujímají valnou většinu produkce hliníkových odlitků, vděčí svým dobrým slévárenským a mechanickým vlastnostem [10]. V závislosti na chemickém složení slitiny lze siluminy rozdělit takto:



Obr. 1.2 Rozdělení slitin hliníku dle přísadových prvků

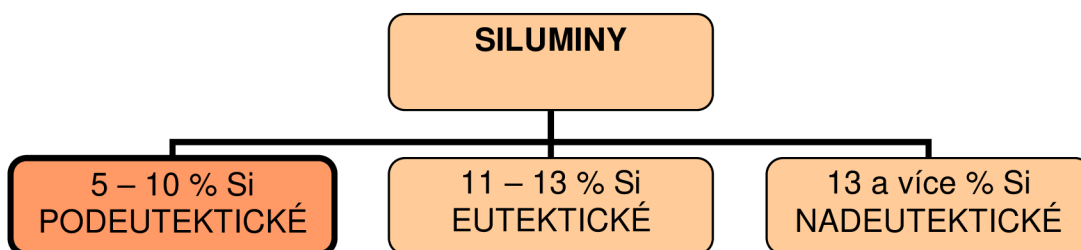
Slitiny Al na odlitky jsou téměř výhradně vícesložkové. Největší podíl na zvýšení pevnostních charakteristik siluminů mají přísady Cu a Mg, díky jejichž přítomnosti mohou být tyto ternární slitiny vytvrzovány. Z toho plyne, že slitiny Al-Si-Cu a Al-Si-Mg jsou nejvíce používané. Tyto slitiny je možno dlouhodobě mechanicky zatěžovat až do teplot 250 – 270 °C. Důležité je, že jejich slévárenské vlastnosti jsou horší v porovnání s binárními siluminy. Nabízí se zde

samozřejmě prostor pro úpravu mechanických i slévárenských vlastností přísadou prvků Mn, Ni, Zn, Ti či očkovaním Ti, TiB a modifikací eutektika pomocí Na, Sr. [11]

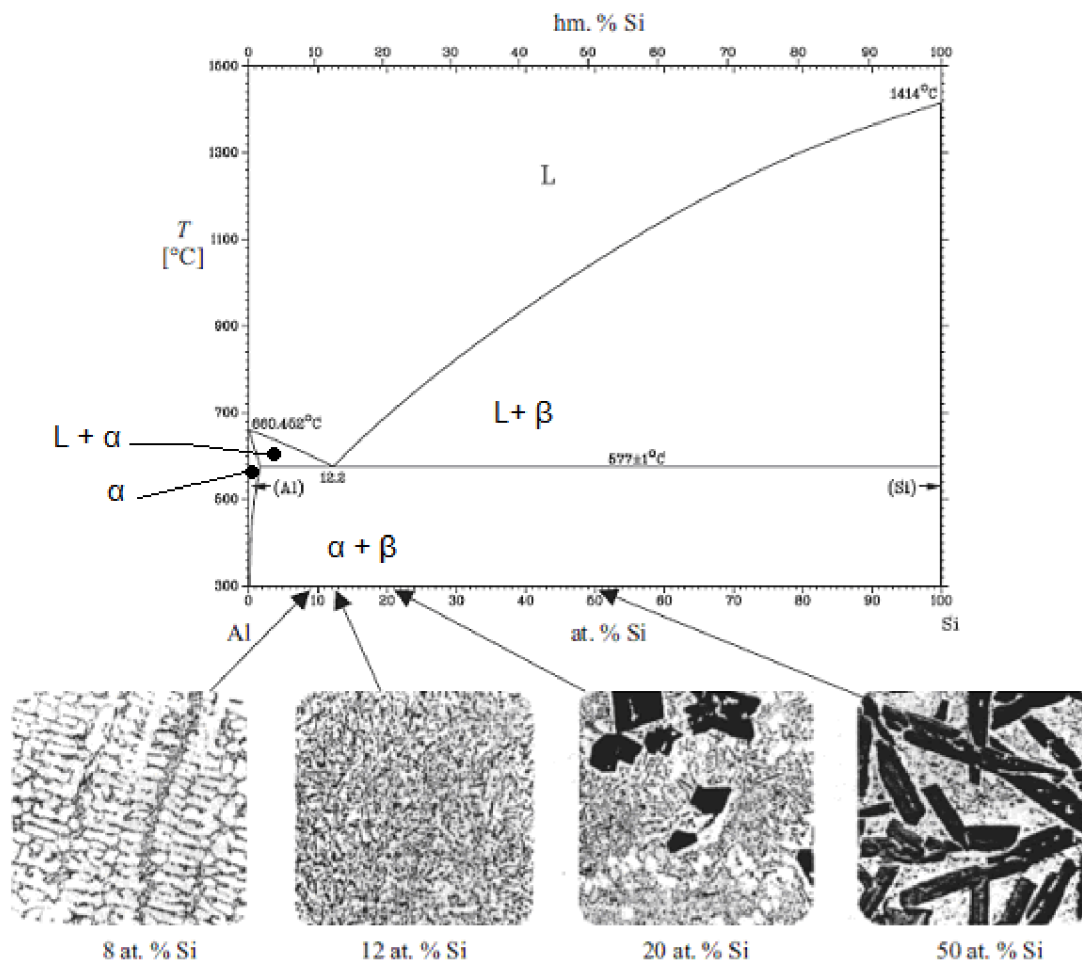
Siluminy mají poměrně dobré slévárenské vlastnosti, odlitky se vyznačují solidní těsností vůči plynům a kapalinám. Výhodou je také odolnost proti korozi. Obecně lze říci, že čím vyšší obsah Si (až do eutektického obsahu) vylučujícího se v podobě jehlic, tím se zlepšují slévárenské vlastnosti. Je to dáno zúžením intervalu tuhnutí, což má za následek zlepšení zabíhavosti a snížení objemu staženin (Si při tuhnutí zvětšuje svůj objem). Obrobitelnost je na střední úrovni, lze ji však zlepšit modifikací [10].

1.1.2 Struktura siluminů

Struktura a vlastnosti siluminů jsou závislé především na obsahu křemíku. Slitiny Al-Si tuhnou podle binárního diagramu zobrazeného na obr. 1.4. a dělí se podle obsahu křemíku na:



Obr. 1.3 Rozdělení siluminů podle obsahu křemíku ve slitině



Obr. 1.4 Fázový diagram Al-Si s vyobrazenými mikrostrukturami slitin Al-Si při různých obsazích Si [12]

Eutektikum ($\alpha + \beta$) v siluminech tvoří nepravidelnou strukturu, což má za následek značný podíl hrubých a křehkých krystalů Si. Anomální tvorbě eutektika můžeme zabránit dvěma způsoby [11]:

- zvýšenou rychlostí ochlazování je zajištěna vyšší rychlost eutektické přeměny, která zajistí normální eutektikum, jemnější strukturu a nárůst mechanických vlastností,
- modifikací taveniny malým množstvím alkalických kovů (Na, Sr, Sb, B).

Podle tvaru částic křemíku se nazývá i typ eutektika [10] :

- zrnité,
- lamelární,
- modifikované.

Eutektikum přítomné v binárním systému v relativně velkém množství (40 – 75 %) dává slitinám Al-Si dobrou zabíhavost, snižuje lineární smrštění, sklon k tvorbě trhlin za tepla a mikropórovitost. Díky téměř dokonalé nerozpustnosti křemíku v hliníku je eutektikum tvořeno krystaly primární fáze Al- α a hrubými jehlicemi Si [11].

U slitin pro tlakové lití se obzvláště požaduje velmi dobrá zabíhavost pomocí níž lze získat kvalitní odlitky s minimální tloušťkou stěny, přesným tvarem a hladkým povrchem.

Složení odlévané slitiny, které určuje rozsah jejího tuhnutí a kvalitu hotových součástí, je velmi důležité. Struktura a vlastnosti slitin hliníku jsou, jak již bylo zmíněno výše, úzce závislé na intenzitě ochlazování při tuhnutí. Při rychlém tuhnutí odlitku dochází k mnoha příznivým efektům shrnutých do následujících bodů:

- vzniká jemnozrná struktura s podstatně lepšími mechanickými vlastnostmi,
- je menší strukturní heterogenita slitiny a nižší výskyt vad typu mikrostaženin,
- omezuje se vylučování rozpuštěných plynů a vznik plynových dutin,
- zvyšuje se disperzita intermetalických částic, které pak mají mnohem méně negativní účinek na vlastnosti slitiny. Při rychlém tuhnutí je proto ve slitinách obvykle přípustný vyšší obsah doprovodných prvků. [10,13]

1.1.3 Slitina AlSi9Cu3(Fe)

Slitina pro výrobu odlitků ve ŠKODA AUTO a.s je označována AlSi9Cu3(Fe), protože je ve slitině obsaženo střední množství železa, tj. max. do 1% za účelem minimalizovat vznik pórovitosti. [3]

AlSi9Cu3 patří k nejčastěji používaným slitinám hliníku. Má střední mechanické vlastnosti, dobrou pevnost za vyšších teplot do 200 °C a je po odlití dobře obrobitelná. Vyznačuje se nízkou odolností proti korozi.[9]

Způsoby odlévání [9]:

- tlakové lití – používáno nejčastěji,
- do písku,
- do kovové formy,
- na vytavitelný model.

Slitina má dle normy ČSN EN 1706 [9] dobrou zabíhavost, dobrou odolnost proti trhlinám za tepla a malý sklon ke vzniku soustředěných staženin. Z technologického hlediska se tato slitina vyznačuje přiměřenou nepropustností.

Doporučuje se provádět očkování. Slévárenské vlastnosti se zlepšují s rostoucím obsahem křemíku. [2]

Další technologické vlastnosti: U odlitků litých do kovových forem dochází k samovolnému vytvrzování za studena. Tento trend se zvětšuje s rostoucím obsahem Mg. [2] Slitina má dobrou obrobitelnost po odlití, přiměřeně se dá vyleštit a pro tlakově lité odlitky má dobrou svařitelnost. U gravitačního lití je schopnost vzniku svaru podstatně zhoršena.

Použití: v průmyslu nachází uplatnění ve výrobě odlévaných součástí do automobilů. Ze speciálních siluminů se odlévají tvarově složité a tenkostěnné odlitky všeho druhu. Jde například o skříň spalovacích motorů, převodovek, písty a hlavy válců, řemenice a součásti pro letadla. [11]

AlSi9Cu3 je vhodná i pro výrobu tenkostěnných, tvarově komplikovaných odlitků [10]. Tab. 1.2 uvádí termofyzikální vlastnosti.

Tab. 1.2 Termofyzikální vlastnosti slitiny AlSi9Cu3 [14]

Veličina	značka	jednotka	AlSi9Cu3
Měrná hmotnost	$\rho_{20^{\circ}\text{C}}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2705
	ρ_{S}		2585
	ρ_{L}		2445
Měrná tepelná kapacita	$C_{p20^{\circ}\text{C}}$	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$	846
	$C_{p\text{S}}$		1034
	$C_{p\text{L}}$		1056
Tepelná vodivost	$\lambda_{20^{\circ}\text{C}}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	96
	λ_{S}		139
	λ_{L}		65
Teplota	t_{S}	$^{\circ}\text{C}$	521
	t_{L}		593
Smrštění	S	%	1,21
Pozn. S – solid, L - likvid			

1.2 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti:

- pevnost
- smluvní mez kluzu
- tažnost

Slévače zajímají všeobecně mechanické a fyzikální vlastnosti slitin pro lití pod tlakem v teplotním rozsahu od teploty tuhnutí až po teplotu uvolnění, při níž se tlakový odlitek vyjímá z formy pro lití pod tlakem. Chování slitin pro lití pod tlakem při těchto vysokých teplotách je velmi důležité pro výpočet a simulaci různých technologických procesů při lití pod tlakem [14].

Obecně lze říci, že pevnosti s rostoucím obsahem legujících prvků rostou. Slévárenské slitiny mají většinou větší celkový obsah prvků a nižší mez pevnosti, což je způsobeno tím, že litá struktura je na rozdíl od struktury tvářené hrubozrnná, nehomogenní z hlediska chemického složení (makro a mikroodmíšení) a je pórovitá. [12]

Nejhrubší struktury s nejmenšími pevnostními charakteristikami vznikají při lití do písku, jemnější struktury s lepšími vlastnostmi dosáhneme při lití do kovových forem nebo při tlakovém lití. [11]

Nedostatkem slitin hliníku je jejich nízká tvrdost a tedy snadné poškození povrchu součástí. Tyto negativní projevy souvisí se schopností hliníku pohlcovat energii. Tohoto využívá hlavně automobilový průmysl při navrhování deformačních zón. [11]

Tvrdość tohoto siluminu je dle normy 80 HB a maximální pevnost se pohybuje okolo hodnoty 250 MPa. Aby bylo možné vůbec takové hodnoty dosáhnout, je nutno zajistit vysokou rychlost ochlazování, která zapříčiní dosažení jemnozrnné struktury, jenž jednoznačně zlepšuje veškeré mechanické vlastnosti a také strukturní vlastnosti. Tlakově lité odlitky mají všeobecně příznivé podmínky pro vznik jemnozrnné struktury, jelikož kovová forma protkaná chladicími kanály výborně odvádí teplo z odlitku. K vysokým pevnostem také přispívá působení tlaku na tuhnoucí odlitek, které má za následek zhutnění struktury. [10]

Dalším příznivým činitelem posouvajícím pevnostní vlastnosti k vyšším hodnotám je proces vytvrzování. Vytvrditelné slitiny Al-Si obvykle obsahují hořčík či měď. Rozpustnost přísadových prvků v hliníku dosahuje maxima při eutektické teplotě a v průběhu ochlazování klesá. Proces snižování rozpustnosti pak zapříčiní vyloučení fáze přísadového prvku [10,15].

S výskytem slévárenských vad se značně mění mechanické vlastnosti odlitku ze siluminu. Způsoby určení závislosti mechanické vlastnosti na porezitě mohou být různé. Záleží také na metodě měření porezity. Stanovení pevnosti v tahu R_1 hliníkového tlakově litého odlitku na jmenovitou plochu průřezu S vzhledem k porezitě lze například určit vztahem [16]:

$$R_1 S_{odl} = R \cdot (S - n_1 S_{por}) \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

R - pevnost materiálu [MPa]

n_1 - počet pórů v průřezu S_{odl}

S_{por} - plocha pórů v průřezu S_{odl} [m²]

Je-li oditek vyráběn metodou tlakového lití s dotlakem, stanoví se pevnost materiálu dle vztahu:

$$R_1 = R \cdot \left(1 - K_1 \left(\frac{1}{p_2} \right)^{\frac{1}{\chi}} \right) \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

p_2 - dotlak [MPa]

χ - Poissonova konstanta, adiabatický exponent plynu [-]

Konstanta K_1 se pak vypočítá dle následujícího vzorce:

$$K_1 = \frac{v}{\rho \cdot L_{por}} \cdot \frac{p_0}{p_1^{1-\frac{1}{\chi}}} \cdot \frac{T_1}{T_0} \cdot V_0 \quad [-] \quad (3)$$

v - část objemu plynu v kovu připadajícího na S_{odl} [m³]

ρ - hustota slitiny odlitku [kg.m⁻³]

L_{por} - výška póru kolmo na průřez odlitku S_{odl} [m]

p_0 - počáteční tlak [MPa]

p_1 - tlak plynu před dotlakem [MPa]

T_1 – teplota plynu v kovu před dotlakem [°C]

T_0 – počáteční teplota plynu kovu před tlakovým litím [°C]

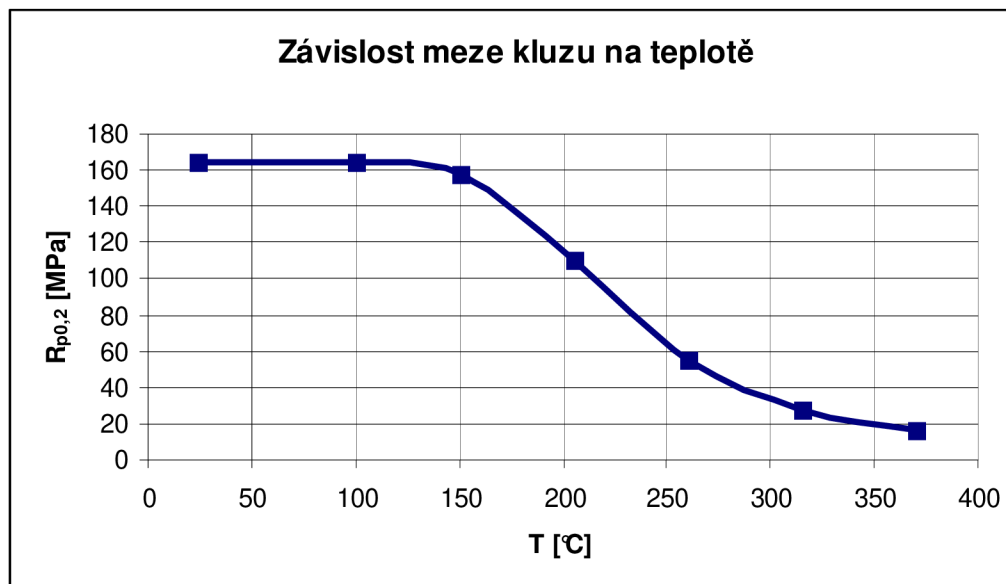
V_0 – počáteční objem plynu [m³]

Vypočítané vztahy pro pevnost v tahu R_1 hliníkové slitiny se při nižších dotlacích shodují více než při vyšších. Při tlakovém lití s ohledem na vnitřní poretitu je hustota odlitku vždy menší než by byla pro tentýž odlitek bez pórů. [16] Předpokladem je, že v tlakově litém odlitku se vždy nachází uzavřené určité množství plynu, rozdělené na průřezu do jednotlivých pórů [17]

V tab. 1.3 jsou přehledně vypsány hodnoty meze kluzu a meze pevnosti v tahu slitiny AlSi9Cu3 pro lití pod tlakem v závislosti na teplotě. Z této tabulky je patrné, že pokud jde o pevnost u hliníkových slitin pro lití pod tlakem až po maximální teplotu použití 150 °C hodnoty klesají pouze málo a pak se silně snižují se vzrůstající teplotou [14].

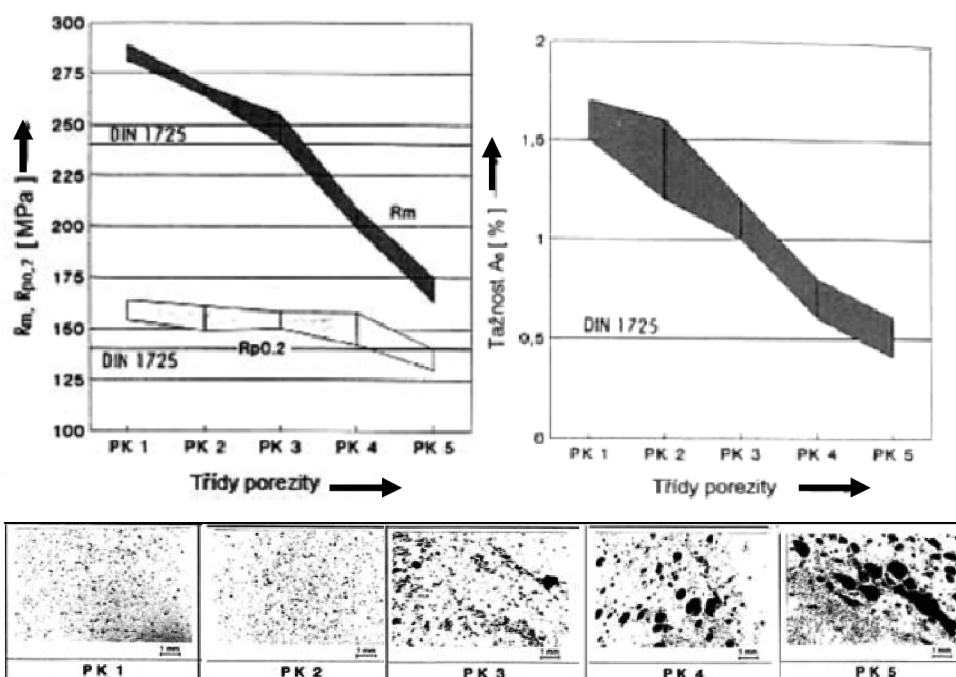
Tab. 1.3 Mez kluzu $R_{p0,2}$ a pevnost v tahu R_m tlakově lité slitiny AlSi9Cu3 v závislosti na teplotě [14].

Slitina	Pevnost [MPa]	teplota [°C]						
		24	100	150	205	260	315	370
AlSi9Cu3	$R_{p0,2}$	165	165	158	110	55	28	17
	R_m	331	310	234	165	90	42	28



Obr. 1.5 Naměřená mez kluzu $R_{p0,2}$ tlakově lité slitiny AlSi9Cu3 v závislosti na teplotě [14]

K určení meze pevnosti R_m , meze kluzu $R_{p0,2}$ a tažnosti A se používá zkouška tahem. Pro posouzení vlivu na materiálové charakteristiky se může použít grafická stupnice, tzv. porovnávací řada P1 – P5.



Obr. 1.6 Pevnost v tahu R_m , smluvní mez kluzu $R_{p0.2}$ a tažnost A_5 ze zkoušky tahem dle normy DIN 1725 materiálu AISi9Cu3 v závislosti na třídě pórovitosti PK 1- 5 [18]

Z obr. 1.6 plyne, že pevnost v tahu R_m s přibývajícím pórovitostí prudce klesá od hodnoty 285 až na 169 MPa. Vliv na mez kluzu $R_{p0.2}$ je oproti tomu nepatrný a nastává pouze při velmi vysoké pórovitosti třídy 5. [19] Na obr. 1.6 je také uvedena tažnosti A_5 pro krátkou zkušební tyč v závislosti na třídách pórovitosti. Je zřejmé, že pórovitost ovlivňuje tažnost až od PK 2. Pro nejtěžší formy porozity je max. tažnost 0,6 %.

Omezení výskytu vad typu mikrostaženin a snížení vylučování rozpuštěných plynů, které způsobují porozitu slitiny, lze podpořit zvýšením rychlosti tuhnutí. Samotné zlepšení mechanických vlastností slitinu modifikováním je tím výraznější, čím se ve slitině nachází více křemíku [11].

1.3 Tlakově lité Al slitiny

Tlakové lití je metodou přesného lití, které se ideálně blíží snaze přeměny základního materiálu na hotový výrobek. Odlitky lité na tlakových strojích se vyznačují vysokou přesností rozměrů. Mají hladký povrch, tenké stěny a velmi dobré mechanické vlastnosti. Je možné v nich předlévat otvory velmi malých rozměrů a zalévat vložky jiných kovů. Vyžadují velmi malé závěrečné opracování. Technologie spočívá v zalisování taveniny vysokou rychlostí do dutiny dělené kovové formy. [20]

Teploty lití se pohybují v intervalu cca 650 – 750°C v závislosti na použité technologii lití a na tvarových a rozměrových aspektech odlitku, což znamená, že požadavky kladené na kokily nejsou v otázce žáruvzdornosti až tak náročné. Velkou nevýhodou při tavení a lití slitin je vysoká afinita hliníku ke kyslíku,

zapříčiňující vznik oxidických plen a tím pádem následné vady v odlitcích. To lze potlačit vhodnými prostředky a postupy počínaje vhodným výběrem tavícího agregátu a konče zvládnutou technologií lití [10,15].

Vysoké rychlosti taveniny v zářezu stěžují její průchod, protože od rychlosti 25 m/s dochází k disperznímu plnění, kdy se tavenina v plochém zářezu rozdělí do přerušovaných proudů až k disperzi směsi vzduchu a taveniny.

Faktory ovlivňující kvalitu tlakových odlitků ze slitinu:

- rychlost stlačení během licího cyklu,
- měrný tlak na taveninu,
- doba plnění formy,
- teplota slitiny, formy a licí komory. [20]

Technologie tlakového lití je nejdůležitější, nejoblíbenější a nejméně nákladný proces používaný pro výrobu tvarových odlitků ze slitin hliníku. Principem výroby je vstřikování roztavené slitiny do dutiny kovové formy pod vysokým tlakem až 250 MPa. Za těchto podmínek je možné vyrábět tvarově velmi komplikované odlitky. Ve formách lze používat výhradně kovová jádra. Tvar odlitku musí respektovat možnosti rozebírání formy a vytažení volných částí a jader. [3]

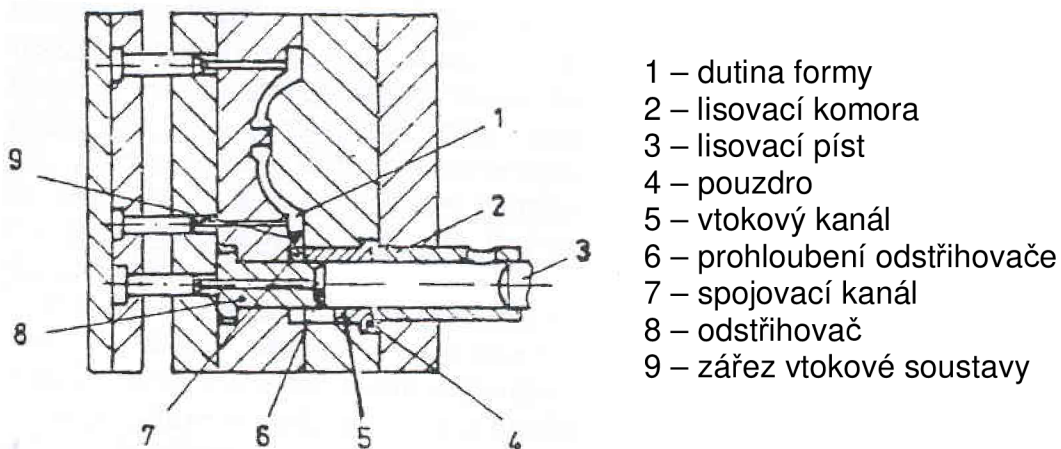
U tlakového lití se všeobecně rozlišují tři vstupní rychlosti pístu v tlakové komoře stroje v závislosti na způsobech plnění formy:

1. nízké rychlosti – plnění laminární do 0,3 m/s,
2. střední rychlosti – plnění turbulentní 0,5 – 15 m/s,
3. vysoké rychlosti – disperzní proudění 25 – 30 m/s.

Plnění formy je důležité z hlediska výsledné kvality odlitku. [21]

V důsledku vysoké rychlosti proudění během plnění formy a následujícího dodatečného tlaku je možná zvláště výroba tenkostěnných, rozměrově přesných odlitků s tloušťkou stěn od přibližně 1 – 2 mm s vysokou kvalitou povrchu [22].

Princip výroby odlitků na tlakově licích strojích je znázorněn na obr. 1.7.



Obr. 1.7 Znázornění vtokové soustavy odlitku litého pod tlakem na tlakovém licím stroji [23]

Podle konstrukce se tlakové stroje dělí na dva základní typy:

- se studenou komorou,
- s teplou komorou.

Podle směru pohybu plnicího pístu mohou být stroje:

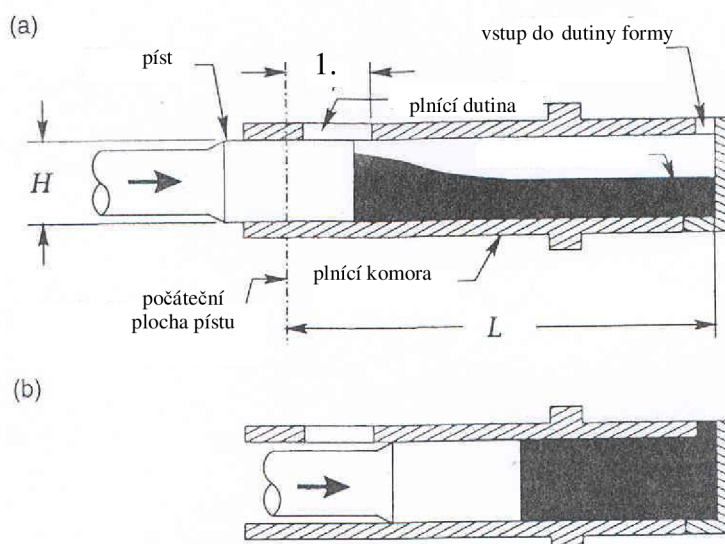
- s horizontální komorou,
- s vertikální komorou.

Slitiny hliníku se v současné době odlévají téměř výhradně na strojích se studenou horizontální komorou. Právě toto je i případ zkoumaného odlitku motoru z AlSi9Cu3, a proto je dále popsán mechanismus odlévání ve studené licí komoře a také pomocí lokálního dotlaku.

Po ztuhnutí se odlitek z pohyblivé části formy vytlačí pomocí vyhazovačů a odebírá ručně nebo pomocí robota. Následuje ochlazení odlitku, odstřižení vtoků a přetoků a konečná apretace. Před dalším licím cyklem se forma nastříká separačním prostředkem, který zamezuje nalepování odlitků na formu a usnadňuje jejich vyjímání z formy. V moderních provozech je celý výrobní cyklus automatizován. [10]

1.3.1 Tlakové lití se studenou licí komorou

Tlakové lití se studenou horizontální komorou (obr. 1.9) spočívá v pohybu plnicího pístu v plnicí komoře. Při přepnutí jednotlivých rychlostí pístu, které se při konvekčním tlakovém lití uskuteční náhle, dostává rázově tavenina impuls a tvoří se vlna. Ta se po nárazu na čelo plnicí komory od něj odrazí, převalí a uzavírá v tavenině plyny, které se už v procesu lití nepodaří z taveniny odstranit. [3]



(a) pomalá fáze, (b) rychlá fáze

Obr. 1.9 Schématické znázornění tlakového licího stroje s horizontální studenou komorou [24]

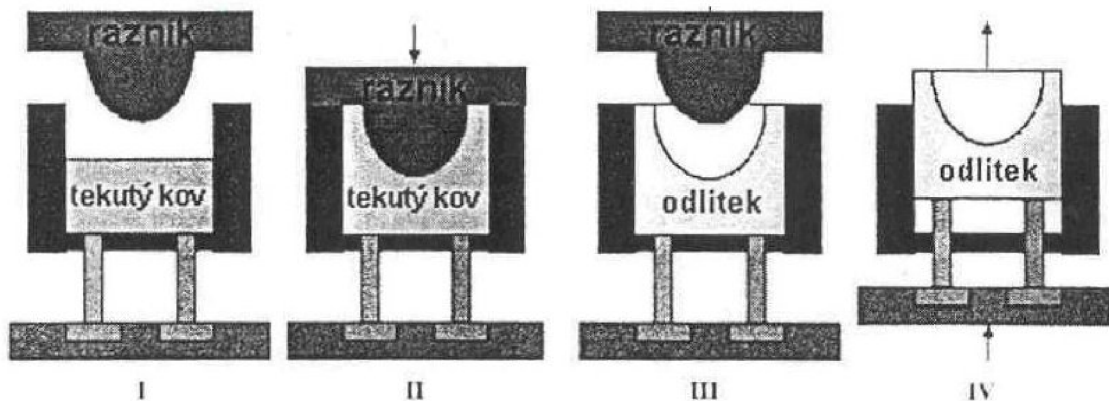
1.3.2 Lokální dotlak (local squeeze casting)

Princip tohoto způsobu tlakového odlévání spočívá v naplnění dutiny formy tekutým kovem s následnou aktivací razníků, které se vtlačí do dutiny formy a působí tak tlakem na požadované části tuhneícího odlitku, které mají mít zvýšené pevnostní charakteristiky a příznivější strukturu. Vyvolání potřebného tlakového nárůstu je provedeno za velmi malý časový úsek v tzv. násobiči tlaku. Tlak je poté udržován až do úplného ztuhnutí, což pozitivně ovlivňuje vnitřní čistotu odlitku, jelikož je nukleace plynové pórovitosti závislá na tlaku, omezí se tvorba pórovitosti z rozpuštěných plynů v tavenině. [15,3]

Local squeeze casting (LSC) je metoda schopná splnit vysoké nároky na materiálové i technologické požadavky a tvarové přesnosti. Zajišťuje zvýšení mechanických vlastností odlitků ve vybraných případech téměř na úroveň tvářených materiálů. Tato technologie odlévání snižuje tvorbu defektů - pórovitost. Hrubé dendrity a jejich větve se lámou a tyto úlomky se stávají dalšími krystalickými zárodky. Lokální dotlak je s výhodou používán pro slitiny na bázi hliníku.

Tlak pístu zamezuje vzniku mezery mezi odlitkem a formou, proto je ochlazování intenzivní po celou dobu tuhnutí. Vysoká rychlost tuhnutí vede ke vzniku jemnozrné struktury, což je z hlediska struktury a mechanických vlastností žádoucí. Tato metoda výroby také zvyšuje přesnost odlitků. [2]

Proces lití s následnou lokální krystalizací pod tlakem (local squeeze casting) je zobrazen na obr. 1.10.



Obr. 1.10 Schématický diagram ukazující postup lití s krystalizací pod tlakem (squeeze casting) [25].

Výhody lokálního dotlaku [2]:

- kvalitnější mechanické vlastnosti,
- dosazování při krystalizaci,
- jemná struktura,
- eliminace pórovitosti,
- dokonalý tvar – přesnost,
- těsnost odlitků,
- úspěšnost při určitém počtu kusů,
- možnost odlévat speciální slitiny.

Nevýhody LSC [13,26]:

- vysoké investiční náklady,
- zařízení složitější na údržbu a servis,
- nižší životnost forem,
- omezená životnost razníků.

1.4 Porezita v hliníkových slitinách

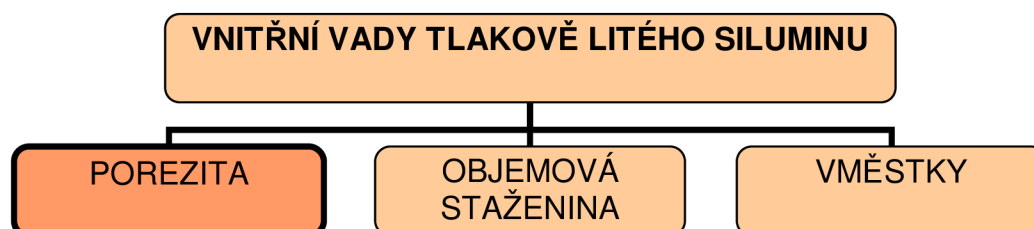
Základem úspěchu ve snižování neshodných výrobků je vadám v odlitcích předcházet a vytipovaná místa, kde by se mohly potenciální vady vyskytnout, technologicky ošetřit takovým způsobem, aby ke vzniku vad nedošlo. Dnes se k těmto úkonům často používají počítačové simulační programy, které o predikci vad hodně napoví. Avšak někdy i dokonale zvládnutý technologický postup vzniku odlitku neznamená záruku kvalitní výroby, protože slévárství je proces, do něhož vstupuje celá řada náhodných vlivů a parametrů. Ať už se jedná o materiály trvalých forem, vstupní suroviny, proces tavení, odlévání, tepelného zpracování, dodržení technologického postupu nebo klimatu ve slévárně. [2]

Obecně vady odlitků ze slitin hliníku vznikají převážně v souvislosti s těmito technologickými faktory [10]:

- zabíhavost slitiny,
- sklon ke vzniku soustředěných staženin či ředin,
- sklon ke vzniku trhlin,
- sklon k naplynění taveniny,
- sklon ke vzniku plynových dutin v odlitcích.

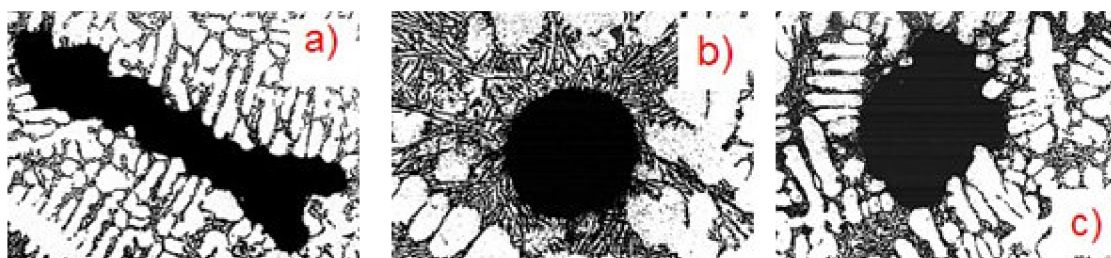
Větší část slévárenských vad je možné zjistit na makrostruktuře. Výhodou použití zkoušení makrostruktury je relativně jednoduchá příprava zkušebních vzorků či výhoda kontroly velkých ploch. Jistou nevýhodou makrostrukturálního šetření je jeho omezenost jen na větší strukturální vady (velké vměstky, strukturální nehomogenity, trhliny) a v některých případech obtížnost přesné identifikace vady [12].

Nejméně náchylné na vznik staženin jsou již zmíněné slitiny s přibližně eutektickým složením (AlSi12). Slitiny tuhnoucí v širším intervalu teplot mají sklon tvořit rozptýlené staženiny, zatímco slitiny tuhnoucí v užším intervalu teplot vytváří soustředné staženiny. Při tlakovém lití je tvorba staženin díky vysokému činnému tlaku částečně potlačena. Sklon ke vzniku trhlin se snižuje v závislosti na intervalu tuhnutí a na velikosti zrna. Čím je zrno jemnější, tím je náchylnost nižší. Ze slévárenského hlediska jsou tedy nejvýhodnější slitiny mající úzký interval tuhnutí. [10,11,12] Na obr. 1.11 je uvedeno rozdělení vad u tlakově litých odlitků [15]:



Obr. 1.11 Rozdělení vnitřních vad u tlakově litých odlitků

Porezita bývá způsobena kombinací tvorby mikrostaženin a bublin. V případě, kdy převažuje mechanismus vzniku bublin, mají póry více kulovitý tvar, pokud převažuje mechanismus mikrostaženin, jsou dutiny tvarově členité a kopírují dendritickou stavbu kovu. [10].



a) mikrostaženina b) plynová bublina c) porezita (kombinace plynu s mikrostaženinou)

Obr. 1.12 Tvar pórů ve slitinách Al [10]

Porezita zhoršuje celou řadu užitných vlastností hliníkových odlitků [3]:

- pevnostní vlastnosti,
- únavové vlastnosti – póry jsou iniciačními místy pro vznik únavových lomů,
- těsnost – pronikání tlakového média stěnou odlitku je častou příčinou nekvalitních odlitků,
- povrchovou úpravu odlitků.

Porezita se určuje dle vztahu:

$$P = \frac{S_p}{S_o} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4)$$

P - porezita

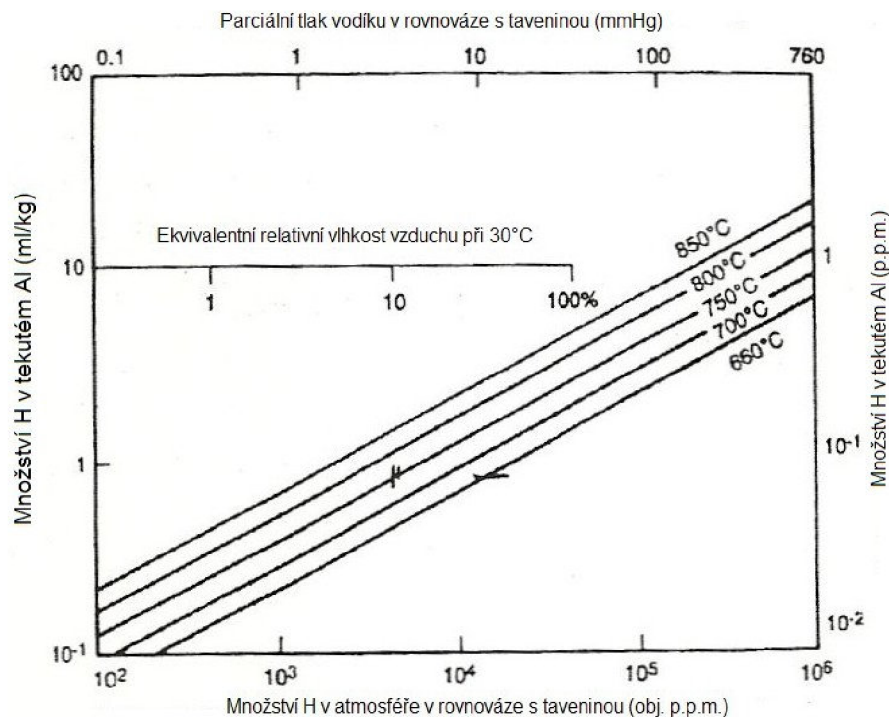
S_p – plocha pórů na zjišťované oblasti

S_o – plocha odlitku zjišťované oblasti

1.4.1 Zdroje a vznik porezity

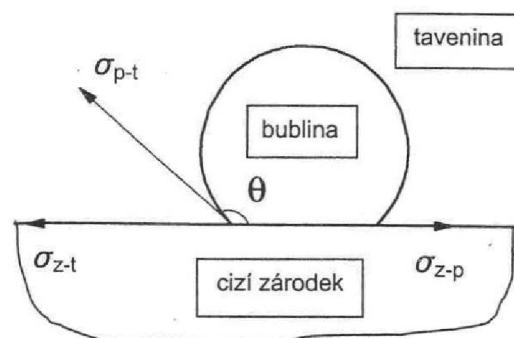
Porezita vzniká během tuhnutí odlitku při prudkém snižování rozpustnosti vodíku. Hlavními zdroji vodíku při tavení hliníkových slitin jsou vlhkost v atmosféře pece, solích, vyzdívce a na vlhkém nářadí. Vodík však může být vnášen do taveniny i ze spalín plynových pecí, při jejichž provozu vznikají uhlovodíky, které mohou být po disociaci dalším zdrojem vodíku. [2]

Závislost naplynění hliníkové taveniny na relativní vlhkosti, teplotě taveniny, parciálním rovnovážném tlaku ukazuje obr. 1.13 [27].



Obr. 1.13 Obsah vodíku v roztaveném hliníku při různých teplotách [27]

Bubliny způsobené vodíkem vznikají při nedostatečné rafinaci, tj. při nevyhovujícím odplynění [28]. Žádoucími nukleačními zárodky bublin jsou částice, které nejsou smáčivé taveninou. Hodnota povrchového napětí mezi zárodkem a taveninou σ_{z-t} je v tomto případě malá a úhel $\Theta > 90^\circ$. Toto kritérium je splněno hlavně u oxidů, jenž se pochopitelně stávají častými nukleačními zárodky bublin. [2]



Obr. 1.14 Tvorba bublin na cizím zárodku [10]

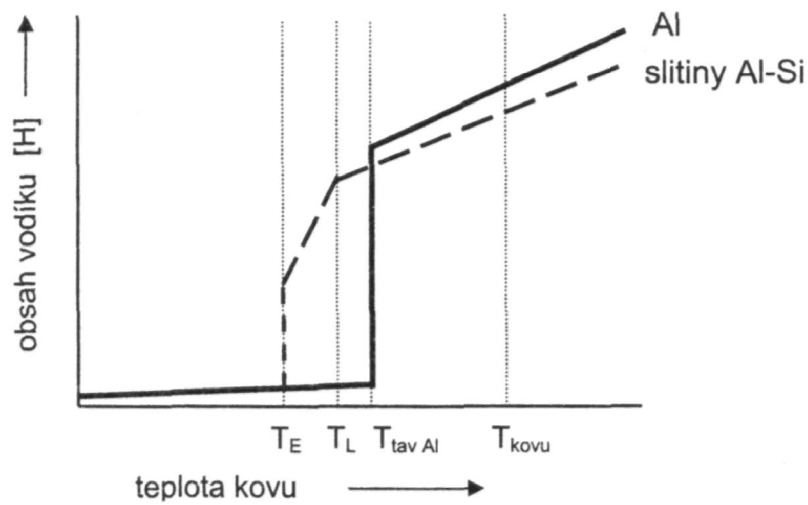
Vztah mezi napětími určuje kontaktní úhel Θ a tedy smáčivost cizího zárodku a bubliny, viz. obr. 1.14.

$$\cos \Theta = [(\sigma_{z-t} - \sigma_{z-p})] / \sigma_{p-t} \quad [9] \quad (5)$$

σ_{z-t} – povrchové napětí mezi zárodkem a taveninou [Pa]

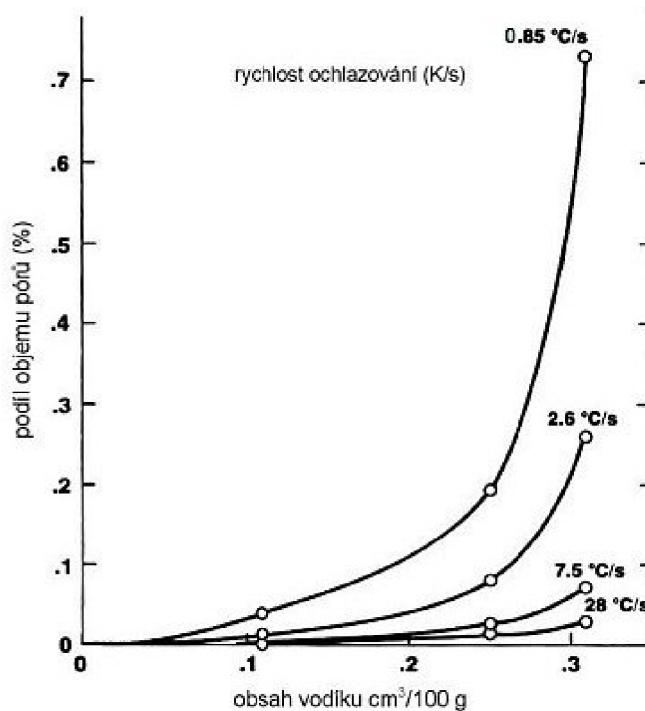
σ_{z-p} – povrchové napětí mezi zárodkem a plynem [Pa]

σ_{p-t} – povrchové napětí mezi plynem a taveninou [Pa]



Obr. 1.15 Vliv teploty na rozpustnost vodíku v hliníku a siluminech [10]

Množství vodíku rozpuštěného v kovu závisí především na rychlosti ochlazování. Při ochlazování roztaveného siluminu dojde ke snižování rozpustnosti vodíku. Pro slitiny hliníku je typický rozdíl rozpustnosti vodíku v tuhém a v tekutém stavu. Množství rozpuštěného vodíku v tuhém stavu při teplotě 660°C dosahuje v hliníkové slitině rozpustnost 0,036 cm³/100g, přičemž v roztaveném kovu za stejné teploty je rozpustnost 0,77 cm³/100g. Při překročení meze rozpustnosti vodík z taveniny uniká buď difuzí nebo se ve slitině tvoří plynové dutiny. [2,10]



Obr. 1.16 Vliv obsahu vodíku a rychlosti ochlazování na objem pórů [10]

Dalším důležitým faktorem ovlivňujícím množství rozpuštěného vodíku v tavenině je teplota roztaveného kovu. Platí, že se vzrůstající teplotou se rozpustnost zvyšuje. Je tedy nežádoucí taveninu zbytečně přehřívat. Pokud je v tuhém kovu rozpuštěno větší množství vodíku, než odpovídá rovnovážné hodnotě rozpustnosti, označuje se tento stav jako přesycený tuhý roztok [10].

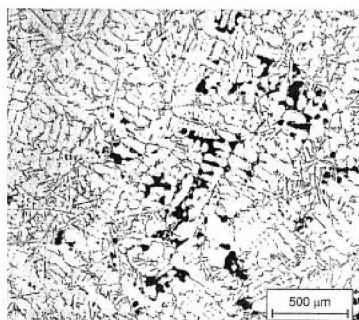
Tvarové hledisko a s ním spojená poloha póru ve struktuře je závislá především na morfologii tuhé fáze, na rychlosti tuhnutí a obsahu plynu (udává se, že čistě plynové póry u hliníkových slitin vznikají při obsahu vodíku vyšším než $0,4 \text{ cm}^3/100\text{g}$). Čím více je v tavenině plynu, tím více se tvoří plynové dutiny kulovitého tvaru a to již při nízkém podílu ztuhlé fáze. Vliv rychlosti ochlazování je patrný na první pohled. Při pomalém tuhnutí difunduje vodík do bublin na relativně velké vzdálenosti a z toho důvodu se utváří velké bubliny. Naopak pokud postupuje krystalizační fronta rychle, bubliny jsou obalovány vrstvou tuhajícího kovu velmi stěžující, resp. zabraňující difúzi, a tím pádem omezující následný růst bublin. Výsledný stav se podobá malým kulovitým či protáhlým bublinám (typický případ tlakového lití) [10,27].

Vliv na množství a rozmístění pórů mají rovněž očkovaní a modifikace taveniny. Soustředné větší dutiny se vyskytují u nemodifikovaných, neočkovaných tavenin. Naopak modifikované a očkované taveniny mají snahu tvořit rozptýlené mikrostaženiny [10,13].

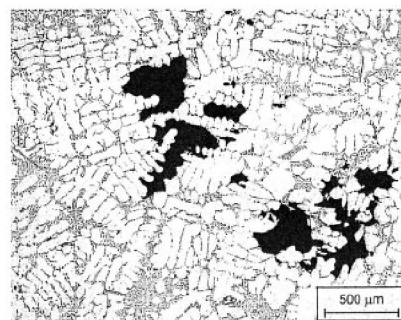
1.4.2 Snížení porezity hliníkových slitin

Řízení porézности závisí na pochopení jejích zdrojů a příčin. Významného zlepšení v kvalitě výrobku, provedení součásti a návrhu spolehlivosti může být dosaženo, jestliže lze porezitu v odlitcích kontrolovat nebo odstranit. Porézность v odlitcích je zaviněna bublinami uzavřenými během tuhnutí. Zdrojem porézности porezity u odlitků obecně je vzduch zachycený během plnění, soustředěné staženiny, které se vyskytují během závěrečného tuhnutí, bubliny z neodvzdušněných jader, reakce u stěny formy, rozpuštěné plyny z tavby a okuje nebo strusku obsahující bublinatost. [27]

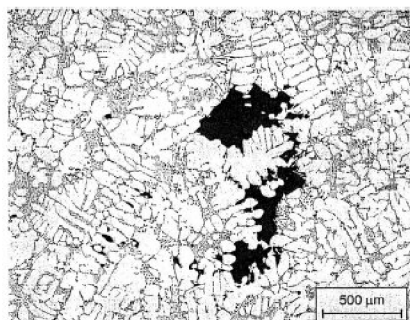
Bylo prokázáno, že modifikace nebo rafinace eutektického křemíku významně zvyšuje mechanické vlastnosti hliníkových slitin. Ale bylo také prokázáno, že slitiny modifikované Na, Sr nebo rafinované Sb vykazují stejné vlastnosti. Někdy se pozoruje rozdíl mezi Na a Sr na jedné straně a Sb na straně druhé. Je to v důsledku skutečnosti, že oba, Na a Sr, podporují výskyt porézности. [29]



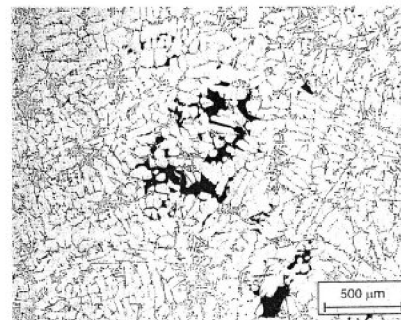
a) nemodifikovaná slitina



b) slitina modifikovaná stronciem



c) slitina modifikovaná sodíkem



d) slitiny modifikovaná antimonem

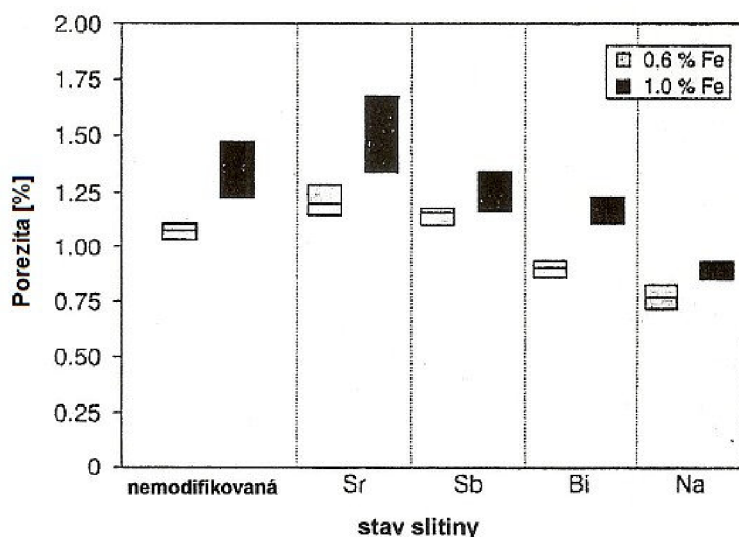
Obr. 1.17 Morfologie pórů u slitiny AlSi9Cu3 s obsahem 0,6 % Fe [30]

U slitiny AlSi9Cu3 se projevuje kritický obsah železa, nad kterým se zvětšují houbovitě defekty pórovitosti. Ukázalo se, že kritický obsah železa je 0,7 % (hmotnostního podílu), což odpovídá tuhnutí ternárního eutektika AlFeSi. U kritického obsahu železa se ukázalo, že koncentrace Fe roste při rychlejší chladnutí. Destičky β -AlFeSi fyzicky blokují průtok dosazovaného likvidu v mezidendritických oblastech, což vede ke vzniku pórovitosti. Při modifikaci hliníkové slitiny stronciem se ukázalo, že zvyšuje obsah pórovitosti u odlitků ze slitiny AlSi9Cu3, zatímco modifikace sodíkem produkovala významně menší množství pórovitosti v porovnání s nemodifikovanými slitinami. Odlitky s obsahem antimonu a bismutu vykazovaly pórovitost na podobných úrovních, jako nemodifikované slitiny. [30]



Obr. 1.18 Jehlicová fáze železa [10]

Při podkritickém množství železa nukleuje eutektikum Al-Si nezávisle na β -destičkách v omezeném počtu lokací, což má za následek vznik izolovaných pórů. Avšak při kritickém obsahu železa existuje předpoklad, že ternární eutektikum je tvořeno malými ternárními β -destičkami, jenž nukleují a vzniká množství jemných eutektických buněk Al-Si. Dendritická struktura je poté mnohem pevnější a dochází k minimalizaci pórovitosti [3].



Obr. 1.19 Závislost porezity na úpravě a stavu slitiny AlSi9Cu3 při různém obsahu Fe [15]

Pórovitost vyskytující se v tlakově litých odlitcích je jednou z nejčastějších příčin výskytu neshodných dílů ve výrobním procesu. Kromě možné netěsnosti odlitků, ovlivnění povrchové jakosti a jiných nežádoucích vlivů na jakost odlitků je všeobecně známo, že plynové póry a dutiny zapříčiňují zhoršení mechanických vlastností litých materiálů. [31]

Občas udávaný úbytek mechanických vlastností je pravděpodobně způsoben vlivem rafinace zrn na poréznost. Ve slitinách se zjemněným zrnem je porezita jemnější a tudíž méně škodící s ohledem na mechanické vlastnosti. Rafinování zrn tak snižuje rozptylování mechanických vlastností slitin, které se projevuje zvýšenou tendencí k tvorbě trhlin za tepla. [29]

Není přípustné přehřívání taveniny či jiné hrubé chyby během tavení. Transport kovu od pece k tlakovému stroji by měl probíhat ve vyhřátých pánvích, aby se zamezilo naplynění z navlhle vyzdívky transportní pánve. Volba udržovací pece u stroje by měla opět respektovat podmínku co nejnižšího naplynění, tím je myšlena skutečnost, že by nemělo docházet k nadměrnému promíchávání taveniny. S výhodou se jako udržovací pece používají odporové agregáty.[10,15]

K odplynění hliníkových slitin se používá:

- vakuování taveniny
- probublávání taveniny aktivními či neaktivními plyny

Úkolem odplyňování je snížit obsah vodíku na úroveň, jenž zamezí vyloučení bublin. Možné obsahové zastoupení vodíku v tavenině závisí na způsobu lití, konstrukci odlitku – rychlosti tuhnutí a pochopitelně na účelu užití odlitku [10].

Ke snižování porezity dochází také při lití s lokálním dotlakem, kdy je na identickém druhu odlitku porezita nižší než u klasického tlakového odlévání, neboť se kritická oblast porezity eliminuje tlakem razníků. Nikdy tedy nebude tlakově litý odlitek zcela bez vad. S tímto faktem je pochopitelně nutné počítat při požadavcích kladených na výrobek. [2]

Při tlakovém lití hliníkových slitin se po uvážení a zhodnocení situace může dojít k závěru, že odplynění taveniny není nezbytné provádět z důvodu nároku na kvalitu výrobku a vzhledem k vyšším nákladům na výrobu, neboť rychlost ochlazování kovu je dostatečně velká, aby vzniklá porezita nepřekračovala stanovenou interní normu.

1.5 Simulace

Moderní slévárny potřebují rychle reagovat na každý požadavek svých klientů. Numerická simulace účinně a prakticky pomáhá při návrhu a optimalizaci slévárenských procesů. Výkonné programy jsou nyní schopné simulace celého procesu ve formě. [32]

Simulačního programu pro optimální konstrukci odlitku se ve slévárně užívá zejména pro lepší spolupráci mezi zákazníkem a firmou a jednotlivými výrobními odděleními. Efektivní příprava na výrobu je založena na týmové práci od vzniku ideje až po její realizaci. Znalostí aplikací metod počítačových simulací při zhotovení odlitků a zajištěním optimálních slévárenských parametrů je možno ušetřit nemalé finanční prostředky. Simulační programy bývají používány při plnění dutiny formy, tuhnutí a chladnutí odlitku a slouží hlavně k optimalizaci konečného výrobku. Při jejich aplikaci je prioritou slévárenská konstrukce odlitku zamezující vzniku vad. [2]

1.5.1 Simulační program Magma

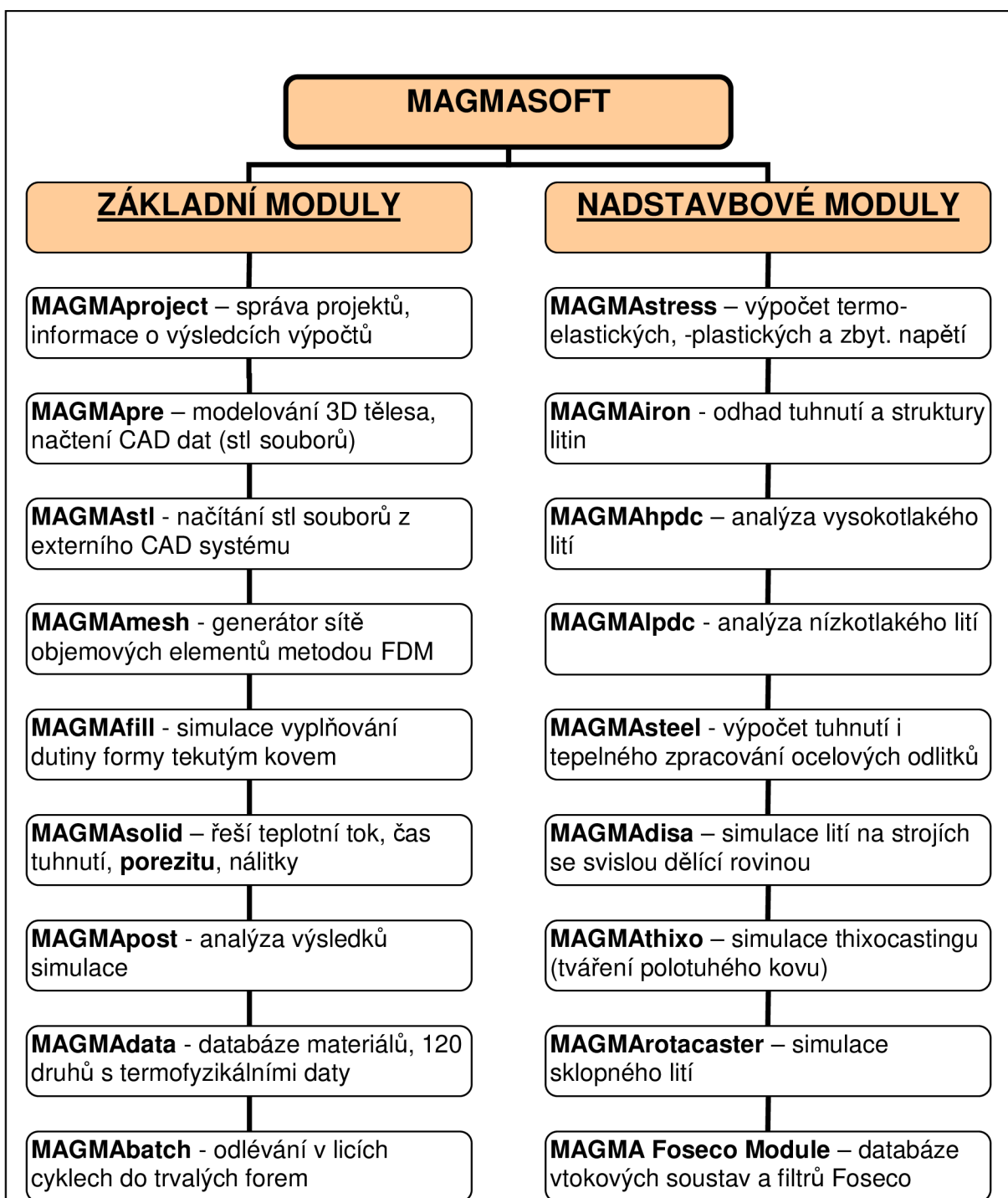
Magma je simulační program založený na simulaci tepelného toku, dynamiky tečení, napětí materiálu, změn struktury v průběhu tuhnutí při uvažování reálných technologických podmínek odlévání. Rozsah analýzy umožňuje řešení jak masivních ocelových odlitků odlévaných gravitační metodou do písku, přes odlévání hořčíku a slitin mědi, tak i tlakové lití drobných odlitků ze slitin hliníku. Systém pochopitelně umožňuje použití chladítek, exotermických obkladů a zásypů a dolévání nálitků. [33]

Se vzrůstající dobou tuhnutí se zvětšuje objem pórů, proto je doba tuhnutí určujícím parametrem pro kvalitu struktury odlitku, která může při simulaci vést k prognóze mechanických vlastností výrobku, jsou – li známy vzájemné vztahy mezi těmito parametry a strukturou materiálu [34].

Porezita ovlivňuje mechanické vlastnosti podílem, uspořádáním, velikostí a formou jednotlivých pórů. Z technického i ekonomického hlediska je proto důležité znát kvantitativní vliv porezity na mechanické vlastnosti. [34]

Programový systém je založen na praktickém přístupu k řešení formy, umožňuje pracovat s existujícími CAD daty většiny systémů, přičemž další

definování podmínek procesu lití a výběr použitých materiálů je plně ponechán na uživateli. Řada optimalizačních postupů vede ke značnému snížení neshodných výrobků, urychlení doby výroby a optimalizaci konstrukce formy. V programu MAGMA-5 jsou všechny kroky procesu simulace prováděny paralelně: je možné interaktivní zobrazení a definice procesu lití, manipulace s geometrií nebo simultánní vyhodnocování výsledků. [35]



Obr. 1.20 Stručný popis modulů programu Magma [36]

Doplňující popis některých modulů Magma [36]:

MAGMAfill je modul, který simuluje vyplňování dutiny formy tekutým kovem. Řeší plnění vtokové soustavy, odhaduje možnost vzniku eroze formy, provádí výpočet plnicích časů a výpočet různých kritérií. Dále sleduje průběh proudění a vznik turbulentních oblastí, sleduje tlaky a teploty v tavenině, jakož i rychlosti proudění kovu v jednotlivých částech technologie.

MAGMAbatch je určen pro řešení problematiky odlévání v licích cyklech do trvalých forem (kokil). Tato část řeší rozložení teplotního pole a podmínky tečení, časy cyklů za kritériálních podmínek, teploty formy a odlitku v čase otevření a na začátku nového cyklu, optimální čas otevření.

MAGMAhpd se používá při analýzách vysokotlakého lití. Při tomto způsobu odlévání jsou zohledněny jednotlivé etapy výrobního procesu, jako plnění plnicí komory, pohyb pístu a samotné plnění odlitku. Modul nabízí možnost simulování libovolného počtu cyklů, kontrolu chladících okruhů, použití postříku a nátěru formy, jakož i působení dotlaku při tuhnutí (lokální squeeze casting).

MAGMASolid řeší problémy teplotního toku ve formě při uvažování teplotně proměnných vlastností taveniny a umožní získat informace o zaplnění a porezitě ve formě. Řeší časy tuhnutí, teplotní gradienty a chladící poměry v každém bodě, teplotní zatížení jader a formy, chladící křivky, vhodnost umístění nálitků, jakož i možnost provádět jejich dolévání.

MAGMApost je určen k analyzování výsledků simulace. Tyto výsledky jsou prezentovány v třírozměrných barevných pohledech a popisují například rychlost a čas plnění dutiny formy, vektory směru proudění kritériální funkce pro staženiny, křivky chladnutí a dosazovací schopnosti nálitků.

Software Magmasoft slouží k simulaci plnění a tuhnutí odlitků. Je schopen zobrazit dynamiku tečení kovu, tepelný tok, napětí a deformaci materiálu, změny struktury kovů při jejich tuhnutí a určit exaktně defektní místa. Jedná se o úplný výkonný nástroj, jehož použitím lze dosáhnout snížení neshodných výrobků, zvýšení využití kovu a snížení celkových nákladů při výrobě odlitků. Program se vyznačuje uživatelsky příjemným prostředím, krátkým časem výpočtu, vysokou přesností, efektivitou a jednoduchostí obsluhy. Tento program původně vznikl na technické univerzitě Aachen (RWTH), ale v současné době se o další vývoj a zdokonalování programu stará firma Magma GmbH. Jedná se v současné době o nejrozšířenější simulační program na světě – zhruba 750 instalací z toho 12 v ČR. [3]

Další možností programu je výpočet eroze formy, a to jak u pískových forem, tak u kokil pro vysokotlaké lití. Při výpočtu se vychází z referenčních hodnot, po jejichž překročení dochází k erozi. Velmi efektivní funkci je výpočet přetlaku vzduchu, který vzniká při plnění dutiny formy. Přitékající tavenina stlačuje vzduch, který se nachází uvnitř, a ten má možnost unikat přes samotnou formu nebo odvodušňovací kanály. [3] Tak se dostává slévárenským technologům do rukou nástroj, který podstatně zjednodušuje návrh a následnou optimalizaci vtokové a odvodušňovací soustavy [37].

Cílem firmy Magma je nabídnout slévačům uživatelsky příjemný programový balík, který je založen na korektní vědě a matematice a popisuje reálné výsledky dosahované ve slévárnách [38].

Tab. 1.4 Vyhodnocení programu Magma [3]

MAGMASoft	výhody	<ul style="list-style-type: none"> - vysoká přesnost výpočtu - efektivita a jednoduchost obsluhy - výborná vizualizace výsledků - snadné generování sítě - možnost výpočtu přetlaku vzduchu v odlitku - možnost výpočtu eroze formy - mikromodelování struktury materiálu - přesnější řešení proudění taveniny
	nevýhody	<ul style="list-style-type: none"> - při výpočtu tlakového lití program neumožňuje definovat více vstřikovacích rychlostí než 2

1.5.2 Numerická podstata programu Magma

V dnešní době se na trhu objevuje stále více firem zabývajících se výrobou simulačních programů pro různá odvětví výroby. Ve slévárenství se objevují stále častěji dvě hlavní metody. Těmi jsou metoda konečných prvků (FEM), jejíž zastáncem je např. firma RWP autor programu SIMTEC, a metoda konečných diferencí (FDM), kterou zastává např. firma MAGMASOFT. [6]

Používání metody pro výpočet napětí FEM vedlo k tomu, že síť podle této metody se poměrně obtížně vytvářela, v problematice se orientovali pouze specialisté a kvalita použité sítě velmi citelně ovlivňovala přesnost výsledků. Pro překonání těchto obtíží byl vyvinut nový software pro výpočet napětí, který je založen na řízených objemech podle metody FDM. Tvorba sítě podle této metody je snadná a výsledky přesně odpovídají realitě. [3]

Program Magmasoft pracuje na základě metody konečných diferencí, což znamená, že výpočetní síť je tvořena „kostičkami“. Tento proces generování sítě je prováděn plně automaticky a doba trvání síťování se pohybuje okolo 1 minuty. Do tohoto automatického procesu může uživatel vstoupit pro určení velikosti jednotlivých elementů a jejich vzájemného poměru. Předností FDM metody je její rychlost, automatizace a přesnost bez nutnosti podrobných znalostí o generování sítě. [3]

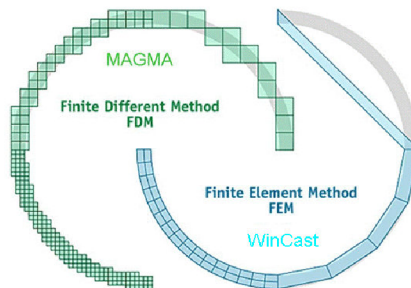
Vygenerování sítě tvoří síť pouze pro odlitek, ale také pro vtokovou a nálitkovou soustavu, formu, jádro a chladicí kanály [12].

Východím bodem metody FDM je časově závislé rozdělení teploty v odlitku, jenž je popsáno diferenciálními rovnicemi. Ty však mohou být analyticky řešené jen pro kouli nebo nekonečnou plochu. Všechny ostatní tělesa lze řešit jenom na základě podobnosti. Pomocí této diferenční metody se úloha převede dle diferenciálního operátoru (nejčastěji pomocí Taylorova rozvoje) na diferenciální rovnice, podle níž se různá tělesa mohou řešit za určitých omezení - okrajové podmínky pro řešení diferenciálních rovnic. Tohoto postupu je využito v simulačním programu Magma. [6]

Princip spočívá v tom, že diferenciální rovnice je jednoduše změněna v rovnici diferenční. K vyřešení diferenční rovnice je geometrie rozdělena na ortogonální (strukturovanou) síť. Příkladem je vztah (6), který popisuje Fourierovu diferenciální rovnici nestacionárního vedení tepla. Vztah (7) pak zobrazuje tuto diferenciální rovnici transformovanou do podoby diferenční rovnice (zde pro jednodimenzionální případ). [1]

$$\rho \cdot c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q}_{zdr} \quad (6)$$

$$(\rho \cdot c_p)(T) \cdot \left(\frac{T(x, t + \Delta t) - T(x, t)}{\Delta t} \right) = \lambda(T) \left[\frac{T(x + \Delta x, t) - 2T(x, t) + T(x - \Delta x, t)}{(\Delta x)^2} \right] \quad (7)$$



Obr. 1.21 Znárodnění použitého síťování metod FEM a FDM [39]

1.5.3 Potřebné údaje před zahájením simulace

Vstup pro simulaci lití

Souhrnně lze říci, že za vstup do počítačové simulace lití lze považovat [36]:

- **geometrii** – CAD data a data modelována v interním modeláři simulačního programu,
- **výpočetní techniku** – jejich vybavení rozhoduje o rychlosti výpočtu simulací lití,
- **matematický aparát** – řeší jednotlivé úkoly simulace – např. přestup a šíření tepla, modelování plnění, kritériální funkce apod. Matematický algoritmus je dán typem simulačního programu,
- **termofyzikální veličiny:**
 - interní – termofyzikální data o materiálech obsažených v databázi simulačního programu,
 - externí – data zadávaná do simulačního programu před samotným spuštěním simulace nebo upravená data z databáze simulačního programu, tj. účelem je doplnit databázi o termofyzikální data o novém materiálu, resp. nového chemického složení, či zpřesnit simulaci na základě zkušeností.

Přesnost výpočtu numerické simulace lití závisí především na typu síťování, které může být strukturované nebo nestrukturované. V prvním případě je doména rozdělena do pravidelného uspořádání trojúhelníků ve 2 rozměrech sledující některé souřadnicové osy. Tato síť se velmi snadno generuje jednoduchým zakreslením vertikál, horizontál a zahrnutím průsečíků s hranicemi. Nestrukturované síť sestávají z vydláždění domény pomocí čtyřstěnů (trojúhelníků v 2D), pětistěnů nebo šestistěnů (čtyřúhelníků v 2D), které jsou nezbytně pravouhlé. Povrch je dán součtem všech povrchů prvků, přes které prochází teplo. [36]

Termofyzikální veličiny [5]:

- **Měrná hmotnost** – udává se v závislosti na teplotě,
- **Měrná tepelná kapacita** - udává množství tepla [J] potřebného k ohřátí 1 kg o 1 K,
- **Skupenské teplo** - množství tepla potřebné ke změně skupenství (při tavení nebo tuhnutí),
- **Teplota likvidu a solidu** - slitiny tuhnou v intervalu tuhnutí. Během fázové přeměny se předává skupenské teplo. Při tuhnutí dochází ke smršťování, které při nedostatečném přísunu tekutého kovu může vést ke vzniku dutin,

Tab. 1.5 Teploty likvidu a solidu v simulačních programech [5]

	AlSi9Cu3(Fe) - DIN	MAGMA
Teplota likvidu (°C)	600	578
Teplota solidu (°C)	490	479

- **Tepelná vodivost** [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] - během krátkých plnicích časů se neprojeví malé odchylky tepelné vodivosti licího materiálu během licího procesu. Tepelná vodivost kovu je omezena horší vodivostí formy,
- **Viskozita** – uvádí se jako funkce teploty. Ochlazování tekutého kovu při plnění formy má za následek silný vzrůst viskozity, u tenkostěnných odlitků může dojít i ke ztuhnutí kovu před zaplněním dutiny formy. Proto se obvykle volí doba plnění formy co nejkratší, aby se tomuto nedolití zabránilo.

Okrajové podmínky [5]:

- **Teplota formy** – pro Al slitiny kolem 200°C,
- **Licí teplota** - zcela neodpovídá teplotě v peci, je třeba určit ztráty ve vtokové soustavě mezi licí komorou a okrajem dutiny formy vlastního odlitku,
- **Rychlost taveniny** - udává se na okraji modelu. Může se vypočítat prostřednictvím poměrů ploch mezi průřezem licího pístu a průřezem zářezu ze známé rychlosti pohybu pístu,
- **Koeficient přestupu tepla** - při plnění formy je tento koeficient závislý na rychlosti plnění. Po ukončení plnění formy a započatém tuhnutí odlitku závisí na geometrii odlitku. Pro správný výpočet je nutné znát co nejlépe kontaktní podmínky v různých úsecích formy,
- **Drsnost povrchu** - drsnější povrch zpomaluje proudění taveniny u stěn formy a ve středu proudu je poté rychlost vyšší. Při tuhnutí odvádí drsnější povrch oproti hladšímu více tepla díky své větší ploše.

Při výpočtech napětí a deformací k těmto datům navíc přistupují znalosti modulů pružnosti, teplotní roztažnosti a další. Je nutné podotknout, že tato data jsou pro výpočet užitečná pouze v případě, jsou-li funkcí teploty. [3]

Teplotní závislosti je možno také měnit podle požadavku uživatele. Definování tepelné vodivosti λ a měrné tepelné kapacity c u jednotlivých simulačních programů se liší. V simulačních programech jsou tato data zadávána z příslušných databází. [3]

1.5.4 Zjištění výskytu porezity simulací

Simulace horního dílu bloku motoru byla provedena v simulačním softwaru Magma firmy Magmasoft v podniku Škoda Auto a.s. – Mladá Boleslav. Byl porovnáván výskyt porezity v odlitku vypočtené simulačním softwarem s výskytem porezity ve skutečně vyrobeném odlitku horního bloku tříválcového motoru. Při vyhodnocování velikosti plochy porezity určených softwarem Magma je k dispozici stupnice s barevnou škálou s nastavitelným rozsahem hodnot.

Porezita v hliníkových slitinách může vzniknout několika způsoby [40]:

- porezita způsobená vodíkem rozpuštěným v tavenině,
- porezita vzniklá uzavřením plynu v tavenině při lití,
- porezita v odlitku způsobená stahováním kovu při ochlazování – staženina.

MAGMASoft dokáže analyzovat porezitu vzniklou uzavřením plynu v tavenině při lití a to na základě výpočtů proudění kapalin, vzduchu či špatného odvodu vzdušné formy. Vznik staženin analyzuje na základě výpočtů změny objemu slitiny a na základě výpočtu teplotního pole. [41]

Z neustále narůstajících požadavků na zatížitelnost odlitků vyplývá nutnost jejich plného využití nebo zvýšení pevnostních a tvářecích vlastností. S tím spojená zpřísněná kvalitativní kritéria vyžadují přesnější zkoumání vlivů různé pórovitosti a podle možnosti kvantitativní popis na základě teoretických modelů. [42]

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část popisuje dva způsoby měření porezity a její závislost na mechanických vlastnostech. Zhodnocuje zvláště míru porezity na mezi pevnosti, smluvní mezi kluzu a tažnosti pro blok motoru vyráběný tlakovým litím s lokálním dotlakem a klasickou metodou tlakového lití bez lokálního dotlaku.

Popisná část se věnuje výrobě a parametrům technologie tlakového lití v Škoda Auto a.s. v Mladé Boleslavi. Cílem experimentální části diplomové práce je na vzorcích odlitku horního dílu R 03D 103 019 M bloku motoru sériově litých s použitím lokálního dotlaku (LSC) a odlitku horního dílu R 03D 103 019 M bloku motoru litých bez lokálního dotlaku porovnat mechanické vlastnosti naměřené Lefnerem [2] na výskytu makroskopické strukturní vady a následně co nej přesněji vyjádřit jejich grafické závislosti.

Předmětem zkoumání je zmíněný zážehový tříválcový motor, přesněji blok válců o objemu 1198 ccm s typovým označením EA 111 03D. Jeho blok se skládá z horního (R 03D 103 019 M) a spodního dílu (R 03D 103 166 H), vyráběných ze slitiny AlSi9Cu3.

Tato pohonná jednotka je dodávána ve dvou variantách, jako šestiventilová nebo dvanáctiventilová, do vozů Škoda Fabia, Škoda Roomster, VW Fox, VW Polo a Seat Ibiza. [2]



Obr. 2.1 Horní díl 3 válcového bloku motoru EA111 03D/1,2l [8]

Pro stanovení mechanických vlastností byla vybrána tahová zkouška, provedená Lefnerem [2], která se uskutečnila v laboratořích Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně.

Z ní byly získány hodnoty meze pevnosti, smluvní meze kluzu, tažnosti a zúžení. Zkoumání strukturních vlastností se zaměřuje na vyhodnocení porezity, které bylo prováděno na Ústavu materiálového inženýrství FSI VUT. Tyto experimentálně zjištěné hodnoty u nového i stávajícího typu bloku motoru byly poté podrobeny srovnání s počítačově nasimulovanou hodnotou porezity. Cílem práce je vyhodnotit zvyšující se množství porezity vzhledem k mechanickým vlastnostem, použité technologii výroby a zjistit, která metoda výroby je postačující vzhledem k finančním nákladům a vnitropodnikové normě 5 % výskytu porezity v odlitku.

Geometrie vnějších rozměrů obou odlitků zůstala prakticky zachována. Kvůli změněné technologii výroby je u bloku bez LSC odlišná ložisková oblast uložení klikové hřídele, která je patrná na obrazovém výstupu ze simulačního programu Magma.

Všechny další parametry mají bloky identické včetně funkčních rozměrů. V experimentu je pak stávající sériově produkován blok reprezentován technologií tlakového lití s lokálním dotlakem (LSC), nový blok motoru je suplován technologií tlakového lití bez LSC. [2].

Dle normy ČSN EN 1706 by tato slitina měla mít po odlití bez žíhání a setrvání několik dní při pokojové teplotě následující mechanické vlastnosti [9]:

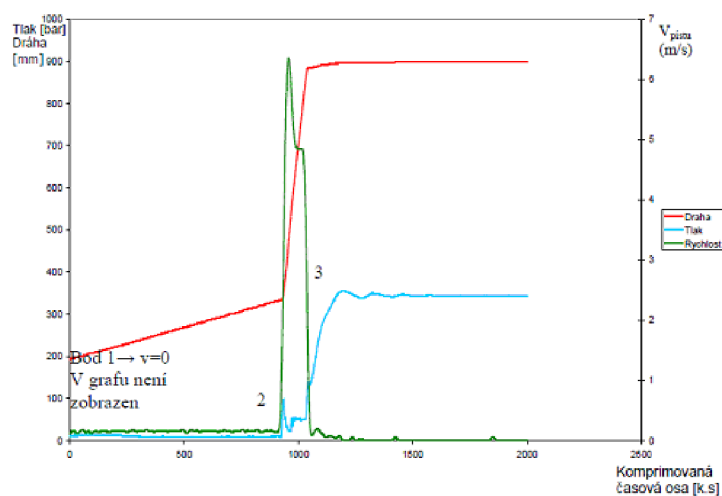
- pevnost v tahu $R_m = 240$ MPa,
- smluvní mez kluzu $R_{p0,2} = 140$ MPa,
- tažnost $A < 1\%$,
- tvrdost dle Brinella = 80 HB.

Výroba bloku motoru

Tavení slitiny AISi9Cu3 probíhá v plynové šachtové tavicí peci Striko 5000. Podtlakový systém BDW/PROCES MFT zabezpečuje zlepšení vnitřní čistoty formy a tím zamezuje výskytu potencionálních vad v odlitku odčerpáním vzduchu z jejího prostoru pomocí jednoho či dvou ventilů. Udržování taveniny na navolené teplotě a automatické dávkování taveniny přes licí žlábek do komory před licí píst zabezpečuje odporová udržovací pec Striko Westofen. Dávkování roztaveného kovu se provádí tlakem vzduchu na hladinu taveniny v peci. Systém lokálního dotlaku sestává ze čtyř razníků, které jsou krátce po nalisování tekutého kovu do dutiny formy aktivovány a způsobují tak dotlak materiálu v oblasti ložisek. [43]

Odlévání bloku motoru

Blok motoru se odlévá na tlakových strojích se studenou horizontální komorou Idra 2000. Využití tekutého kovu je u technologie tlakového lití s lokálním dotlakem (LSC) pro horní díl bloku motoru 67%. [2]



Obr. 2.2 Orientační křivky průběhu licího procesu horního dílu bloku motoru s LSC [2]

Vysvětlivka: Před bodem 1 (oblast, která v grafu není znázorněna) je píst v klidové poloze a komora je v této době plněna dávkou tekutého kovu. Od bodu 1 se píst začne pohybovat malou rychlostí až do bodu 2. Hodnota tlaku na tomto úseku dráhy je prakticky nulová, dochází totiž k zaplňování komory tekutým kovem. V bodě 2 nastává vlastní plnění dutiny formy, dochází k výraznému nárůstu rychlosti pístu až do okamžiku zaplnění celé dutiny formy tekutým kovem. Bod 3 představuje okamžik, v němž nastává fáze zvaná dotlak, kdy je při tuhnutí odlitku vynaložen na materiál zvýšený tlak. [2]

Tab. 2.1 Parametry lití horního dílu R 03D 103 019 M [2]

Typ odlitku	R 03D 103 019 M s LSC	R 03D 103 019 M bez LSC
Licí stroj	IDRA 37	IDRA 35
Parametr/datum	26.8.2008	25.8.2008
Teplota udržovací	665 °C	660 °C
1. rychlost [m/s]	0,15	0,14
2. rychlost [m/s]	6,14	5,6
Dotlak [bar]	323	353
Tlak LSC [bar]	500-600	---
Tuhnutí [sec]	32	32
1. dráha [mm]	180	180
2. dráha [mm]	320	520
3. dráha [mm]	330	530
VAK start [mm]	200	200
VAK stop [mm]	290	490
Takt [sec]	167	167

Legenda k tab. 2.2 [2]:

- 1. rychlost - rychlost pístu při zaplňování licí komory a vtokové soustavy

- 2. rychlost - rychlost pístu od momentu zaplnění licí komory, kdy se začíná plnit tvarová dutina formy
- dotlak – dodatečné lisování pístu (multiplikace), kdy tlačí píst do zaplněné formy na konci lití (1 bar = 0,1 MPa). Nejedná se o LSC užívaný pro oblast ložisek
- doba tuhnutí - od zaplnění formy po její otevření

Při lití bez lokálního dotlaku je možné předlévat tvar pro ložiska klikové hřídele (oblast a) a je navýšen počet předlévaných otvorů (oblast b).

Při obrábění odlitků je díky nově přítomným předlitým otvorům a uložení ložisek klikové hřídele potřeba méně obráběcích operací, čímž se snižuje opotřebení obráběcích nástrojů, získá se jejich vyšší životnost, sniží se strojní časy, klesá spotřeba energií a mazacích kapalin. [2]

Tlakové lití s následným lokálním dotlakem bylo aplikováno na součásti z toho důvodu, aby došlo ke zlepšení mechanických i strukturních vlastností ve velmi namáhaných oblastech odlitku, kterými jsou oblasti ložisek pro uložení klikové hřídele. V případě tlakově litých odlitků bez lokálního dotlaku je na místě předpoklad, který je doložen i počítačovou simulací, že je možný nárůst slévárenských vad, zejména porezity, právě v oblasti ložisek. Dochází samozřejmě k ovlivnění širšího pásma odlitku než je jen ložiskový prostor, avšak nejmarkantnější změna vlastností se týká právě oblasti ložisek. Logicky tedy byly ke zkoumání rozdílů mezi oběma typy bloků motoru použity vzorky z ložiskové oblasti. [2]



Obr. 2.3 Rozdílný tvar ložiskové oblasti horního dílu starého (s LSC) a nového bloku [2]

Nevýhodné při lití bez LSC je, že existuje opodstatněná obava, aby nedošlo ke zvýšení netěsnosti odlitků, což s sebou nese nutnost zařazení dalších prací spojených s impregnací odlitků a logicky zvýšené finanční náklady. [2]

Tepelné zpracování odlitků

Odlitky jsou po odstranění vtoků a přetoků žihány pro odstranění zbytkových pnutí. Žihání je nutné, protože v oblasti ložisek, kde je uložena kliková hřídel, dochází k možným narázům kliky. Přitom vznikají velké deformace v oblasti ložisek a hrozí tak zadření kliky v motoru, obzvláště, když je motor ještě studený. [44]

Horní díl je stabilizačně žihán v elektrické žihací peci Elino. Celková doba žihání je 5,25 hod. Proces žihání sestává z postupného ohřevu na žihací teplotu 250°C, prodlevě na žihací teplotě 250°C po dobu 3 hod. a postupného ochlazování v peci na teplotu cca 45°C po dobu 1,25 hod. [2]

Po tepelném zpracování a opracování odlitku probíhá kontrola perezity a její případná oprava tmelením.

Odebrané oblasti pro mechanické zkoušky a stanovení perezity však nebyly obráběny ani žihány.

Tab. 2.2 Přehled odebraných oblastí 4. ložiska z dílu R 03D 103 019 M, litý s LSC a bez LSC [2]

Označení výřezu oblasti 4. ložiska	Identifikační údaj výřezu	LSC	Žiháno	Obrobena
HDS1	6.9./35,II	ano	ne	ne
HDS3	8.9./37,II	ano	ne	ne
HDS6	8.9./35,II	ano	ne	ne
HDS10	10.9.37,I	ano	ne	ne
HDS11	9.9./36,I	ano	ne	ne
HDS12	8.9./36,I	ano	ne	ne
HD1 až HD13	25.8./35,II	ne	ne	ne

Značení vzorků:

HDS – tlakově litý odlitek horního dílu motoru s lokálním dotlakem

HD – tlakově litý odlitek horního bloku motoru

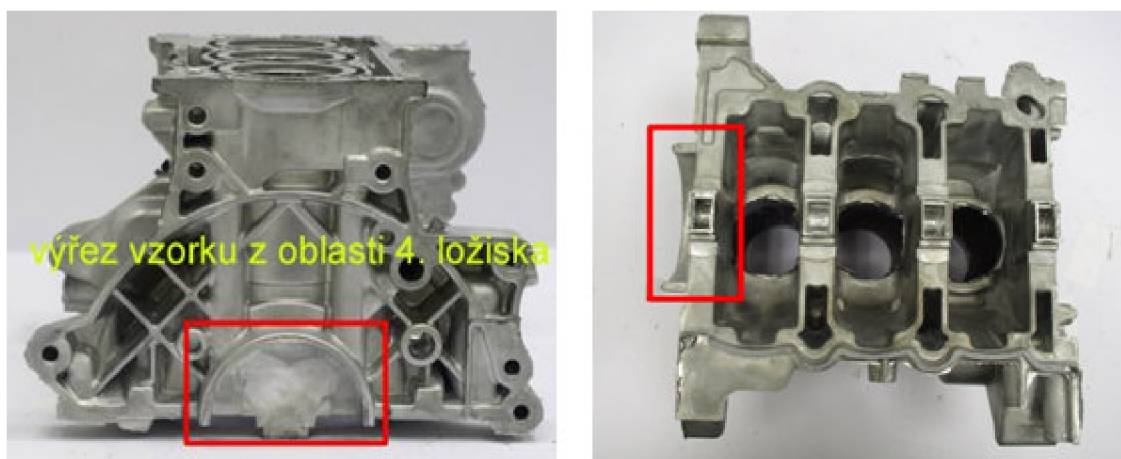
2.1 Výběr testovaného místa

Mechanické pevnostní vlastnosti (tah, tlak, tvrdost, tažnost, vrubová houževnatost) patří díky velkému praktickému významu k vlastnostem, které jsou nejčastějším kritériem, podle kterého se rozhoduje o vhodnosti určitého materiálu a jeho předpokládaného použití. Nejčastěji používanou zkouškou pro zjištění mechanických charakteristik je zkouška tahem. Při této zkoušce se obvykle určují meze pevnosti R_m , meze $R_{p0,2}$ a tažnosti A, případně kontrakce Z. [12]

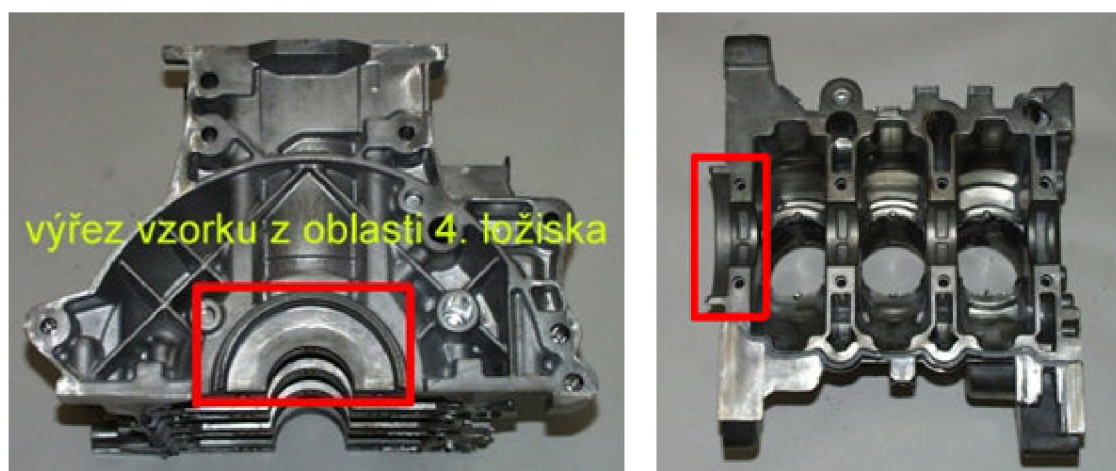
Z hlediska vhodnosti pro praktické použití lze běžné metody pro zkoušení porézности rozdělit na destrukční a nedestrukční metody. Dále jsou tyto metody pro detekci a rozlišení mikro a makroporézности rozdílně vhodné. Pomocí několika metod, jako je např. zkouška těsnosti podle Archimédova zákona, můžeme poskytnout pouze přehled o objemové porézности. Jiné metody, jako např. zkouška řezem a výbrusem, se hodí pro lokální zkoušky. Zde se přisuzuje obzvláště v pevnostně kritických oblastech konstrukčního dílu velký význam

digitálnímu vyhodnocení obrazu, vzhledem k vztahu mezi poréznošti a mechanickými vlastnošti. [45]

Zkouška řezem a výbrusem, se hodí pro lokální zkoušky. Pro posuzování objemové poréznošti je tato metoda spíše nevhodná. Její aplikace vyžaduje vysoké náklady na řezy a výbrusy. [3]

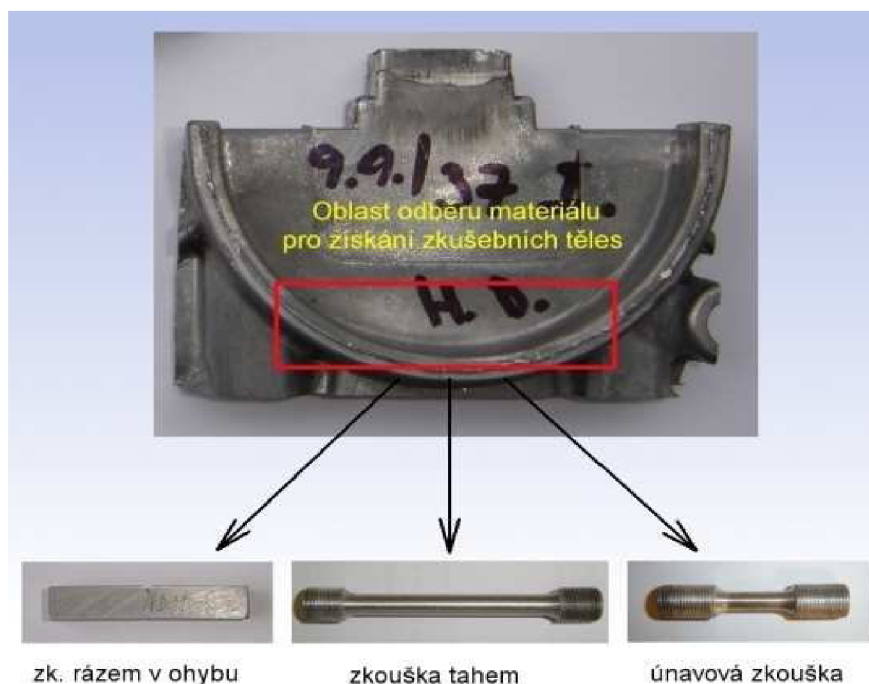


Obr. 2.4 Hrubý odlitek horního bloku válců R 03D 103 019 M s použitím LSC
boční a spodní pohled [2]

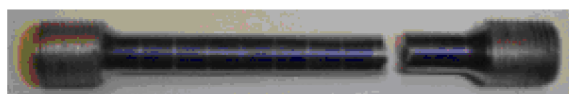


Obr. 2.5 Hrubý odlitek horního dílu bloku válců R 03D 103 019 M litý bez LSC
boční a spodní pohled [2]

Vzorky, na nichž byla provedena zkouška tahem, byly následně použity také ke zkoumání porezity. Nutno dodat, že pro hodnocení mechanických a strukturních vlastnošti by byla nejvýhodnější oblast 1. ložiska, jelikož se jedná o nejvíce problémové místo odlitku se zvýšeným výskytem vad, zejména porezity. Odlitek horního dílu R 03D 103 019 M litý bez lokálního dotlaku má však v oblasti 1. ložiska takový tvarový profil, který znemožňuje vysoustružit z odebraného výřezu tahovou tyčku o stejných rozměrech jako u horního dílu s použitím lokálního dotlaku. Výřezy z oblasti 4. ložiska byly provedeny na pásové pile GEROMAT 360. [2]



Obr. 2.6 Vyříznutá oblast 4. ložiska z horního dílu [2]



Obr. 2.7 Tahová tyč po přetržení [2]

Tab. 2.3 Přehled zkušebních tyčí – stávající blok motoru [2]

Označení výřezu oblasti 4. ložiska	Typ zkoušky
HDS1	Tahová zkouška
HDS3	Tahová zkouška
HDS6	Tahová zkouška
HDS10	Tahová zkouška
HDS11	Tahová zkouška
HDS12	Tahová zkouška

Tab. 2.4 Přehled zkušebních tyčí – nový blok motoru (bez LSC) [2]

Označení výřezu oblasti 4. ložiska	Typ zkoušky
HD6	Tahová zkouška
HD7	Tahová zkouška
HD8	Tahová zkouška
HD10	Tahová zkouška
HD11	Tahová zkouška
HD12	Tahová zkouška
HD13	Tahová zkouška

2.2 Příprava metalografických vzorků

Pro přípravu metalografických vzorků byly využity přetržené zkušební tyče ze zkoušky tahem. Z každé zkušební tyče tak byly po přetržení k dispozici dvě části. K získání co nejvíce vypovídajících údajů bylo rozhodnuto zhotovit z každé zkušební tahové tyče podélný i příčný řez. K řezání tyčí byla užitá kotoučová pila MIKRON 3000 s možností vodního chlazení, umístěna v laboratořích Odboru slévárenské technologie FSI VUT. Parametry řezání se volily s ohledem na řezaný materiál, přítláčná síla působící na řezný kotouč byla nastavena téměř na nejnižší hodnotu stupnice zatížení, naopak otáčky byly nastaveny vyšší, tj. 3000 min^{-1} . Tato opatření byla zvolena pro získání co nejkvalitnějšího řezu. [2]

Následné pracovní úkony probíhaly v laboratoři Ústav materiálového inženýrství FSI VUT. Zde bylo provedeno zalisování vzorků do průsvitné dentacrylové pryskyřice na zařízení Struers LaboPress-3 (obr. 2.8). [2]

Technický dentacryl je dodáván jako sypký prášek a tekuté tvrdidlo. Promícháním vznikne hustá kapalina, kterou se zalije vzorek položený do kruhového rámečku na skleněnou desku. Preparát je po ztuhnutí okamžitě připraven k broušení. [46]

Pro vyhodnocování porezity a pozorování pod mikroskopem bylo nezbytné vzorky náležitě připravit. V laboratořích Odboru slévárenské technologie byly vzorky broušeny na stroji Struers LaboPol-5. Do upínací hlavy tohoto zařízení lze vložit tři vzorky, což samozřejmě šetří čas, jelikož jsou broušeny, případně leštěny tři vzorky najednou. Nejdříve byly vzorky broušeny pod vodou na brusném kotouči a následně byly oplachovány a čištěny vodou. [2]

Předností automatické přípravy výbrusu je dosažení stejné kvality výbrusu u mnoha vzorků. Nedochozí k jednosměrnému ovlivnění, je zachována rovina výbrusu a je možno připravit i preparáty z nesnadno obrobitelných materiálů. Velkou výhodou pro reprodukovatelnost kvality preparace je možnost nastavení stabilních pracovních podmínek. [46]

Parametry broušení:

- brusný papír o zrnitosti 1200,
- otáčky kotouče 300 min^{-1} ,
- přítláčná síla působící na vzorky byla zvolena v závislosti na nerovnoměrnosti povrchu,
- doba broušení je závislá na povrchové kvalitě, jeden cyklus trval 3 minuty, většina vzorků byla po dvou cyklech dostatečně vybroušena. [2]

Od správně vybroušeného vzorku se požaduje, aby byl rovnoměrně drsný s minimální povrchovou nerovností, dokonale rovný a aby broušením nedošlo ke změně struktury materiálu. [46]



Obr. 2.8 Postup přípravy metalografických výbrusů [2]

Takto vybroušené vzorky byly poté leštěny na stejném zařízení. K leštění byly použity diamantové pasty s lubrikační složkou DiaDuo se zrnitostí $3\ \mu\text{m}$ a $1\ \mu\text{m}$. Příprava leštění obsahovala instalaci předepsaného leštícího plátka – kotouče, upnutí vzorků do otočné hlavy a nastavení parametrů leštění. Při samotném leštění byla aktivována funkce automatického dávkování leštícího média – diamantové pasty, intenzita injektáže pasty byla nastavena manuálně. [2]

Parametry leštění:

- otáčky kotouče $150\ \text{min}^{-1}$,
- doba jednoho leštícího cyklu 3 min, vzorky byly leštěny $3\ \mu\text{m}$ pastou a poté $1\ \mu\text{m}$ pastou,
- hodnota přitlačné síly byla nastavována v závislosti na jakosti daného výbrusu. [2]

Kvalita leštěných vzorků byla operativně kontrolována na stereoskopickém mikroskopu STM 723 ZOOM s trinokulární hlavicí. Tak bylo jednoznačně určeno, které vzorky je nezbytné opětovně přešetřit. [2]

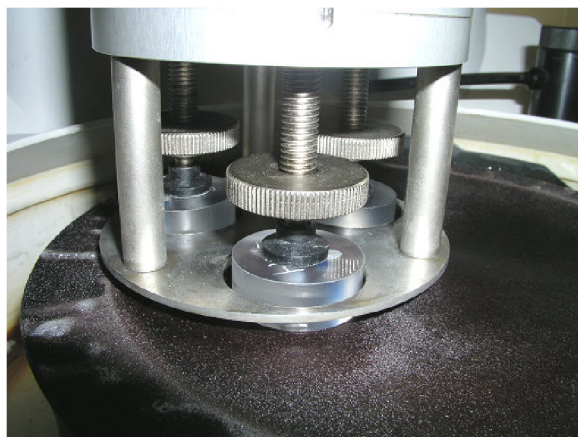
Rozdíl mezi mechanickým broušením a leštěním je zejména v tom, že při leštění již není materiál vzorku odebírán. Dochází pouze ke srovnání reliéfu povrchu účinkem leštící suspenze. [46]

Pro vlastní měření výskytu porozity pomocí programu Stream Motion byly zalisované vzorky leštěny ještě jednou na poloautomatické laboratorní leštičce Struers LaboForce-3 pastami se zrnitostí 9, 3 a $1\ \mu\text{m}$ značky DiaDuo po dobu 4 minut. Na přístroji byl nastaven přitlak, otáčky kotouče $200\ \text{min}^{-1}$ a průtok leštící suspenze. Leštící pasty byly tvořeny sloučeninou diamantové suspenze a mazadla.

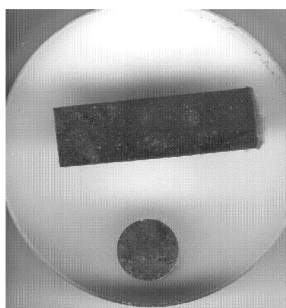
Po naleštění se každý z 13 vzorků (1 zalisovaný vzorek obsahuje 2 řezy ložiskem) opláchl lihem a osušil laboratorním fénem VAN TYP B522. Každý vzorek byl poté pečlivě překontrolován na mikroskopu 2303 Intraco po každém leštění. Dle potřeby se leštění opakovalo.



Obr. 2.9 Leštění a kontrola metalografických vzorků



Obr. 2.10 Leštění 3 vzorků na kotouči MD-Piano 220 na přístroji Struers Labo Force-3 s lešticí pastou DiaDuo 9 μm .



Obr. 2.11 Naskenovaný vzorek vyleštěný diamantovými suspenzemi a mazadly DiaDuo 9, 3 a 1 μm ve formátu tiff.

2.3 Vyhodnocení porezity programem AnalySIS

Obrazová analýza spočívá ve zpracování vstupních dat ve formě obrazu ke zjištění kvantitativních veličin (množství fází, podíl fází) nebo kvalitativních veličin (velikost a struktura částic). [47]

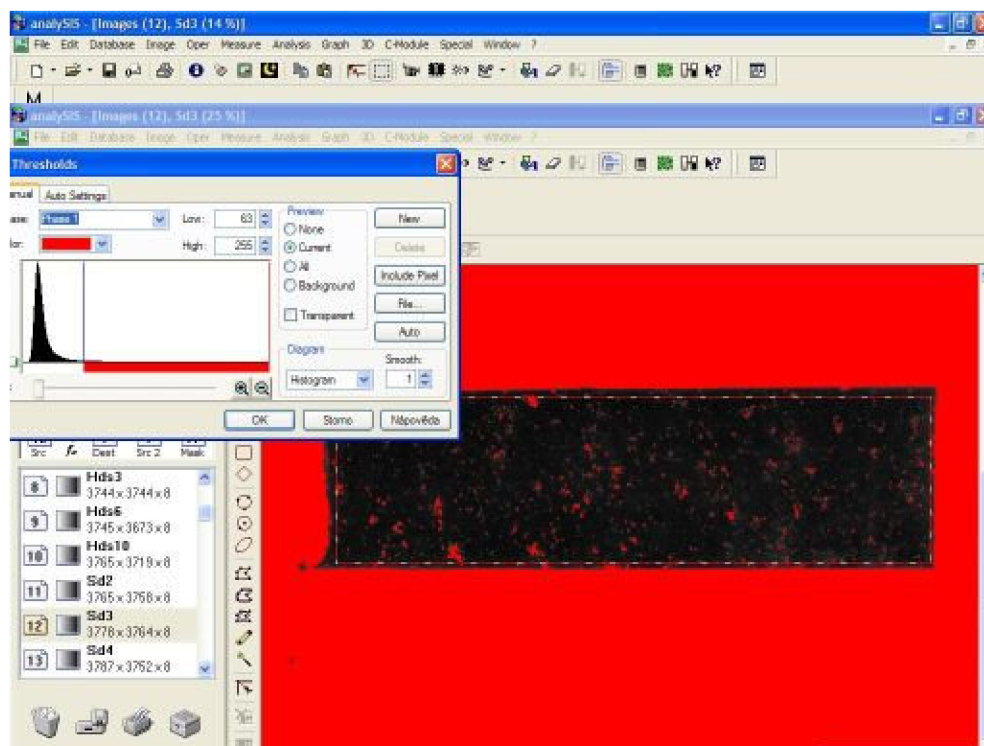
Obrazová analýza se skládá z třech základních postupných kroků [47]:

- Získání obrazu (digitální fotografie a jiný obrazový výstup),
- Preprocessing (odstranění šumu, korekce ostroty, kontrastu),

- Processing (analýza, výsledné zpracování).

Vyleštěné metalografické vzorky bylo nutné naskenovat tak, aby hodnocené plochy byly převedeny do elektronické podoby. Skenování bylo provedeno na skeneru Epson Stylus 650 při rozlišení 3200 dpi (čím vyšší rozlišení tím lépe). Naskenované obrázky byly ukládány ve formátu tiff (doporučený formát pro obrazovou analýzu zachovávající měřítko). Následně byly obrázky upraveny v grafickém editoru IrfanView 4.23 (oříznutí, otočení, uložení do odstínů šedi). [2]

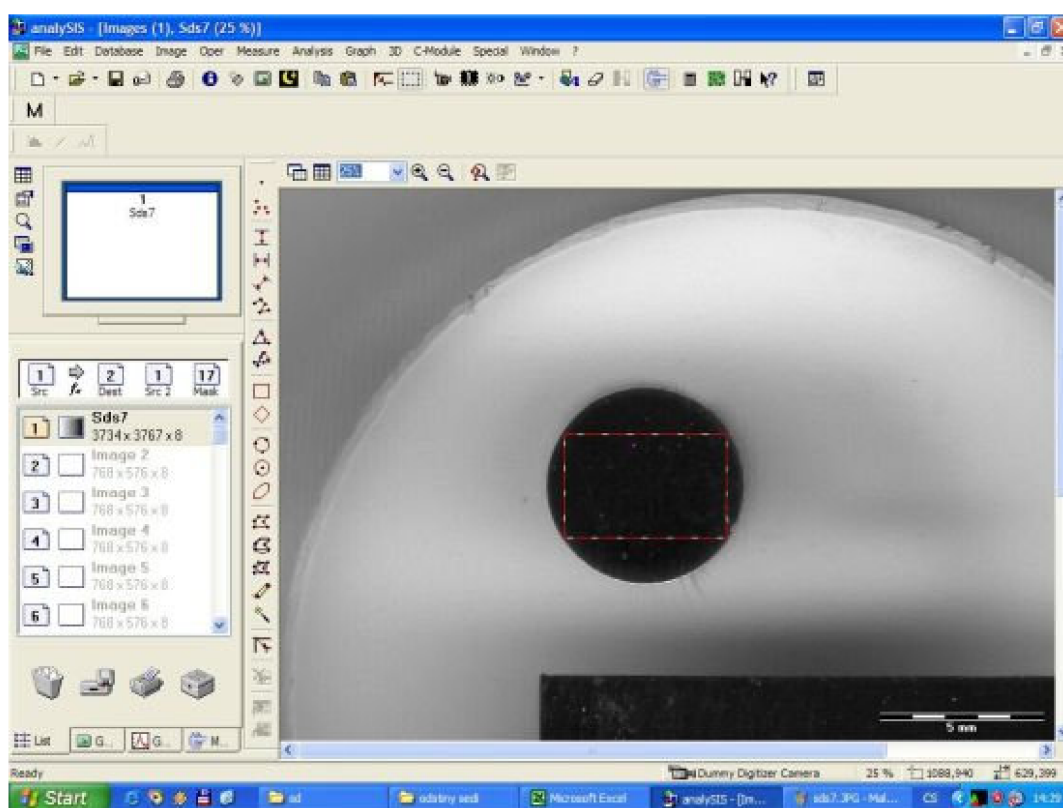
Vyhodnocení porezity bylo provedeno na Ústavu materiálového inženýrství metodou obrazové analýzy. Byl použit počítačový program AnalySIS od firmy Olympus. Jedná se o hodnocení plošné. Hodnocení porezity se děje pomocí grafických filtrů, které si ve vyhodnocovaném obrázku najdou barvu, na níž jsou nastaveny. Každý z filtrů má definovanou citlivost, která zamezí zasahování do detekčního pásma filtru jiného. Tak je pokryto definované spektrum. Před měřením je nutno program nastavit obrázek tak, aby byly registrovány jen póry. [2]



Obr. 2.12 Nastavování citlivosti filtru [2]

Následně bylo nezbytné nastavit na každém vzorku oblast, kterou program vyhodnotí. Nevýhodou tohoto programu je fakt, že záběrná – vyhodnocovací plocha rámu má tvar pravoúhlého čtyřúhelníku. Nelze tedy vytvořit výběrovou oblast např. ve tvaru kružnice či mnohoúhelníku o počtu stran vyšším než čtyři, ať pravidelného či nepravidelného. Toto je dosti limitující faktor při hodnocení příčných řezů (kruhový průřez). Po zvážení byly příčné řezy hodnoceny ve dvou na sobě kolmých výběrových pracovních oblastech se snahou zvýšit objektivnost vyhodnocení. Výsledná porezita u příčných vzorků je pak dána průměrem z těchto dvou měření. Pro názorný příklad obr. 2.13 zachycuje definovanou pracovní plochu na oskenovaném příčném vzorku. [2]

Vyhodnocení objemu pórů ve vzorcích by negativně mohla ovlivnit jakákoliv rýha či prohlubeň na metalografickém vzorku. Měření by pak bylo zkresleno a výsledek porezity by byl vyšší než ve skutečnosti, protože software by rýhy a jiné vady vzniklé přípravou (nedokonalým vyleštěním) vzorků nadetkoval také jako porezitu. Rýhy jsou totiž po naskenování světlé stejně jako póry a pro software jsou k nerozeznání od skutečných pórů, proto byl kladen velký důraz na dokonale připravené metalografické vzorky. Důležitý byl ovšem i proces skenování, jelikož i ten by eventuálně mohl nepřímo zkreslit analýzu. Skenovací plocha musela být dokonale čistá, bez jakýchkoli nečistot či poškrábaných oblastí. [2]



Obr. 2.13 Definovaná pracovní oblast vzorku, na níž je vyhodnocována porezita, při druhém měření je pracovní oblast otočena o 90° [2]

2.4 Vyhodnocení porezity programem Stream Motion

Vyhodnocení porezity bylo provedeno na Ústavu materiálového inženýrství FSI VUT také metodou obrazové analýzy. Byl použit počítačový program Stream Motion od firmy Olympus a elektronový metalografický mikroskop Olympus PMG3 s nastaveným pětinasobným zvětšením objektivu. V aplikaci pro pořízení snímku (Acquisition) byla nastavena automatická expozice snímku z kamery Olympus DP20 na 1 ms, vyvážení expozice na -1/3 EV (expoziční hodnota), tj. snížení osvětlení a ztmavení snímku a běžná citlivost ISO 100 pro určení expozice výsledného snímku. V aplikaci vyhodnocení procesu

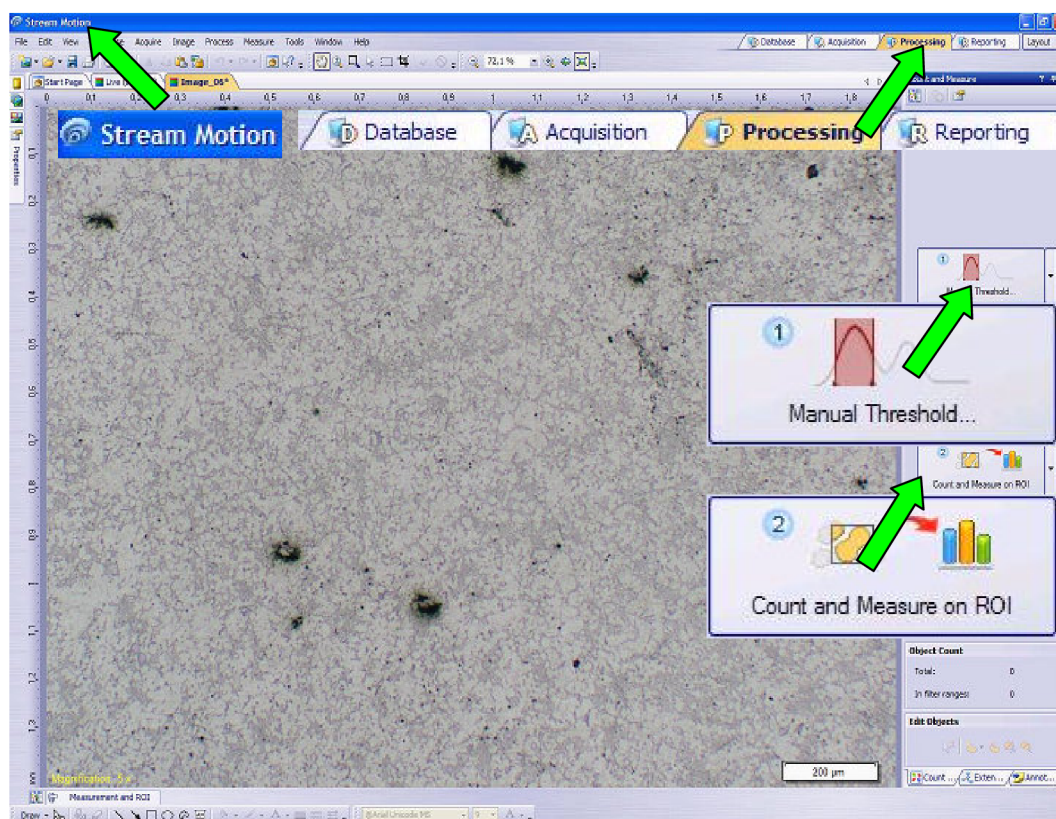
(Processing) bylo manuálně naprahováno pásmo citlivosti barev: červená 135, zelená 132 a modrá 90. To odpovídalo nejkvalitnějšímu zobrazení snímku.



Obr. 2.14 Mikroskop Olympus PMG3 s fotoaparátem Olympus při snímání vzorku

Poté byla vybrána tzv. oblast zájmu ROI (Region of Interest). V tomto programu lze libovolně volit tvar oblasti. Pro měření vzorků příčného i podélného řezu bylo zvoleno vždy pět oblastí obdélníkového tvaru tak, aby reprezentativně obsáhly celou plochu řezu. Výsledné tvarové faktory kulatosti pórů a jejich plochy byly zjištěny pomocí funkce výpočtu a měření (Count and Measure on ROI) a převedeny do databáze v Stream Motion a do tabulkového programu Excel. Do snímků s naměřenými plochami porezity bylo před uložením do formátu jpg přímo v programu nesmazatelně vyznačeno měřítko 200 μm .

Metoda světelné mikroskopie slouží k pozorování povrchového reliéfu zkoumaného vzorku. Stejně jako u programu AnalySIS není vzorek zkoumán do hloubky, ale jedná se pouze o plošnou analýzu celistvosti materiálu.



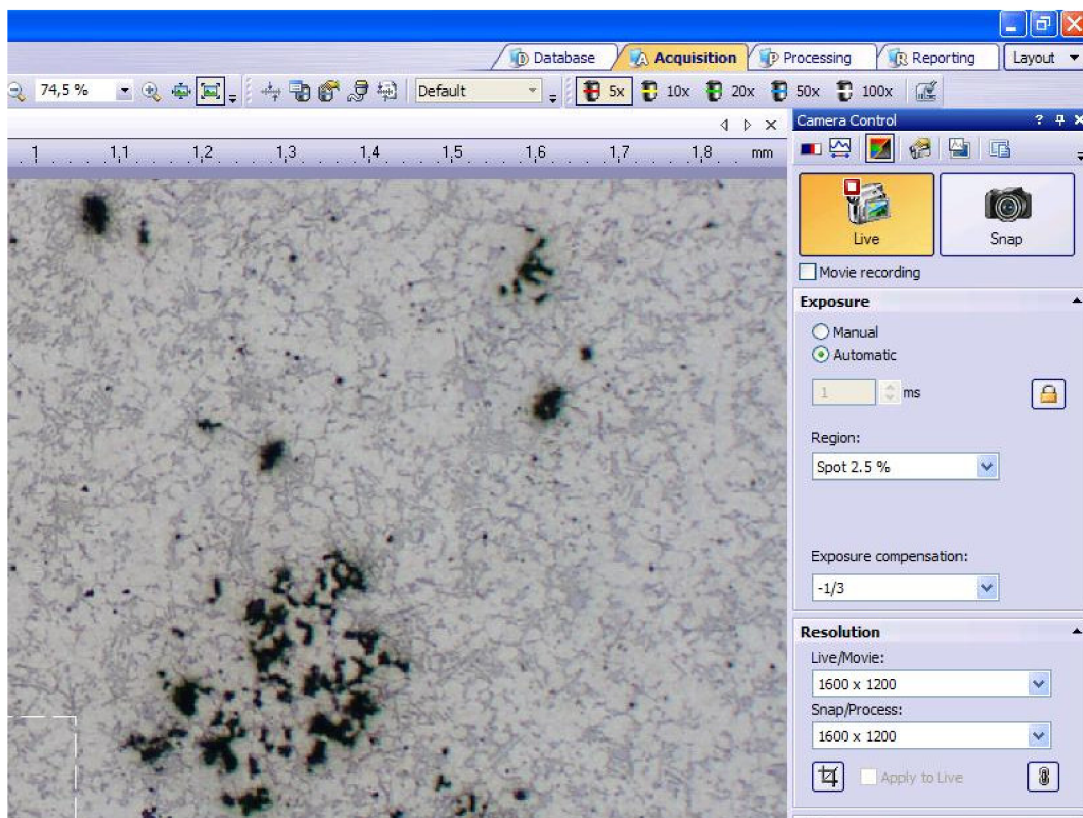
Obr. 2.15 Vybraná oblast vzorku před měřením v programu Stream Motion Olympus. Nápisy pro názornost zvětšeny.

Na rozdíl od programu AnalySIS byla na ploše programu detekována zvětšená vybraná oblast řezu a nikoliv celý vzorek. Proto bylo možno porezitu detailněji pozorovat bez ohrožení kvality snímku způsobené skenováním a ukládáním do souboru. Přestože má typ souboru tiff nejlepší rozlišení, zdá se poněkud problematické rozlišování porezity z naskenovaného obrázku. Po zkušebním převedení vyleštěného vzorku ze skeneru Epson Stylus 650 při rozlišení 3200 dpi uloženého ve formátu tiff do programu Stream Motion bylo zvoleno jako objektivnější hodnocení porezity pomocí snímkování na mikroskopu.

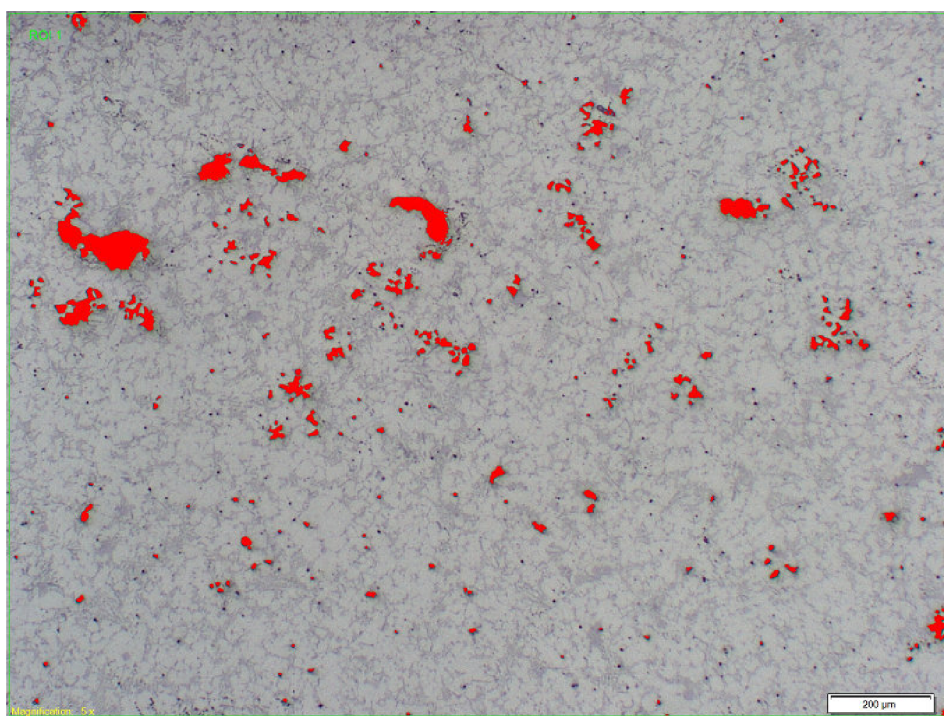
Výhodou této metody je také nastavení filtru, kdy při tomto zpracování hodnot vynechával program všechny objekty menší než 10 pixelů. Při detekci snímku se tak do výsledných hodnot nedostávají nepříznivé vlivy jako šумы, skvrny a škrábance. Tyto lze navíc eliminovat vymazáním z červeně označené plochy porezity na celkové měřené oblasti ROI a tím odstranit i z výpočtu podílu porezity ve zkoumaném vzorku.

Hodnocení porezity probíhá v programu Stream Motion automaticky. Program póry označí a vypočítá jejich plochu. Poté vypočítá jejich procentuální zastoupení na zkoumané a označené oblasti vzorku. Výsledky jsou poté uloženy do tabulky ve formátu xls.

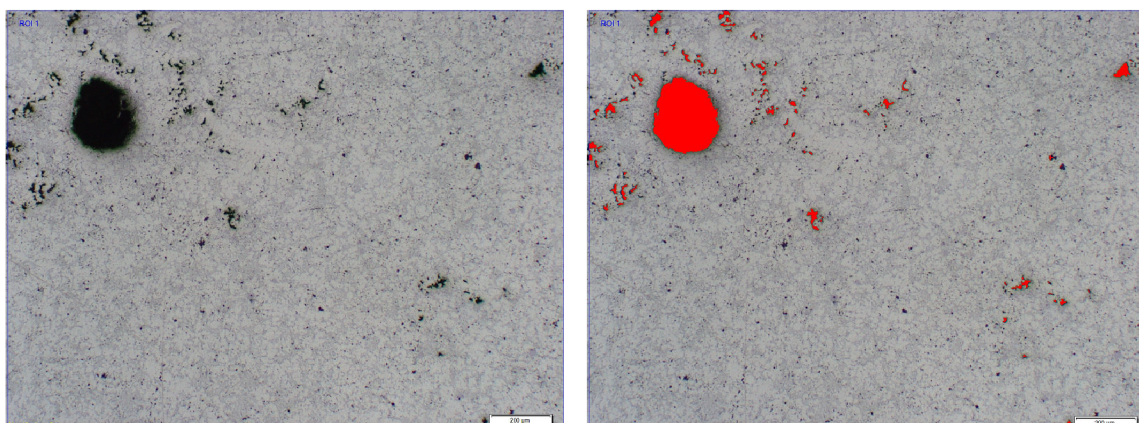
Na jednom vzorku bylo provedeno 5 měření porezity podélného a 5 měření příčného řezu. Výsledky byly zprůměrovány pro každý řez zvlášť.



Obr. 2.16 Nastavení snímku pro vyhodnocení zvolené oblasti v programu Stream Motion



Obr. 2.17 Vyhodnocený snímek programem Stream Motion, vzorek HD7, měření č. 7



Obr. 2.18 Srovnání nasnímaného a vyhodnoceného vzorku HD8, měření č. 8

Statistické zhodnocení bylo prováděno na souborech o velikosti 30 hodnot pro 6 vzorků ze série označené HDS a odlévané s lokálním dotlakem, resp. 35 hodnot pro 7 vzorků HD bez dotlaku zvláště pro každý druh řezu zkušební tyčí. Při hodnocení stávajících i předchozích měření dohromady byly použity soubory s tímto množstvím hodnot: 44 pro podélný a 53 pro příčný řez vzorkem HD, 38 pro podélný a 46 pro příčný řez HDS. Celkové určení poretity nebylo testováno na souborech s 84 hodnotami pro vzorky typu HDS a 97 hodnotami pro vzorky typu HD, neboť testy určující normální rozdělení i hrubé chyby vykazovaly závažné chyby na hladině významnosti 0,05 i 0,1 a proto byly pro hodnocení zvoleny pouze soubory obou typů řezů zvláště. Během statistického testu byly ze souborů odstraněny hrubé chyby. Tyto jsou v tabulce naměřených hodnot označeny červeně.

Tab. 2.5 Vyhodnocení poretity u horního dílu (R 03D 103 019 M) s LSC, mechanické hodnoty: [2]

Vzorek	Řez	Detekovaná poretita P [%]						Průměr měření č. 5 - 9 [%]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Z [%]
		Vlastní měření vzorku										
		č. 5	č. 6	č. 7	č. 8	č. 9						
HDS 1	příčný	0,51	0,38	0,33	0,58	1,20	0,60	127	239	1,9	3	
	podélný	2,89	1,66	1,66	0,93	0,56	1,20					
HDS 3	příčný	0,66	1,18	0,83	1,10	0,49	0,85	126	248	2,2	3,6	
	podélný	0,81	0,62	0,52	1,23	0,98	0,83					
HDS 6	příčný	0,10	0,07	0,63	0,23	0,07	0,22	130	215	1,2	1,3	
	podélný	2,52	1,11	1,15	0,69	1,29	1,06					
HDS 10	příčný	0,68	0,37	0,33	0,83	0,34	0,51	121	235	2	3,3	
	podélný	1,64	1,62	1,41	1,74	1,82	1,65					
HDS 11	příčný	0,77	0,36	0,19	0,66	1,14	0,62	136	260	3	3,3	
	podélný	0,81	1,24	0,74	0,47	0,60	0,77					
HDS 12	příčný	0,98	0,29	0,46	1,12	0,96	0,76	142	247	2	3	
	podélný	0,83	0,69	0,80	3,27	0,78	0,78					

Tab. 2.6 Vyhodnocení porezity u horního dílu (R 03D 103 019 M) bez LSC, mechanické hodnoty: [2]

Vzorek	Řez	Detekovaná porezita P [%]						Průměr měření č. 5 - 9 [%]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Z [%]
		Vlastní měření vzorku										
		č. 5	č. 6	č. 7	č. 8	č. 9						
HD 6	příčný	1,90	0,8	1,9	1,70	2,22	1,70	144	202	1	1,7	
	podélný	5,00	4,2	4	4,23	3,07	4,10					
HD 7	příčný	1,8	1,1	1,00	1,24	1,48	1,32	122	211	1,2	2,3	
	podélný	7,2	1	2	1,34	3,81	2,04					
HD 8	příčný	1,4	1,7	1,7	1,12	0,92	1,38	133	219	1,6	2,3	
	podélný	0,9	1,4	1,1	2,05	1,26	1,34					
HD 10	příčný	3,80	1,4	4,8	2,04	1,57	1,67	118	203	1,3	1,6	
	podélný	1,5	2,3	1,7	3,07	2,97	2,31					
HD 11	příčný	1	0,5	1,20	0,78	1,05	0,89	136	225	1,4	1,3	
	podélný	4,2	2	2,8	3,37	2,82	3,01					
HD 12	příčný	0,9	1,7	1,3	1,21	2,35	1,49	134	215	0,9	1,6	
	podélný	2,6	3,5	2,4	0,83	3,48	2,55					
HD 13	příčný	0,8	0,6	0,4	1,13	0,52	0,69	152	228	1	1,3	
	podélný	0,7	3,8	1,1	0,63	2,90	1,81					

Naměřené hodnoty porezity jsou chápány jako nezávislé proměnné, jejichž analýzou se má docílit vysvětlení závislosti některých vybraných mechanických vlastností slitiny hliníku.

2.5 Rozdíly mezi AnalySIS a Stream Motion

Rozdíly ve výsledcích analýzy porezity na vzorcích při využití programu Stream Motion a AnalySIS jsou způsobeny zvolenou metodou získávání obrazu. Při práci s naskenovaným obrazem nebylo možné plochu nasnímaného vzorku několikanásobně zvětšit při dostatečné ostrosti a tím mohlo dojít k nepřesnostem při vyhodnocení porezity. Toto vyhodnocení mohou negativně ovlivnit i nečistoty na skeneru.

Nemohli-li být obraz k analýze dostatečně zvětšen, byl pro analýzu vybrán celý podélný řez a u příčného řezu 2 na sebe kolmé oblasti, tím by mohlo dojít ke zkreslení výsledků. Křížením 2 měřených oblastí příčného řezu v pravém úhlu byla naměřena velice podobná až identická porezita na vzorku pro 2 měření (nereprezentativní průměrné hodnoty).

Pro získání snímku z metalografického mikroskopu do programu Stream Motion je nutností (stejně jako při převodu obrazu do AnalySIS) připravený metalografický výbrus zkoumaného materiálu.

1. Stream Motion:

- zobrazena detailněji zvětšená plocha vzorku měřena v příčném i podélném směru na 5 zvětšených místech (nebyl tedy měřen celý řez najednou, objektiv měl nastavené pětinasobné zvětšení, zvětšení vzorku na monitoru bylo padesátinasobné),
- lze nastavit filtr pro vynechávání objektů menších než např. 10 pixelů,
- menší nedostatky metalografického vzorku lze z výpočtu v rámci ROI odstranit odznačením z detekované oblasti porezity,
- tvar oblasti: kruh, obdélník, trojúhelník.

2. AnalySIS:

- analyzuje celý naskenovaný vzorek, resp. 1 celý řez zkušební tyčí (podélný nebo příčný),
- detekce porezity nastavením programu před měřením tak, aby byly registrovány jen póry (je shodné s nastavením v Stream Motion),
- možnost nastavení programu, aby neumožnil detekovat vady v obraze menší než je určitá zvolená mez jako u Stream Motion,
- vyhodnocovací plocha pouze ve tvaru čtyřúhelníku,
- vyhodnocení může negativně ovlivnit jakákoliv vada nebo rýha (mají světelně stejné zobrazení jako póry).

3. Hlavní funkce programu Stream Motion:

- porezita: měřená plocha ROI, počet jednotlivých pórů, % porezity na celkové ploše, průměrná intenzita barev póru, průměrný tvarový faktor póru,
- ovalita pórů (sphericity, elongation, shape factor, aj.).

4. Hlavní funkce programu AnalySIS:

- porezita,
- ovalita pórů (rozměry póru, protažení, tvarový faktor – póry jsou různě barevné).

Co do možností hodnocení jsou na tom oba softwary (SW) velice podobně. Program AnalySIS 5 byl firmou Olympus ukončen a jeho pokročilé a vyhodnocovací moduly byly přidruženy na ovládací SW Stream Motion. V podstatě se jedná o sloučení dvou softwarů do jednoho a jeho modernizaci.

2.6 Vyhodnocení měření

V experimentální části byly použity hodnoty vlastního měření a hodnoty výskytu porezity pomocí obrazové analýzy Lefnera z roku 2009 [2] a Talandy z roku 2010 [4]. Z diplomové práce Lefnera [2] bylo použito 39 hodnot a 26 průměrných hodnot. Z bakalářské práce Talandy [4] bylo použito 12 hodnot. Z diplomové práce Havlíčková [48] bylo použito 130 naměřených hodnot a 26 průměrných hodnot. Celkem bylo na řezech zkušební tyčí pro zkoušku tahem naměřeno 84 hodnot u série značené HDS a 97 hodnot u série značené HD. Souhrnně jsou tato měření zkoumané slitiny AlSiCu3 zobrazena v tab. 2.8 a 2.9. K nim náležející mechanické hodnoty dokládají tab. 2.5 a 2.6.

Vlastní měření

V tab. 2.5 a 2.6 jsou uvedeny hodnoty naměřené porezity z vlastního měření jednotlivých vzorků pro horní díl a jejich mechanické vlastnosti. Tab. 2.11 pak uvádí souhrnný přehled porezity obou sérií (HDS, HD). V tabulkách jsou červenou barvou označeny hrubé chyby, které byly odhaleny statistickým testováním.

Grafické porovnání průměrné porezity vlastního měření je provedeno na obr. 2.20, kde lze přímo srovnat rozdíly mezi podélnými a příčnými řezy a současně rozdíly mezi oběma sériemi. Grafická závislost mechanických veličin na porezitě je následně vyjádřena na obr. 2.23 až 2.26 pro příčné řezy a na obr. 2.32 až 2.35 pro podélné řezy vzorků. V samotných grafech jsou u jednotlivých závislostí vyjádřeny regresní rovnice včetně determinačních indexů.

Všechna měření

Tab. 2.8 a 2.9 zaznamenává všechny dosud zjištěné hodnoty porezity metodou obrazové analýzy na FSI VUT. Grafické porovnání průměrné porezity všech měření je provedeno na obr. 2.21, kde lze přímo srovnat rozdíly mezi podélnými a příčnými řezy a současně rozdíly mezi sériemi vzorků z odlitků litých s lokálním dotlakem (HDS) a bez dotlaku (HD). Grafická závislost mechanických veličin na porezitě je následně vyjádřena na obr. 2.27 až 2.30 pro příčné řezy a na obr. 2.36 až 2.39 pro podélné řezy vzorků. Souhrnný přehled typů regresních křivek všech měření z vlastní experimentální části nabízí tabulka v příloze 7 situována v závěru této práce.

Pro srovnání je v této práci uvedena celková průměrná porezita v tab. 2.10 a na obr. 2.19 obou sérií na měřená Lefnerem [2]. Některé závislosti byly testem linearitu kvantifikovány jako přímkové. Ukázkou lineární závislosti porezity na R_m , $R_{p0,2}$ obou řezů sérií HD a HDS, zjištěné v práci Lefnera [2], jsou grafy na obr. 2.22 pro příčné řezy a obr. 2.31 pro podélné řezy. Vzhledem k menšímu počtu měření však nebyla linearita potvrzena pro všechny uvedené přímkové závislosti. Potvrzenou linearitu měření Lefnera [2] pro příčný a podélný řez zvlášť souhrnně dokládá tab. 2.7.

Tab. 2.7 Lineární závislost podélného a příčného řezu HDS a HD na mechanických vlastnostech [2]

Série	Dvojice veličin	Koeficient korelace r	Kritická hodnota r_p	Lineární závislost	Směrnice přímky k	Konstanta přímky q
HDS	$R_m - P_{po}$	-0,928	0,811	ANO	-103,706	290,273
	$R_{p0,2} - P_{pr}$	-0,933	0,878	ANO	-124,874	175,854
HD	$R_m - P_{po}$	-0,971	0,754	ANO	-33,911	250,031

Tab. 2.8 Celková porezita u horního dílu (R 03D 103 019 M) s LSC, měření 1 – 4: [2,4]

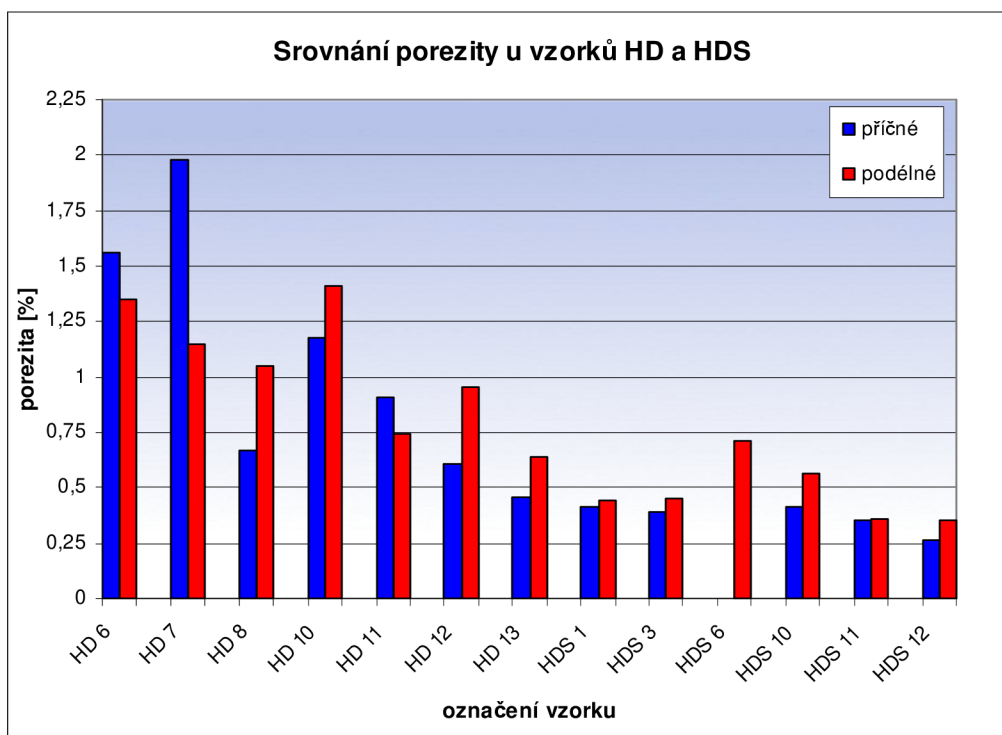
Vzorek	Řez	Detekovaná porezita P [%]										
		Měření vzorku									Průměr měření č. 1, 2 P_1 [%]	CELKOVÝ PRŮMĚR P [%]
		č. 1	č. 2	č. 3	č. 4	č. 5	č. 6	č. 7	č. 8	č. 9		
HDS 1	příčný	0,41	0,41	-	-	0,51	0,38	0,33	0,58	1,20	0,41	0,55
	podélný	0,44	-	-	-	2,89	1,66	1,66	0,93	0,56	0,44	1,05
HDS 3	příčný	0,51	0,28	-	-	0,66	1,18	0,83	1,10	0,49	0,40	0,72
	podélný	0,45	-	-	-	0,81	0,62	0,52	1,23	0,98	0,45	0,77
HDS 6	příčný	0,89	0,51	0,52	0,78	0,10	0,07	0,63	0,23	0,07	0,70	0,42
	podélný	0,71	-	0,52	-	2,52	1,11	1,15	0,69	1,29	0,71	0,91
HDS 10	příčný	0,42	0,40	-	-	0,68	0,37	0,33	0,83	0,34	0,41	0,48
	podélný	0,56	-	-	-	1,64	1,62	1,41	1,74	1,82	0,56	1,47
HDS 11	příčný	0,38	0,32	0,38	0,45	0,77	0,36	0,19	0,66	1,14	0,35	0,52
	podélný	0,36	-	0,38	-	0,81	1,24	0,74	0,47	0,60	0,36	0,66
HDS 12	příčný	0,21	0,31	-	-	0,98	0,29	0,46	1,12	0,96	0,26	0,62
	podélný	0,35	-	-	-	0,83	0,69	0,80	3,27	0,78	0,35	0,69

Tab. 2.9 Celková porezita u horního dílu (R 03D 103 019 M) bez LSC, měření 1 – 4:[2,4]

Vzorek	Řez	Detekovaná porezita P [%]										
		Měření vzorku									Průměr měření č. 1, 2 P_1 [%]	CELKOVÝ PRŮMĚR P [%]
		č. 1	č. 2	č. 3	č. 4	č. 5	č. 6	č. 7	č. 8	č. 9		
HD 6	příčný	1,45	1,67	1,30	1,51	1,90	0,78	1,92	1,70	2,22	1,56	1,61
	podélný	1,35	-	1,30	-	5,00	4,17	4,04	4,23	3,07	1,35	3,31
HD 7	příčný	1,95	2,00	-	-	1,81	1,08	1,00	1,24	1,48	1,98	1,51
	podélný	1,15	-	-	-	7,20	1,03	1,99	1,34	3,81	1,15	1,86
HD 8	příčný	0,62	0,72	-	-	1,44	1,73	1,71	1,12	0,92	0,67	1,18
	podélný	1,05	-	-	-	0,87	1,38	1,13	2,05	1,26	1,05	1,29
HD 10	příčný	1,33	1,03	-	-	3,80	1,39	4,78	2,04	1,57	1,18	1,47
	podélný	1,41	-	-	-	1,49	2,33	1,71	3,07	2,97	1,41	2,16
HD 11	příčný	1,15	0,66	-	-	0,98	0,45	1,20	0,78	1,05	0,91	0,90
	podélný	0,74	-	-	-	4,15	1,95	2,76	3,37	2,82	0,74	2,63
HD 12	příčný	0,61	0,60	-	-	0,88	1,71	1,29	1,21	2,35	0,61	1,24
	podélný	0,95	-	-	-	2,56	3,52	2,38	0,83	3,48	0,95	2,29
HD 13	příčný	0,48	0,44	1,06	0,70	0,75	0,62	0,41	1,13	0,52	0,46	0,68
	podélný	0,64	-	1,07	-	0,65	3,77	1,09	0,63	2,90	0,64	1,54

Tab. 2.10 Souhrnný přehled průměrné porezity měření č. 1 a 2 u horního dílu [2]

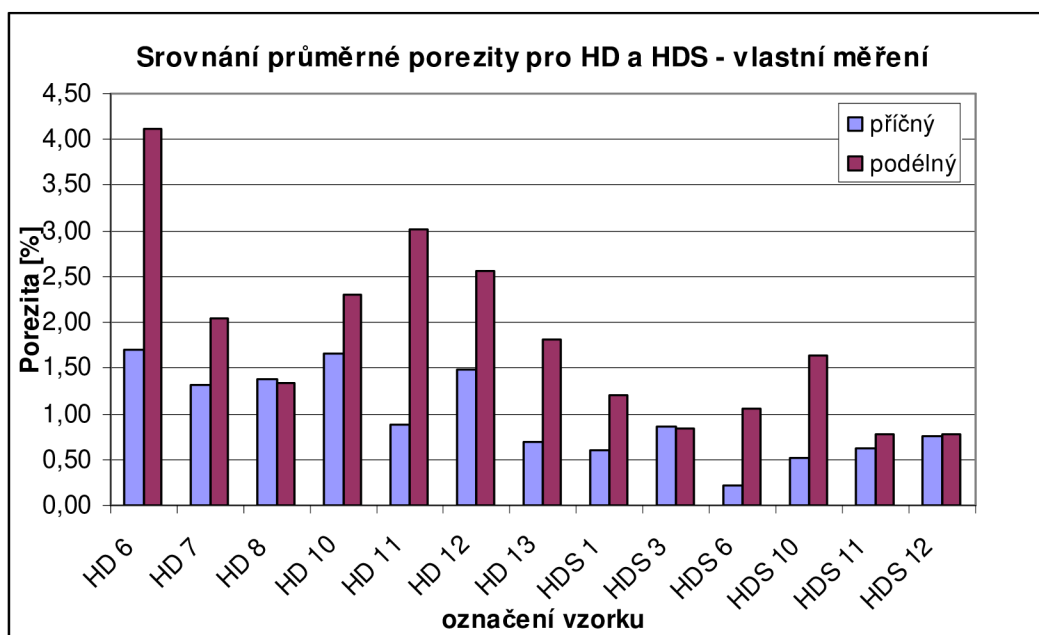
Označení vzorku	řez	Porezita P [%]	Označení vzorku	řez	Porezita P [%]
HDS 1	příčný	0,41	HD 6	příčný	1,56
	podélný	0,44		podélný	1,35
HDS 3	příčný	0,39	HD 7	příčný	1,98
	podélný	0,45		podélný	1,15
HDS 6	příčný	vyřazeno	HD 8	příčný	0,67
	podélný	0,71		podélný	1,05
HDS 10	příčný	0,41	HD 10	příčný	1,18
	podélný	0,56		podélný	1,41
HDS 11	příčný	0,35	HD 11	příčný	0,91
	podélný	0,36		podélný	0,74
HDS 12	příčný	0,26	HD 12	příčný	0,61
	podélný	0,35		podélný	0,95
-	-	-	HD 13	příčný	0,46
				podélný	0,64
Průměrná porezita P [%]	příčný	0,36	Průměrná porezita P [%]	příčný	1,05
	podélný	0,48		podélný	1,04
Celkový průměr P [%]	0,42		Celkový průměr P [%]	1,05	



Obr. 2.19 Grafické vyjádření měření č. 1 a 2 průměrné porezity u horního dílu [2]

Tab. 2.11 Souhrnný přehled průměrné porezity vlastního měření u horního dílu motoru

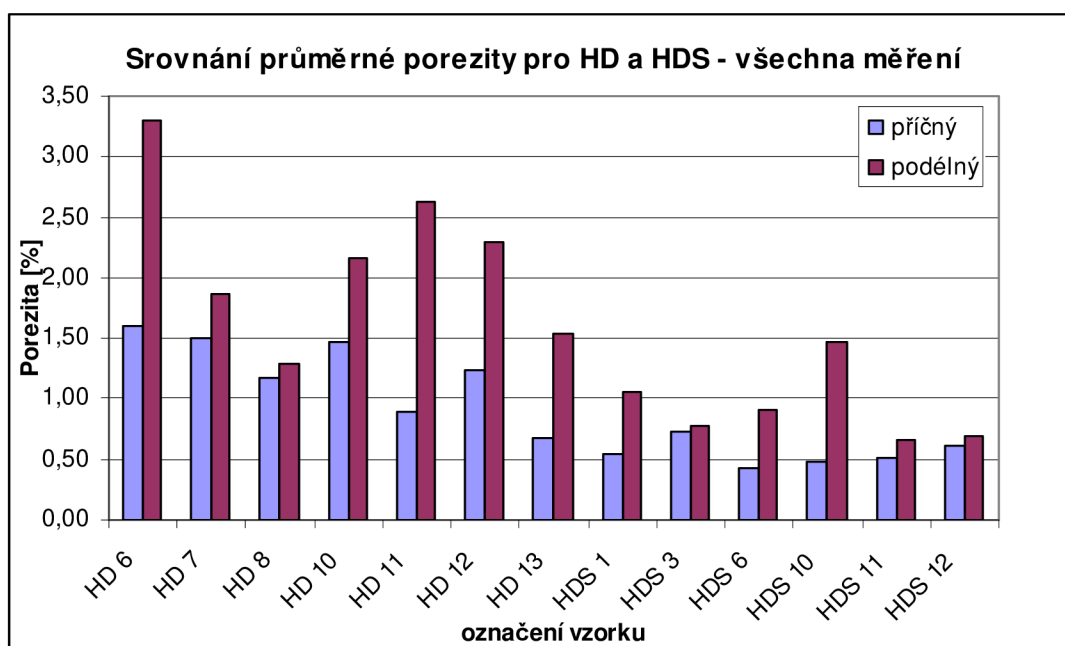
Označení vzorku	řez	Porezita P [%]	Označení vzorku	řez	Porezita P [%]
HDS 1	příčný	0,60	HD 6	příčný	1,70
	podélný	1,20		podélný	4,10
HDS 3	příčný	0,85	HD 7	příčný	1,32
	podélný	0,83		podélný	2,04
HDS 6	příčný	0,22	HD 8	příčný	1,38
	podélný	1,06		podélný	1,34
HDS 10	příčný	0,51	HD 10	příčný	1,67
	podélný	1,65		podélný	2,31
HDS 11	příčný	0,62	HD 11	příčný	0,89
	podélný	0,77		podélný	3,01
HDS 12	příčný	0,76	HD 12	příčný	1,49
	podélný	0,78		podélný	2,55
-	-	-	HD 13	příčný	0,69
				podélný	1,81
Průměrná porezita P [%]	příčný	0,59	Průměrná porezita P [%]	příčný	1,31
	podélný	1,05		podélný	2,45
Celkový průměr P [%]	0,82		Celkový průměr P [%]	1,88	



Obr. 2.20 Grafické vyjádření vlastních měření průměrné porezity u horního dílu

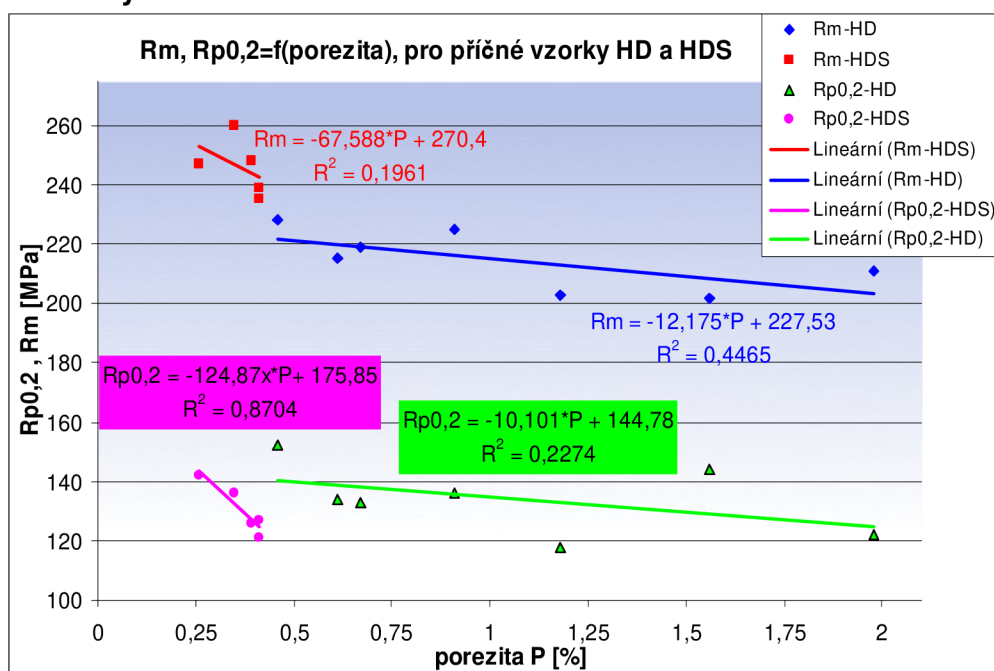
Tab. 2.12 Souhrnný přehled průměrné porezity všech měření u horního dílu motoru

Označení vzorku	řez	Porezita P [%]	Označení vzorku	řez	Porezita P [%]
HDS 1	příčný	0,55	HD 6	příčný	1,61
	podélný	1,05		podélný	3,31
HDS 3	příčný	0,72	HD 7	příčný	1,51
	podélný	0,77		podélný	1,86
HDS 6	příčný	0,42	HD 8	příčný	1,18
	podélný	0,91		podélný	1,29
HDS 10	příčný	0,48	HD 10	příčný	1,47
	podélný	1,47		podélný	2,16
HDS 11	příčný	0,52	HD 11	příčný	0,90
	podélný	0,66		podélný	2,63
HDS 12	příčný	0,62	HD 12	příčný	1,24
	podélný	0,69		podélný	2,29
-	-	-	HD 13	příčný	0,68
				podélný	1,54
Průměrná porezita P [%]	příčný	0,55	Průměrná porezita P [%]	příčný	1,23
	podélný	0,92		podélný	2,15
Celkový průměr P [%]	0,74		Celkový průměr P [%]	1,69	



Obr. 2.21 Grafické vyjádření všech měření průměrné porezity u horního dílu

Příčné řezy



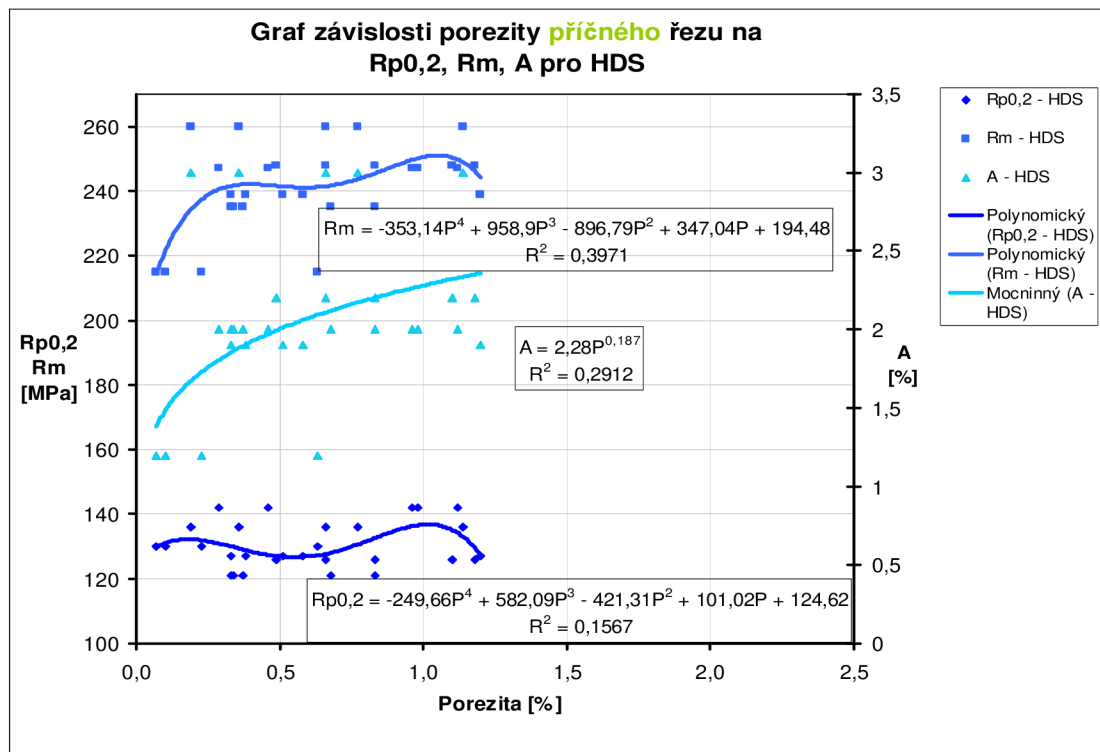
Obr. 2.22 Závislost smluvní meze kluzu a meze pevnosti na porezitě pro příčné řezy [2]

Při zjišťování vztahu mezi porezitou a mechanickými vlastnostmi se vycházelo z předpokladu, že vztahy většinou nejsou lineární, jak dokázala práce Lefnera [2].

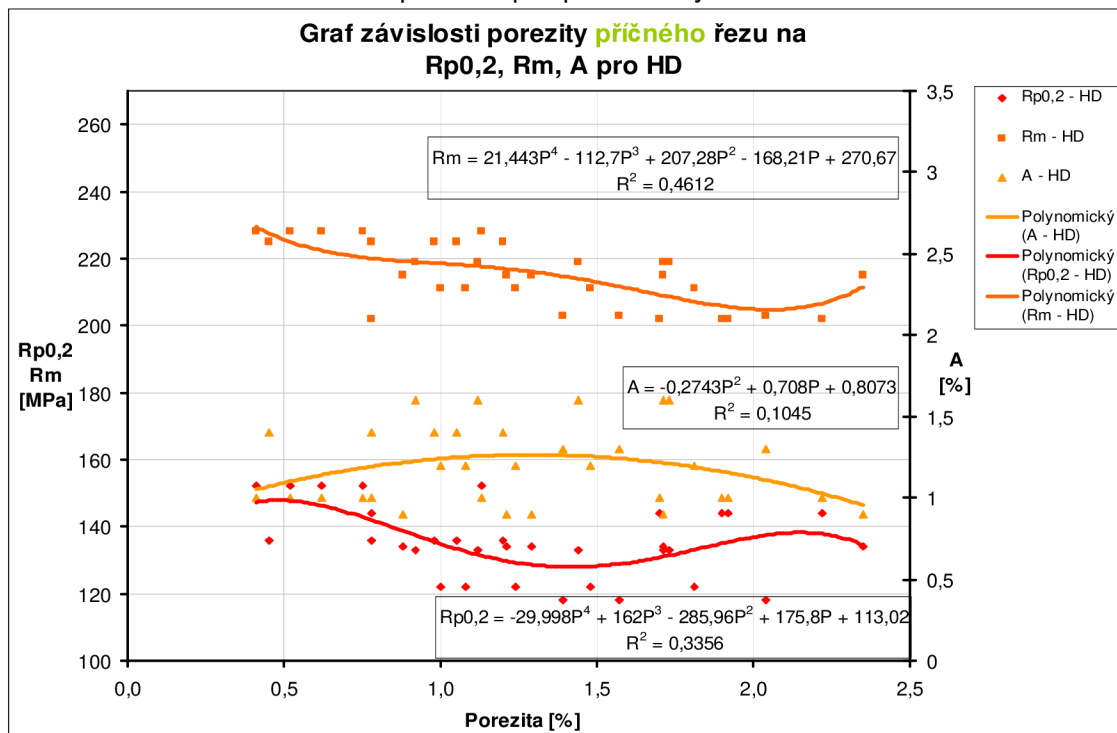
Přímka nebo křivka procházející nejbližše všem bodům v grafu je vždy jen jedna. K jejímu nalezení slouží metoda nejmenších čtverců. Determinační index R^2 v grafech vystihuje, jak těsně datové body přiléhají ke křivce. Nabývá hodnot $<0;1>$. Čím více se blíží jedné, tím těsněji datové body ke křivce přiléhají. Navíc určuje, jaké procento změn vysvětlované proměnné je znázorněno odhadnutým modelem. Čím vyšší je jeho hodnota, tím je model vhodnější. Obecně je velmi nevhodné používat polynomy vyšších stupňů než čtvrtých, neboť dobře popisují pouze výběrová data. Pro výsledné hodnoty měření porezity byly hledány vztahy $Rm = f(P)$, $Rp0,2 = f(P)$, $A = f(P)$, které jsou popsány rovnicemi v grafech. Šestnáct grafů s třemi závislostmi hodnotí tyto soubory:

- vlastní měření příčného řezu HD a HDS,
- průměr vlastních měření příčného řezu HD a HDS,
- všechna měření příčného řezu HD a HDS,
- průměr všech měření příčného řezu HD a HDS,
- vlastní měření podélného řezu HD a HDS,
- průměr vlastních měření podélného řezu HD a HDS,
- všechna měření podélného řezu HD a HDS,
- průměr všech měření podélného řezu HD a HDS.

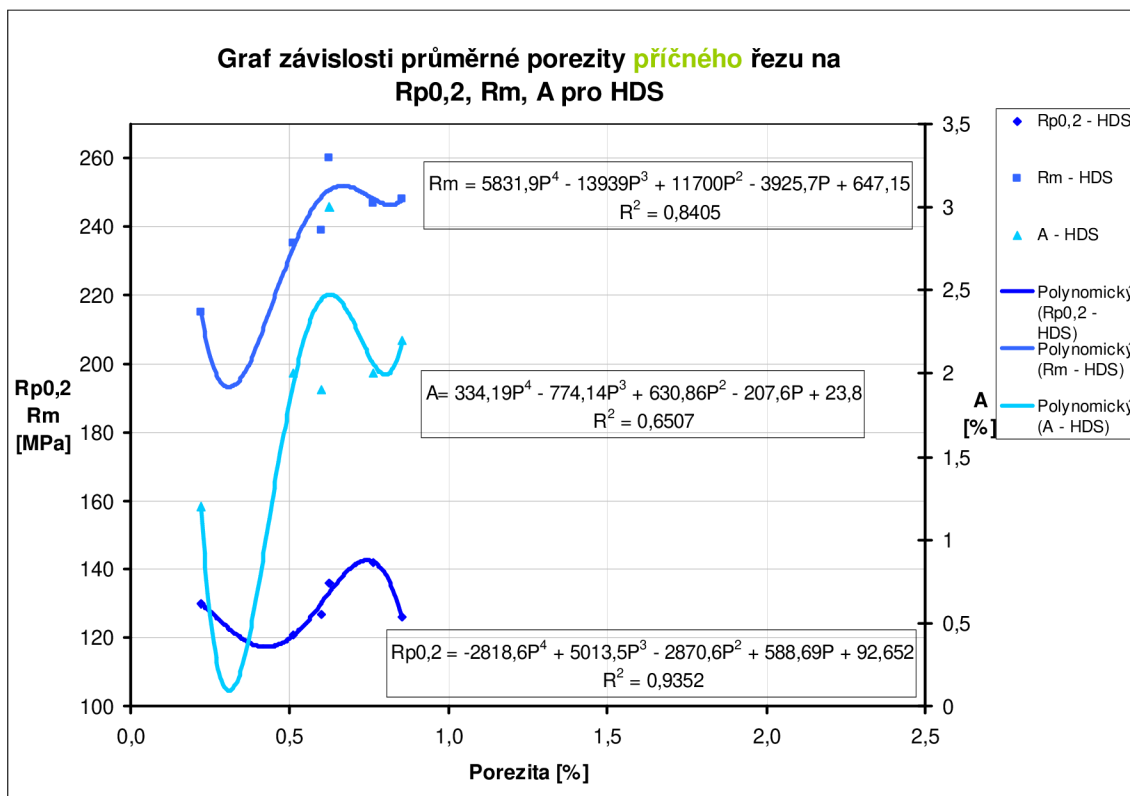
Vlastní měření – příčný řez:



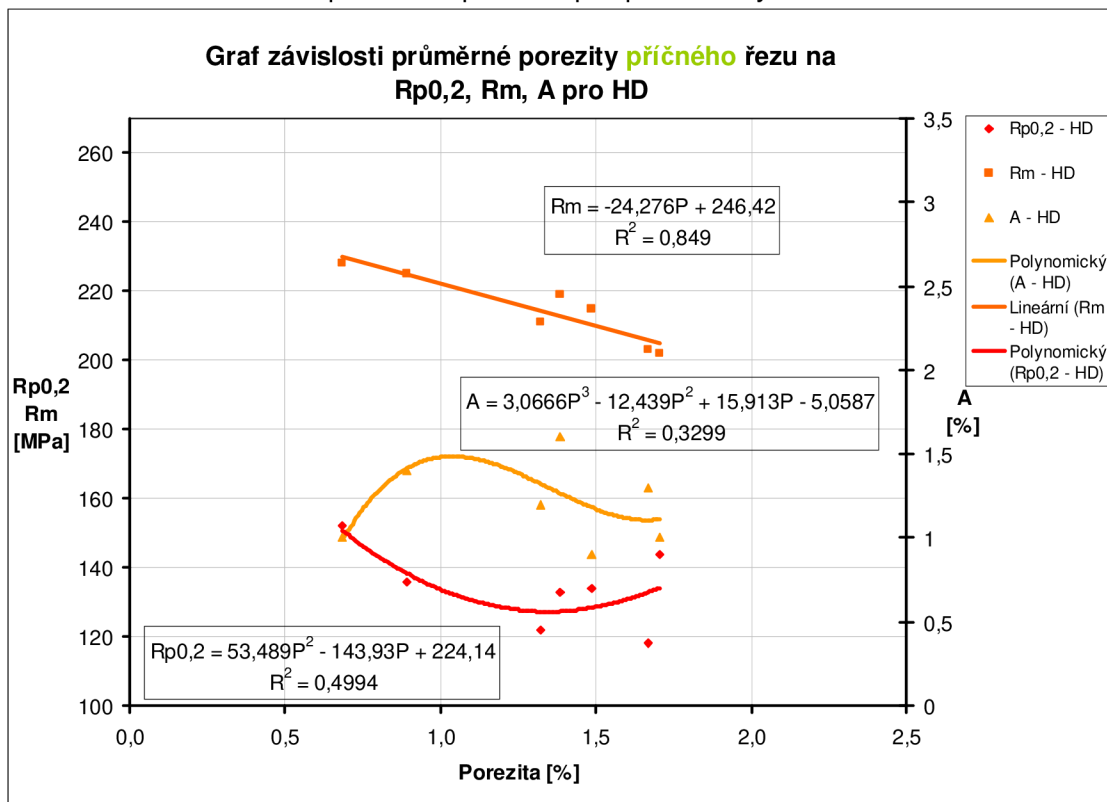
Obr. 2.23 Závislost smluvní meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti na perezitě pro příčné řezy HDS



Obr. 2.24 Závislost smluvní meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti na perezitě pro příčné řezy HD

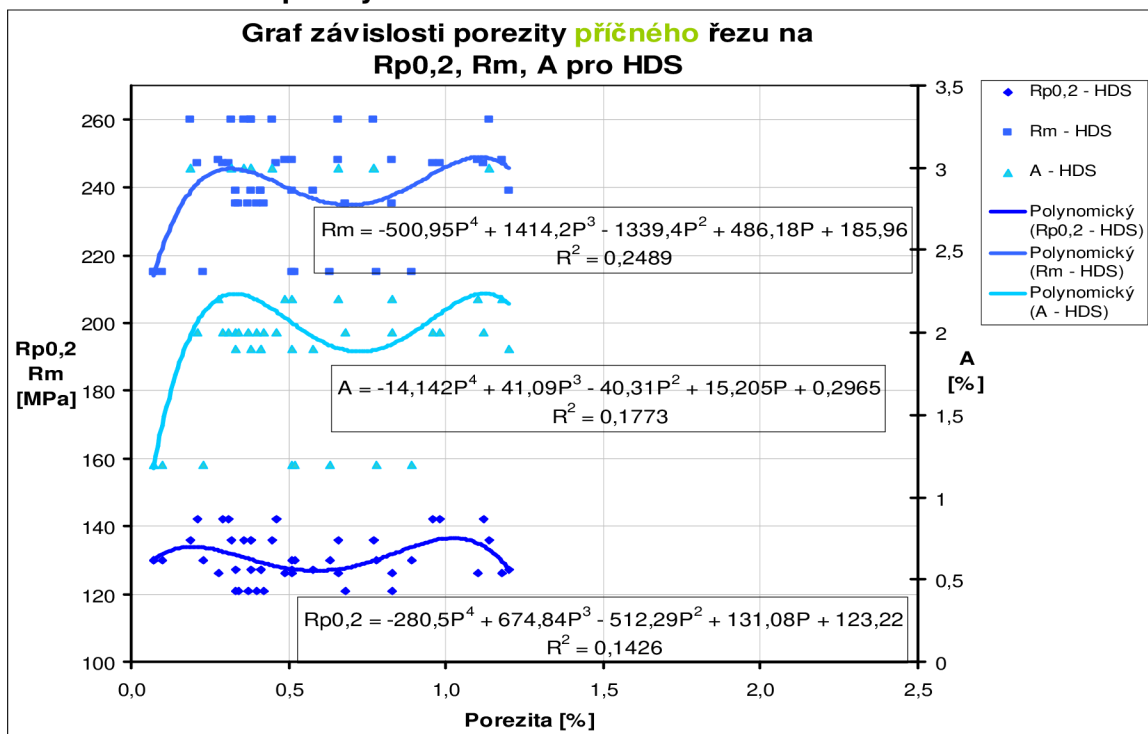


Obr. 2.25 Závislost smluvní meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti na průměrné poremity pro příčné řezu HDS

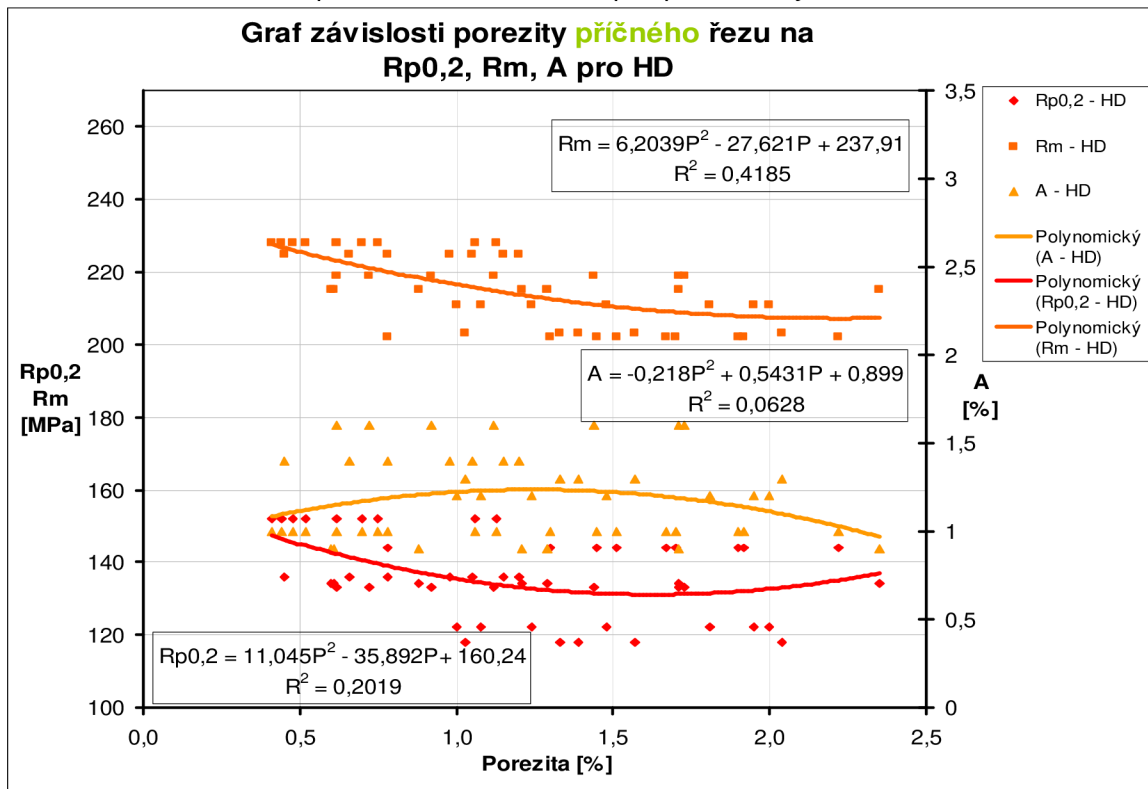


Obr. 2.26 Závislost smluvní meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti na průměrné poremity pro příčné řezu HD

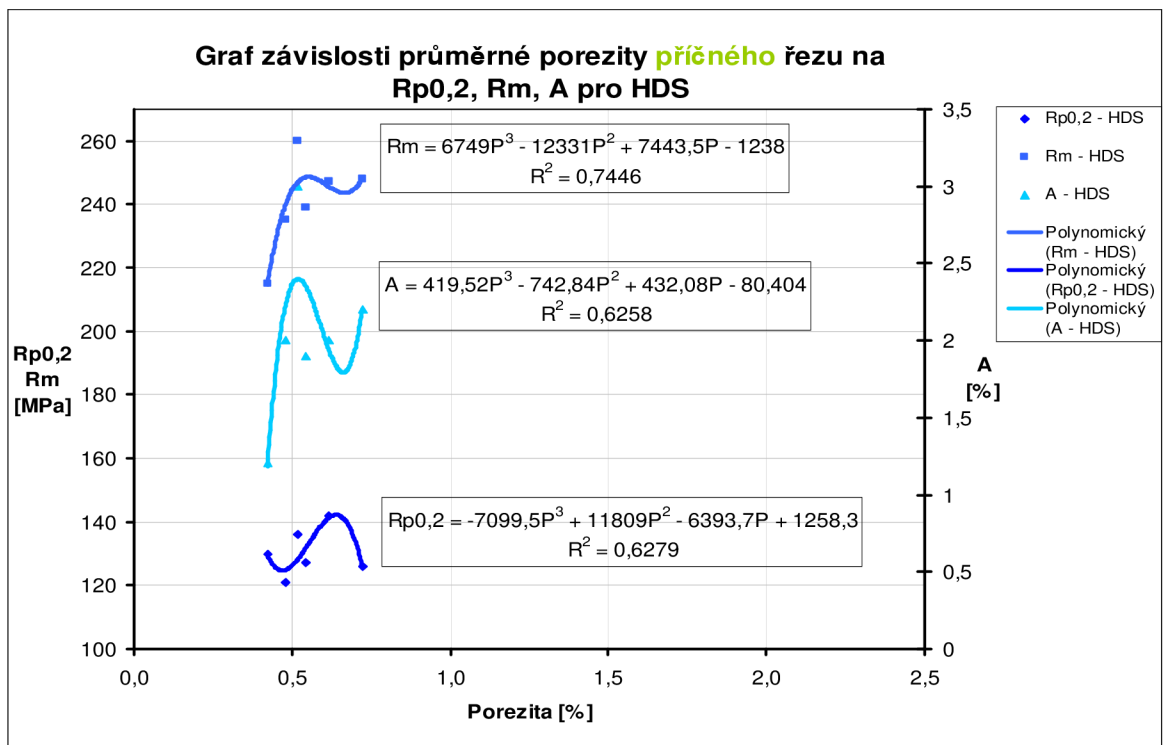
Všechna měření – příčný řez:



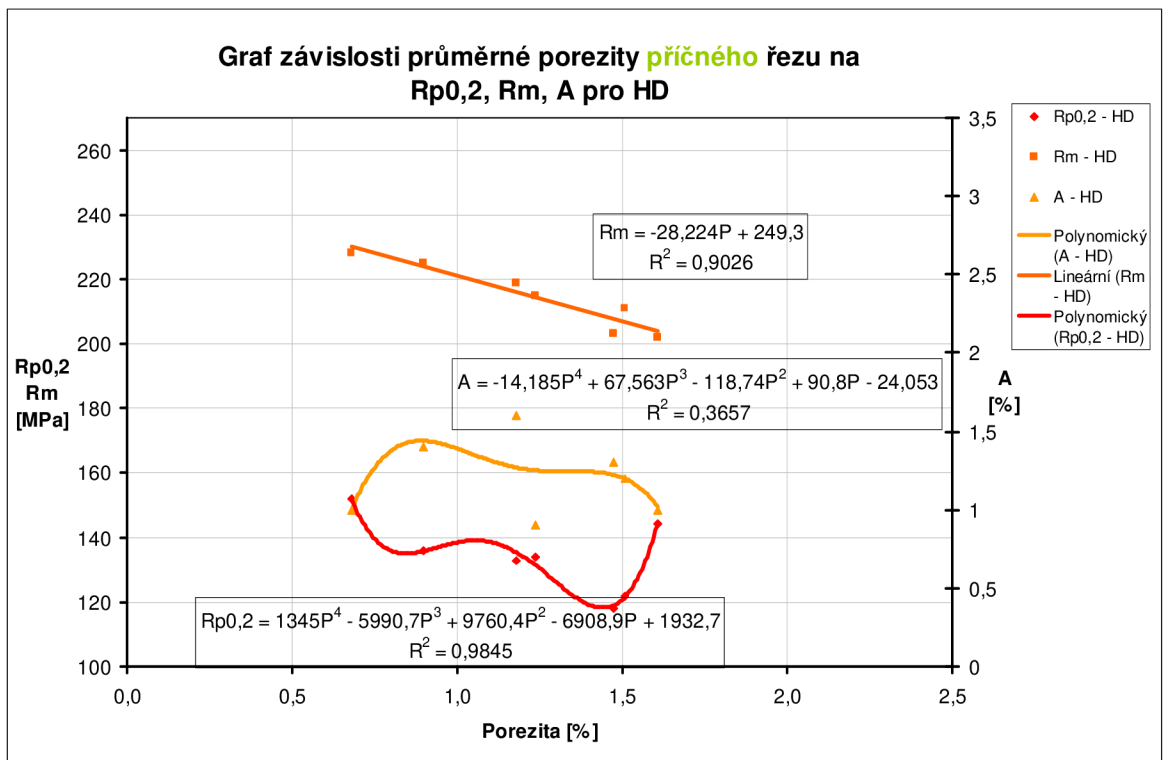
Obr. 2.27 Závislost smluvní meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti na poremitě všech měření pro příčné řezy HDS



Obr. 2.28 Závislost smluvní meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti na poremitě všech měření pro příčné řezy HD

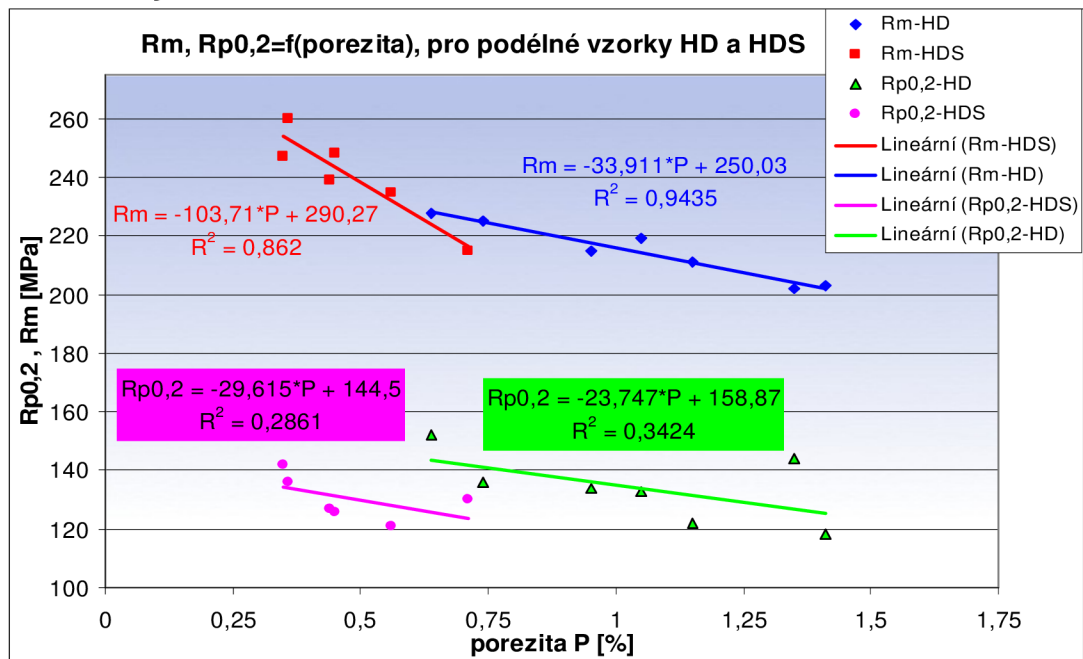


Obr. 2.29 Závislost smluvní meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti na průměrné poremzité všech měření pro příčné řezy HDS



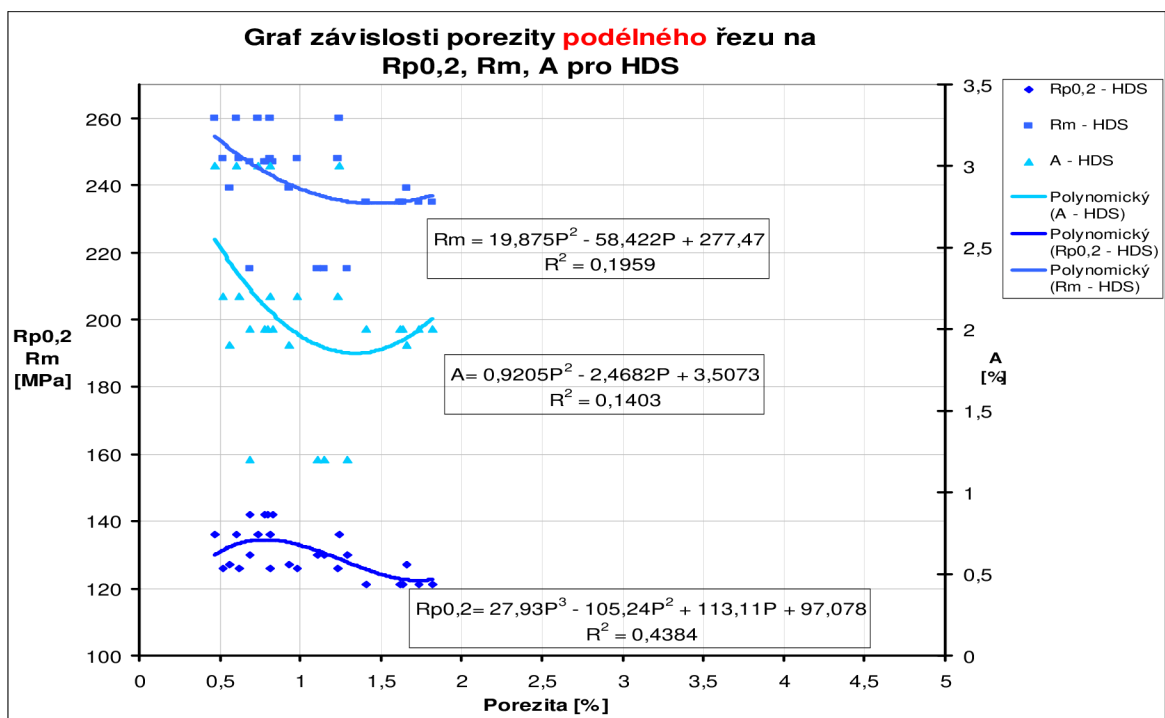
Obr. 2.30 Závislost smluvní meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti na průměrné poremzité všech měření pro příčné řezy HD

Podélné řezy

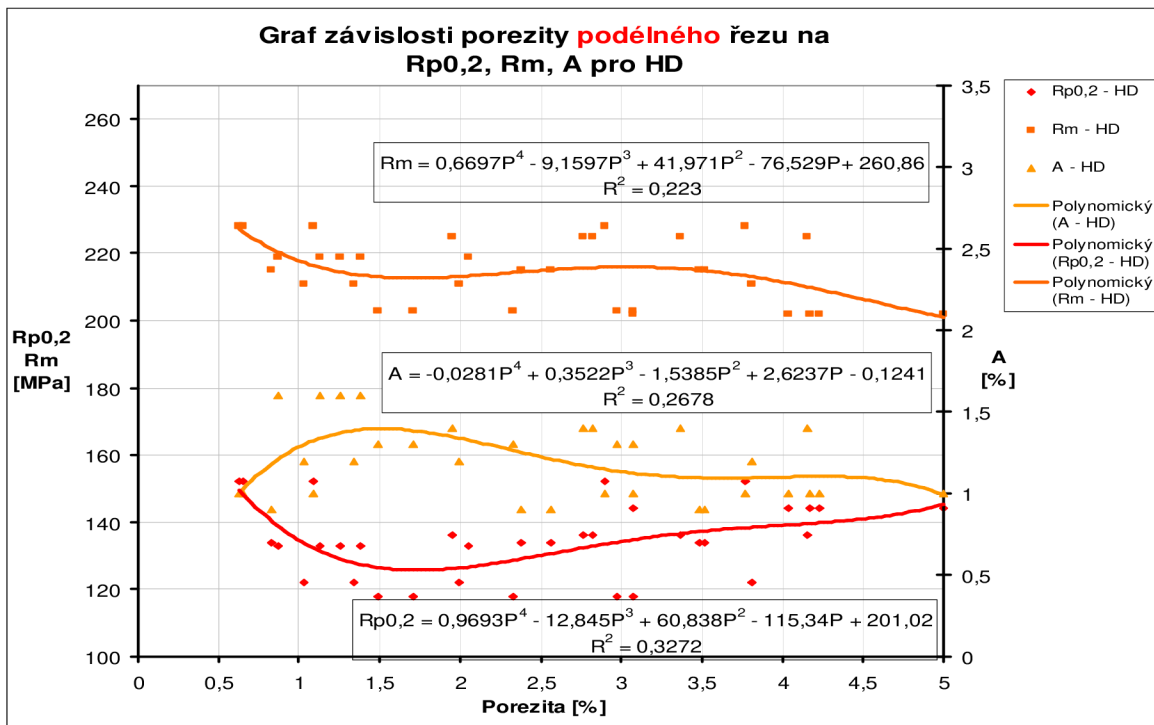


Obr. 2.31 Závislost smluvní meze kluzu a meze pevnosti na porezitě pro podélné řezy [2]

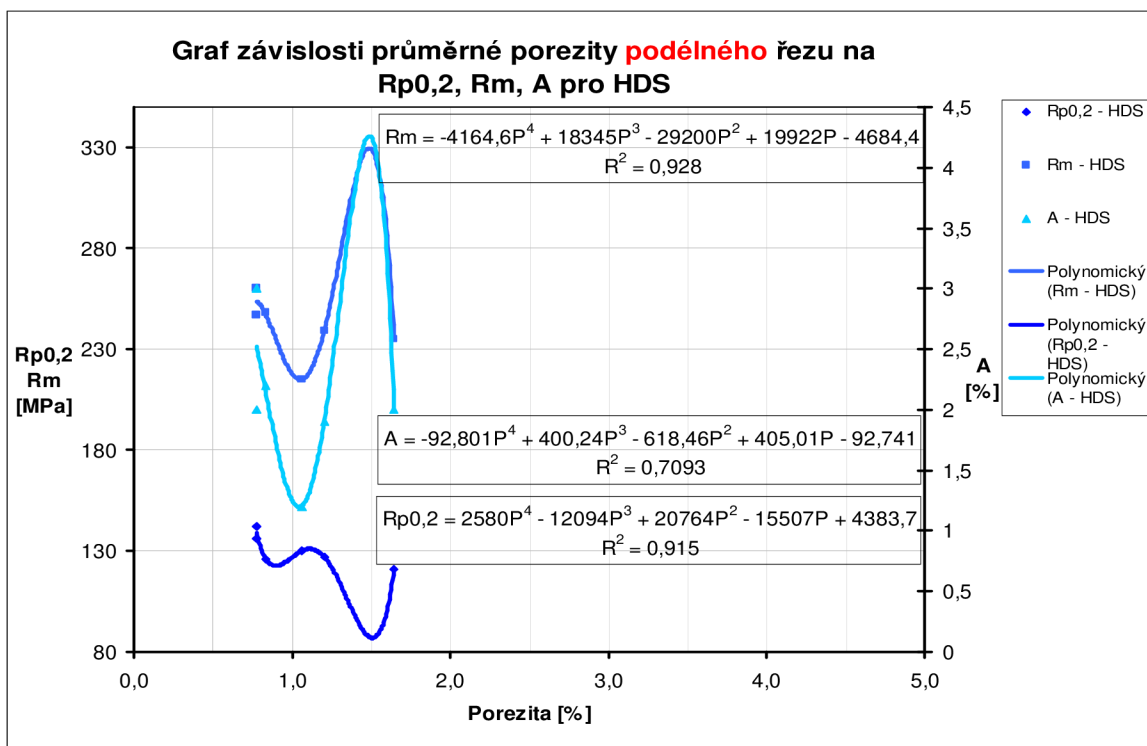
Vlastní měření – podélný řez:



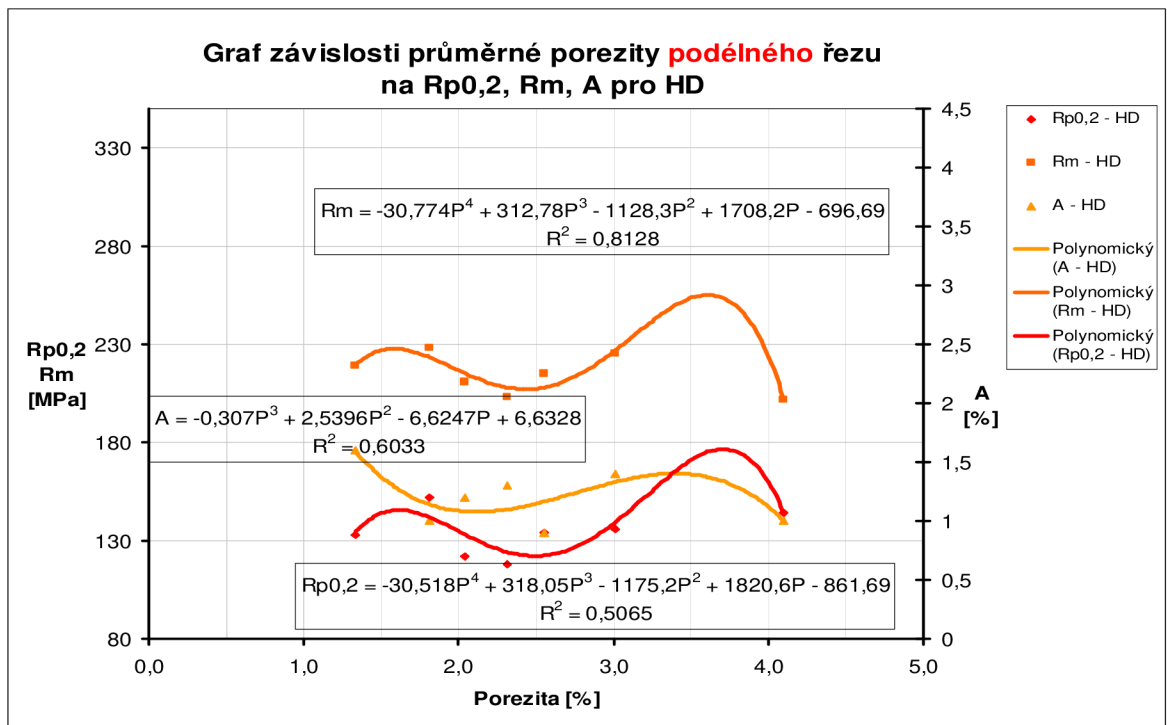
Obr. 2.32 Závislost smluvní meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti na porezitě pro podélné řezy HDS



Obr. 2.33 Závislost smluvní meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti na poremzité pro podélné řezy HD

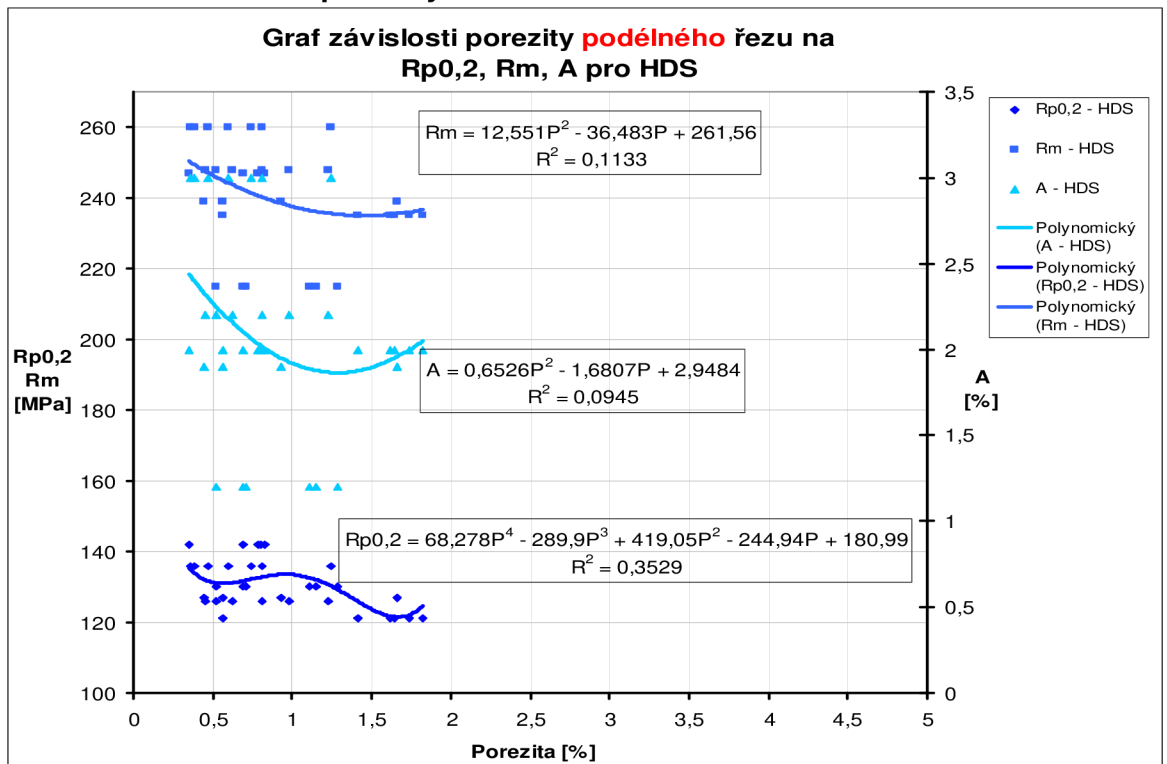


Obr. 2.34 Závislost smluvní meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti na průměrné poremzité pro podélné řezy HDS

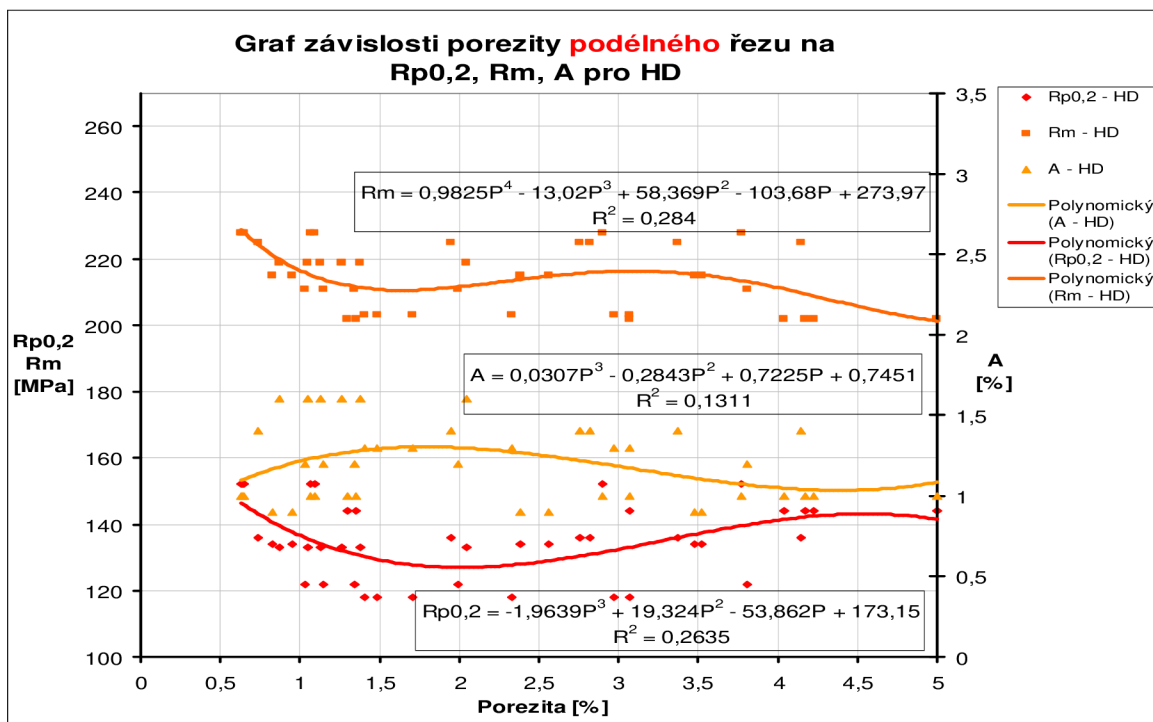


Obr. 2.35 Závislost smluvní meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti na průměrné poremzité pro podélné řezy HD

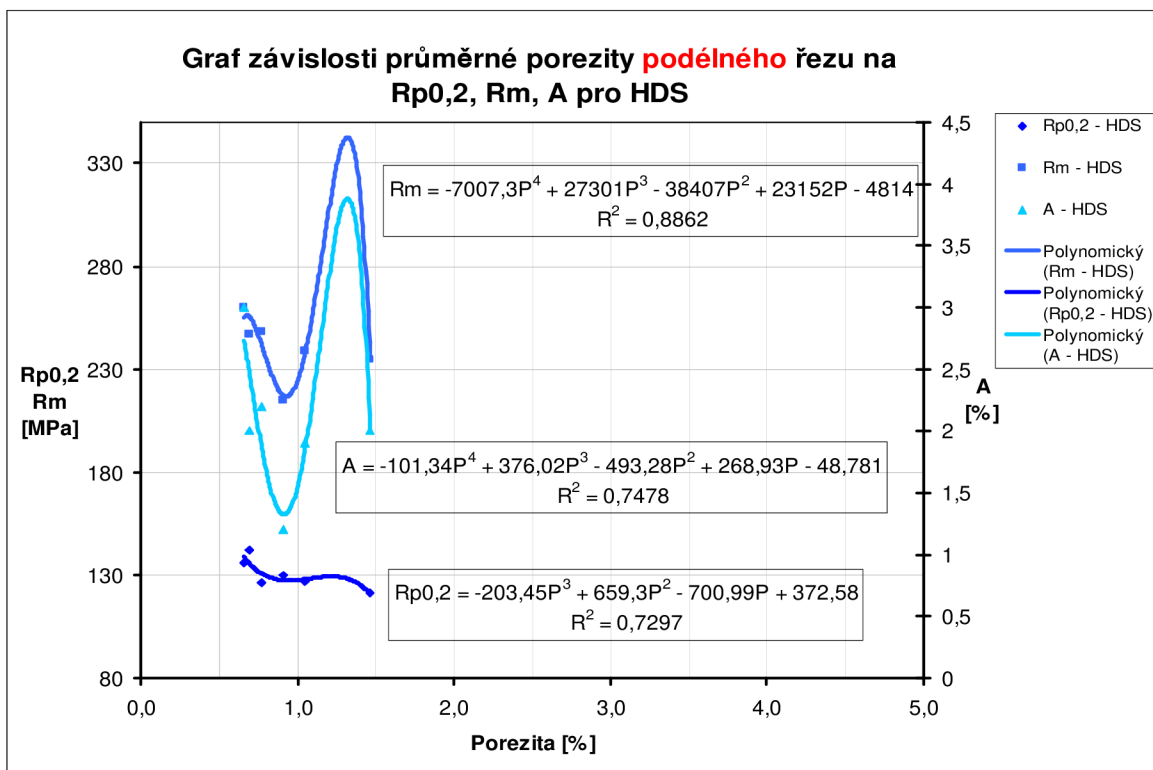
Všechna měření – podélný řez:



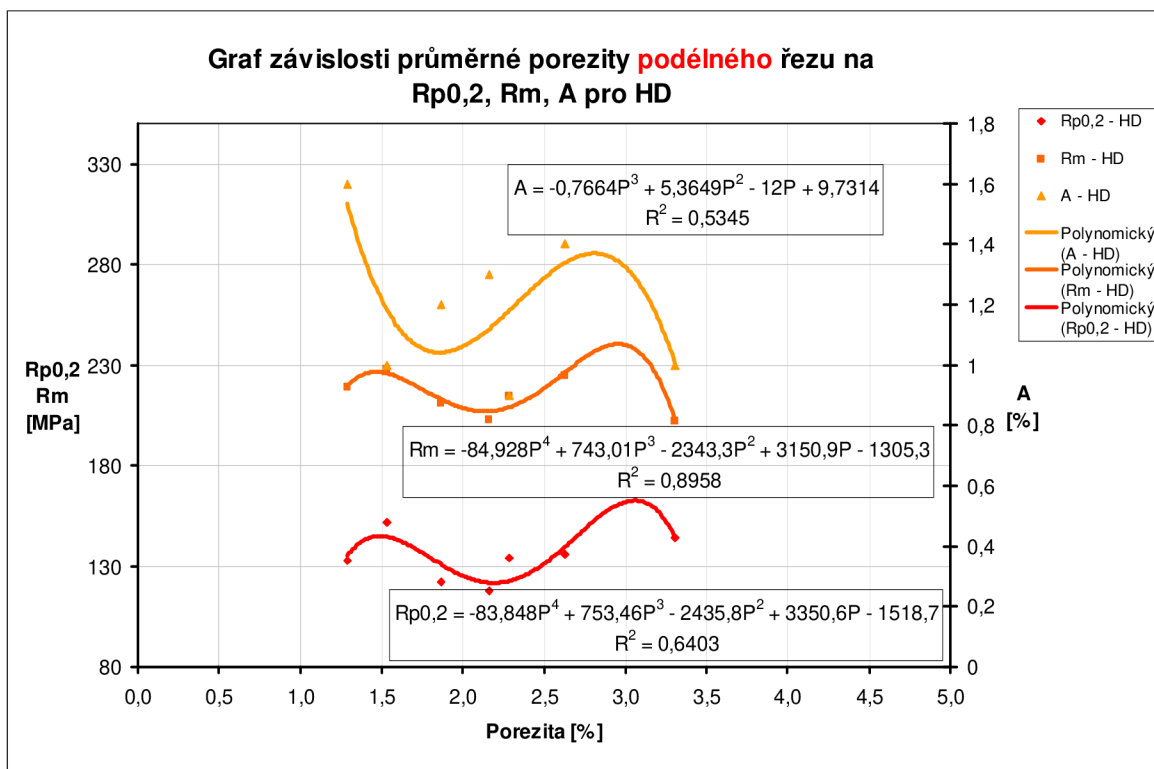
Obr. 2.36 Závislost smluvní meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti na poremzité všech měření pro podélné řezy HDS



Obr. 2.37 Závislost smluvní meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti na pomezitě všech měření pro podélné řezy HD



Obr. 2.38 Závislost smluvní meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti na průměrné pomezitě všech měření pro podélné řezy HDS



Obr. 2.39 Závislost smluvní meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti na průměrné porezitě všech měření pro podélné řezy HD

Pokud není významný rozdíl mezi determinačními indexy jednotlivých modelů ($\pm 2\%$), je vhodné zvolit model přímky. Pouze pokud je rozdíl významný, volí se model jiný. Protože zvolený model je zjednodušením reality, je vhodné volit model co nejjednodušší.

Ačkoliv determinační index vycházel u průměrných hodnot měření porezity nad 50 %, nezměnil výsledek testu regrese ani změna křivky na polynom nižšího stupně, případně na přímku.

2.7 Diskuse výsledků

U tlakového lití horního dílu dochází v souborech naměřených hodnot při zvětšující se porezitě k poklesu i nárůstu křivek pro R_m , $R_{p0,2}$ a A . Hodnocení pórovitosti je značně ovlivněno místem výběru vzorku na odlitku a místními strukturními i napětovými poměry, neboť vlastnosti nemají konstantní charakter napříč celým průřezem stěny odlitku [44].

Při posouzení tab. 2.11 a tab. 2.12 je patrné, že pro hodnoty z vlastního experimentu i hodnoty ze všech měření porezity platí vyšší výskyt této slévárenské vady u odlitků bez lokálního dotlaku. Celkový průměr pro zkoumanou oblast je u vzorků typu HD asi o 1% vyšší než u vzorků HDS. Nejvyšší výskyt ploch chybějícího kovu byl zjištěn v podélných řezech ložiska vzorků HD (průměrně nad 2 %).

Nejnižší průměrná porezita byla u všech těchto vzorků nalezena na příčném řezu odlitku s lokálním dotlakem (0,55%). Obecně platí pro dané zkoumání závěr, že porezita na podélných řezech je o 0,5 – 1 % vyšší než na příčných

řezech. Měření příčného řezu vzorků HDS vykazovala průměrně 0,55 % a podélného řezu 0,92 % porezity. Větší rozdíly byly patrné pro řezy vzorkem série HD – příčný řez neměl průměrně 1,23 % a podélný dokonce 2,15 % slitiny ve zkoumané oblasti 4. ložiska bloku motoru.

Celková průměrná porezita je 1,69 % u HD a 0,74 % u HDS. Lze tedy konstatovat, že série vzorků z odlitku litých bez LSC má 2,3 násobně vyšší porezitu. Zároveň má o málo vyšší průměrnou mez kluzu a nižší ostatní mechanické vlastnosti, jak dokládají tab. 2.5 a 2.6. Je zde tedy patrný trend poklesu mechanických hodnot se zvyšujícím se výskytem porezity.

Zhodnocení grafických závislostí:

Pro statisticky významné soubory dat platí následující shrnutí:

Rozbor závislosti meze pevnosti R_m , smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ a tažnosti A na porezitě P u odlitku s LSC (značení vzorků HDS):

$R_m - P$ (obr. 2.23, 2.27): graf polynomu 4. stupně zaznamenal nárůst do 0,25 % a poté pokles do 0,7 % porezity u příčného řezu. Obdobně se graf choval (rostl a klesal) i pro samostatné hodnoty vlastního měření.

$R_{p0,2} - P$ (obr. 2.32, 2.36): polynom 4. stupně pro podélný řez vykazoval mírný pokles smluvní meze kluzu do zhruba 1,8 % pro celková měření i vlastní měření (1,8 %) u podélného řezu.

$A - P$ (obr. 2.23): mocninná funkce má vzrůstající tendenci.

Rozbor závislosti meze pevnosti R_m , smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ a tažnosti A na porezitě P u odlitku bez LSC (značení vzorků HD):

$R_m - P$ (obr. 2.24, 2.26, 2.28, 2.30, 2.37): polynom 4. stupně klesal v grafu pro příčný i podélný řez v souboru všech měření. Stejná tendence byla zaznamenána u průměrných hodnot. Graf klesal i v souboru hodnot vlastního měření. Tam ale od 2 % mírně narůstal.

$R_{p0,2} - P$ (obr. 2.24, 2.28, 2.30, 2.33, 2.37): polynom 3. stupně pro podélný řez klesal do 2 % porezity a poté naznačoval mírný nárůst smluvní meze kluzu až do 5 % výskytu vady, obdobně u příčného řezu, kde bylo max. 2,3 %. Obdobná tendence pokles – nárůst byla zjištěna u vlastního měření i průměrných hodnot.

$A - P$: závislost naměřených hodnot byla vyhodnocena jako nelineární, jako polynomická statisticky nevýznamná s 95 % spolehlivostí.

2.8 Statistické vyhodnocení porezity

Byly provedeny čtyři statistické testy: Grubbsův test (test na hrubé chyby), Kolmogorovův test (test na normální rozdělení), posouzení linearity souborů pomocí korelačního koeficientu a test regresní analýzy.

Výsledky Grubbsova testu jsou znázorněny v tab. 2.13. V tabulkách jsou uvedeny hodnoty po vyselektování hrubých chyb. Hodnoty, které byly vyhodnoceny jako hrubé chyby, jsou označeny v předešlých tabulkách červenou barvou. Tyto vzorky byly z testovacích souborů odstraněny a test byl proveden opětovně, testováno na hladině spolehlivosti 95%.

U testu Kolmogorovova (tab. 2.14) byly hodnoceny stejné veličiny jako v předchozím případě. U tohoto testu lze s 95% spolehlivostí zjistit, zda má, či nemá testovaný soubor normální rozdělení. Všechny veličiny podrobené testu měly testovací veličinu D menší než kritickou hodnotu D_p a měly tedy normální rozdělení.

Byla posouzena linearita mechanických veličin R_m , $R_{p0,2}$, A ve vztahu k porezitě (tab.2.15). Stanovená hodnota korelace „ r “ byla porovnávána s kritickou hodnotou „ r_p “. V případě linearity odpovídal průběh porezity u testovaných souborů proložené přímkou:

$$y = k \cdot P + q \quad \begin{array}{l} y - \text{mechanická veličina } (R_m, R_{p0,2}, A) \\ k - \text{směrnice přímky} \\ P - \text{porezita} \\ q - \text{konstanta přímky} \end{array} \quad (8)$$

Většina souborů hodnot však nevykazovala lineární závislost a pro určení typu nelineární závislosti byla zvolena metoda regresní analýzy.

Regresní analýza slouží co nejpřesnějšimu proložení bodů grafu různými typy křivek: přímkou, logaritmickou, exponenciální křivkou nebo polynomem. Důležitým srovnávacím parametrem je determinační koeficient R^2 , který je v intervalu hodnot 0 až 1. Je-li R^2 např. 0,25 je vysvětleno 25 % změny příslušné mechanické vlastnosti změnou výskytu porezity v odlitku.

Nalezený nejlepší regresní model musí obsahovat kritéria věrohodnosti. Proto byla zjišťována p – hodnota (F významnost) pomocí celkového F - testu regresní analýzy: Je – li p - hodnota $> \alpha = 0,05$, není model tvořený regresní křivkou statisticky významný a nelze jej pro daná data použít. Proto nezamítám nulovou hypotézu H_0 : zvolený model není statisticky významný a proměnné nejsou na sobě závislé. Důležitým činitelem pro porovnání vhodnosti různých typů křivek je střední kvadratická chyba predikce (chyba střední hodnoty). Čím je menší, tím je predikční schopnost navrženého modelu lepší. Tab. 2.16 znázorňuje všechny statisticky významné závislosti porezity na mechanických hodnotách. V příloze 7 je pro srovnání celková tabulka zjištěných závislostí.

Při použití testu významnosti hodnoty determinačního indexu R^2 nelze pro větší část měření porezity z oblasti 4. ložiska motoru stanovit statistickou významnost modelu (určit, zda nalezený model přispěje ke zpřesnění odhadu závisle proměnné oproti použití pouhého průměru).

Pórovitost je značně ovlivněna také místem výběru vzorku, proto je rozptyl při stanovení mechanických hodnot značný. [44]

Tab. 2.13 Vyhodnocení Grubbsova testu pro horní díl – pomezita

Vzorky HDS veličina	Testovací veličina T1	Testovací veličina T2	Kritická hodnota	Vzorky HD veličina	Testovací veličina T1	Testovací veličina T2	Kritická hodnota
R_m	1,845	1,39	1,996	R_m	1,358	1,419	2,093
$R_{p0,2}$	1,353	1,692	1,996	$R_{p0,2}$	1,484	1,641	2,093
A	1,609	1,798	1,996	A	1,288	1,717	2,093
Z	1,069	1,604	1,869	Z	1,104	1,472	2,093
P_{po}	0,955	1,963	1,996	P_{po}	1,369	1,83	2,093
P_{pr}	1,357	1,735	1,996	P_{pr}	1,737	1,216	2,093

Hodnoty pro pomezitu jsou z průměrných hodnot všech měření.

Tab. 2.14 Vyhodnocení Kolmogorovova testu pro horní díl – pomezita

Vzorky HDS veličina	Testovací veličina D	Testovací veličina Dp	Vzorky HD veličina	Testovací veličina D	Testovací veličina Dp
R_m	0,176	0,519	R_m	0,18	0,483
$R_{p0,2}$	0,186	0,519	$R_{p0,2}$	0,172	0,483
A	0,222	0,519	A	0,233	0,483
Z	0,257	0,563	Z	0,244	0,483
P_{po}	0,212	0,519	P_{po}	0,129	0,483
P_{pr}	0,174	0,519	P_{pr}	0,208	0,483

Hodnoty pro pomezitu jsou z průměrných hodnot všech měření.

Tab. 2.15 Lineární závislosti pomezity na mechanických vlastnostech potvrzená testem linearity

Lineární závislost pomezity vyhodnocená testem linearity	
HDS - R_m	Příčný řez: vlastní měření č. 5 - 9
HD - R_m	
HDS - $R_{p0,2}$	Podélný řez: vlastní měření č. 5 - 9
HD - $R_{p0,2}$	Příčný řez: všechna měření
HD - R_m	
HDS - $R_{p0,2}$	Podélný řez: všechna měření
HD - R_m	Příčný řez: vlastní průměrné hodnoty
HD - R_m	Příčný řez: všechny průměrné hodnoty

Tab. 2.16 Statisticky významné funkční závislosti mechanických hodnot na porezitě

Soubor měření	Typ řezu	Mechanická veličina	Typ regresní křivky	Determinační index R^2	Vhodnost modelu [%]	P hodnota	Statisticky významné
Vlastní hodnoty	příčný	HDS - R_m	polynom 4. st.	0,397	40%	0,011	ANO
		HDS - A	mocninný	0,291	29%	0,002	ANO
		HD - $R_{p0,2}$	polynom 4. st.	0,336	34%	0,019	ANO
		HD - R_m	polynom 4. st.	0,461	46%	0,001	ANO
	podélný	HDS - $R_{p0,2}$	polynom 3. st.	0,438	44%	0,004	ANO
		HD - $R_{p0,2}$	polynom 4. st.	0,327	33%	0,018	ANO
Průměrné vlastní	příčný	HD - R_m	lineární	0,849	85%	0,003	ANO
		HD - $R_{p0,2}$	polynom 4. st.	0,984	98%	0,031	ANO
Všechny hodnoty	příčný	HDS - R_m	polynom 4. st.	0,249	25%	0,017	ANO
		HD - $R_{p0,2}$	polynom 2. st.	0,202	20%	0,004	ANO
		HD - R_m	polynom 2. st.	0,419	42%	0,000	ANO
	podélný	HDS - $R_{p0,2}$	polynom 4. st.	0,353	35%	0,009	ANO
		HD - $R_{p0,2}$	polynom 3. st.	0,264	26%	0,007	ANO
		HD - R_m	polynom 4. st.	0,284	28%	0,011	ANO
Průměrné všechny	příčný	HD - R_m	lineární	0,90	90%	0,001	ANO

2.9 Simulace

Simulace procesů odlévání se celosvětově vyvinula ve velmi důležitý nástroj ve slévárenském průmyslu. S její pomocí se mohou numericky vypočítat komplexní procesy proudění a různé fenomény tuhnutí a ochlazování (parametry tuhnutí, napětí a deformace). Pomocí vypočtených teplotních polí v odlitku a jejich vyjádření matematicko – fyzikálními závislostmi lze v programu určit některé vlastnosti odlitku. [34]

Byly provedeny simulace lití v simulačním programu MAGMA ve firmě Škoda Auto a.s. Pro porozumění pochodů během lití byly vždy provedeny simulace plnění formy a tuhnutí odlitku, z nich byl získán grafický výstup v podobě sekvence obrázků.

Výpočty porezity v simulačním programu vychází ze smršťování kovů v místech posledního tuhnutí kovu (tepelné uzly). Tyto uzly vznikají v silnějších stěnách odlitku, v místech spojů několika stěn nebo v místech kde probíhá ochlazování pomaleji – jedná se o části odlitku, kde je lokálně ještě tekutý kov, ale okolní kov je již ztuhlý a brání tak dosazování do tepelného uzlu. Vlivem smrštění může dojít ke vzniku dutin. [5]

Vysvětlení stupnice porezity v softwaru MAGMASoft

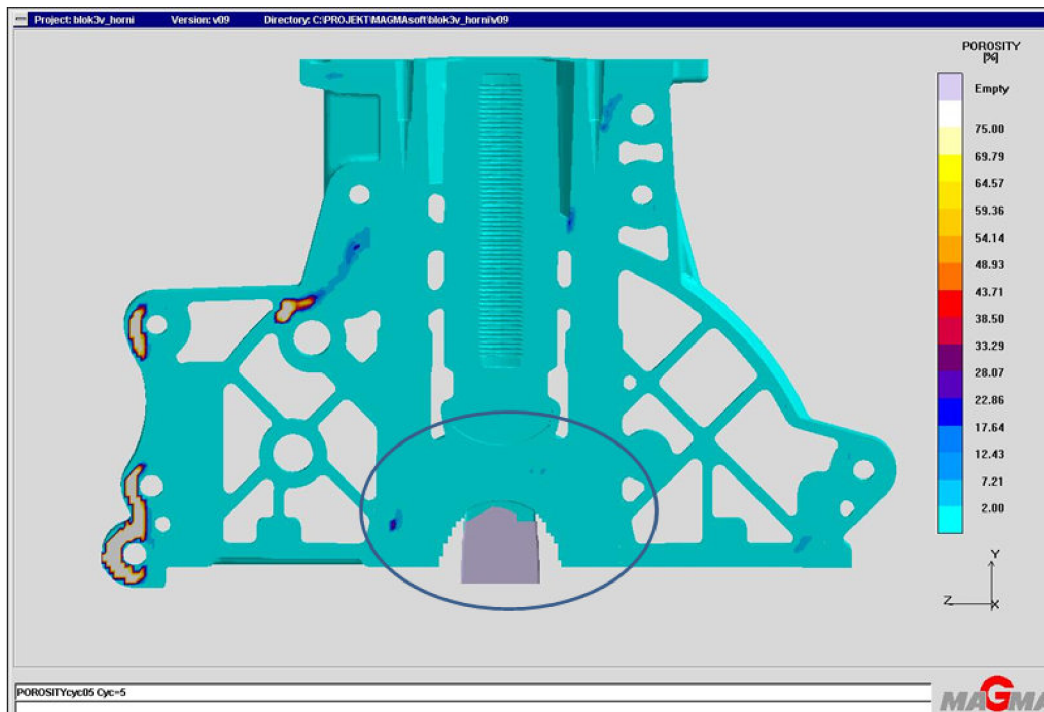
Čísla stupnice porezity kalkulují množství chybějícího materiálu v objemu odlitku (deficit kovu) vyjádřeno v procentech. Software MAGMASoft ovšem není schopen rozpoznat porezitu na úrovni mikrostaženin.

Když se např. barva, která přísluší 7,2 % porezity objeví v odlitku, znamená to, že v takto barevné oblasti se bude vyskytovat 92,8 % kovu a 7,2 % pórů. Ukáže-li stupnice porezitu do 3 - 4 % (což přibližná hodnota smrštění siluminů), nejedná se o vadu, pouze o smrštění kovu. [41] Kromě smršťovací porezity se může ve výsledcích objevit i porezita vzniklá uzavřením plynu v dutině formy [5].

Simulaci lití hliníkové slitiny AISi9Cu3 v softwaru MAGMASoft s lokálním dotlakem i bez něj předcházelo zesíťování trojrozměrného CAD modelu.

Absolutní porovnání experimentálně naměřené porezity s výsledky predikovanými simulačním softwarem není úplně proveditelné, protože MAGMA vyjadřuje míru porezity jako koncentrovanou staženinu do malého objemu materiálu a tedy o velikosti v desítkách procent. U tlakového lití se porezita vyskytuje spíše rozptýleně ve větším prostoru, vlivem dotlaku při tuhnutí odlitku. Také hodnoty z obrazového výstupu by musely přesně souhlasit s místem experimentálního odběru vzorku. Celkově se však naměřené hodnoty shodují s procentuálně doloženou porezitou horního dílu motoru ze simulačního programu Magma.

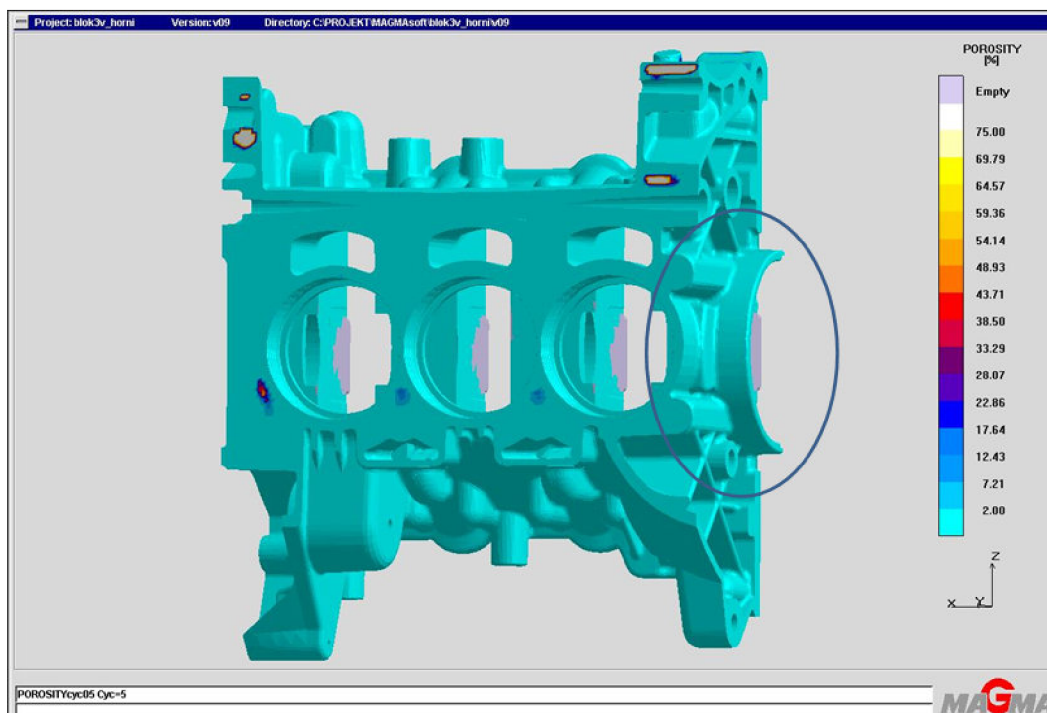
Stanovení porezity horního dílu motoru odlévaného bez lokálního dotlaku v programu Magma



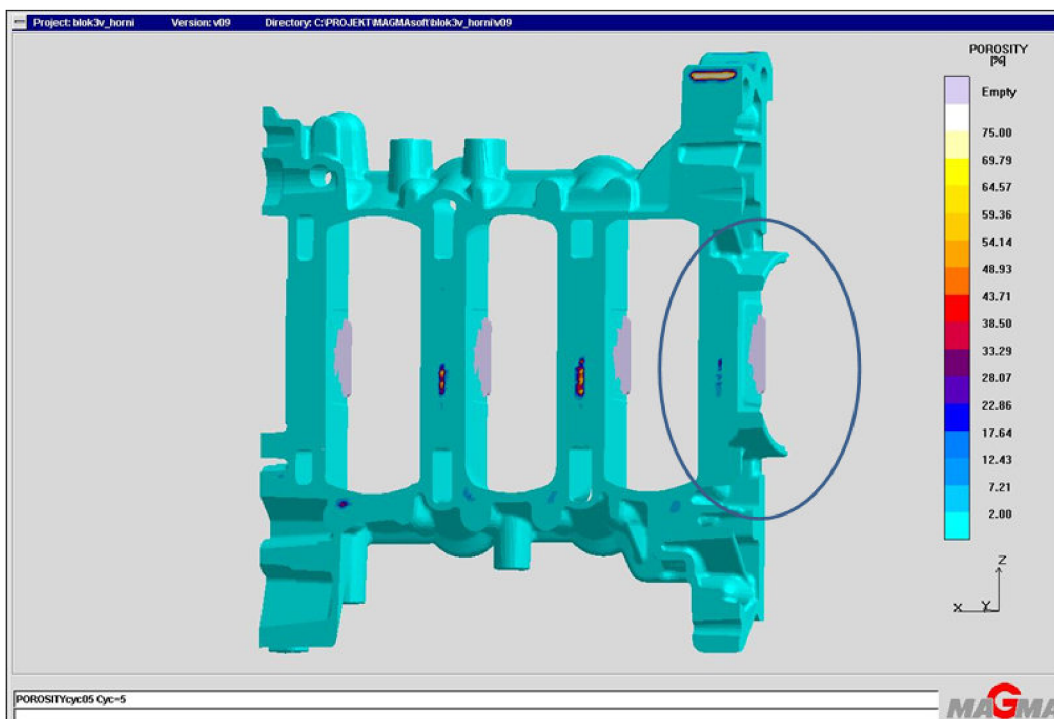
Obr. 2.40 Porezita naměřená v oblasti 4. ložiska bloku motoru litého tlakově bez LSC, boční pohled

Pozn.: oblast v modré elipse není porezita. Je to místo, kde je v případě lití s dotlakem rezervoár slitiny AlSi9Cu3(Fe) . Program Magma tam identifikuje prázdné místo, domnělou vadu.

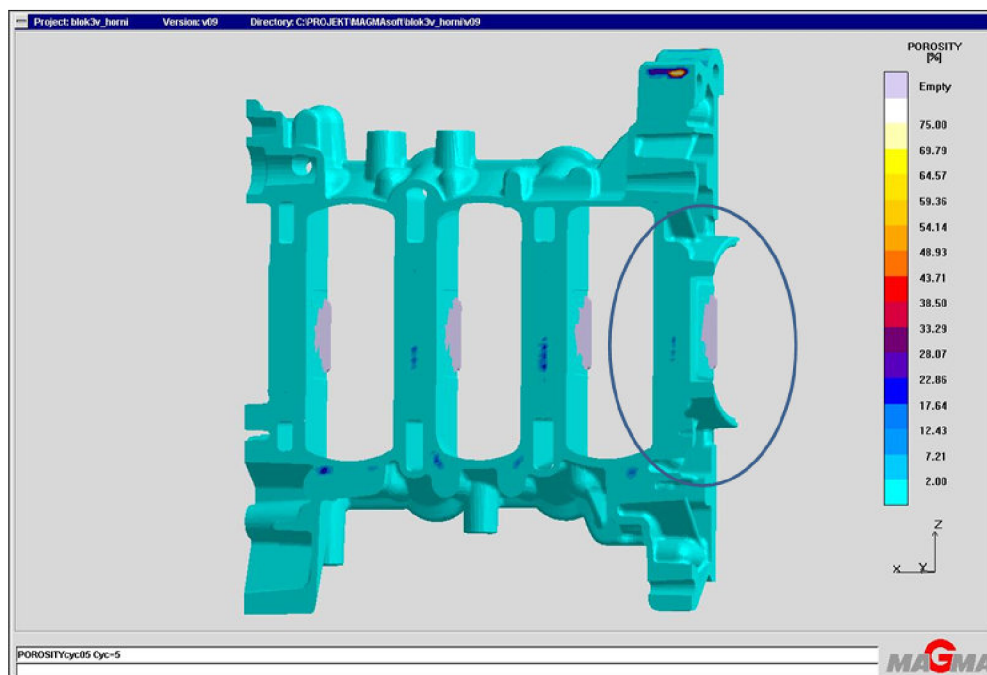
Z obr. 2.40 vyplývá, že software MAGMASoft vypočítal výskyt porezity v místě 4. ložiska u dílu bez lokálního dotlaku větší než 2 %, v jednom místě dokonce do 22 % pórů. Tmavší odstín tyrkysové barvy poukazuje na maximální obvyklou hodnotu porezity 7,21 % a ta byla v experimentu potvrzena jako nejvyšší zjištěná (7,2%), i když byla při statistickém hodnocení vyřazena ze souboru jako hrubá chyba.



Obr. 2.41 Porezita naměřená v oblasti 4. ložiska bloku motoru, tlakové lití bez LSC, horní pohled na ložisko

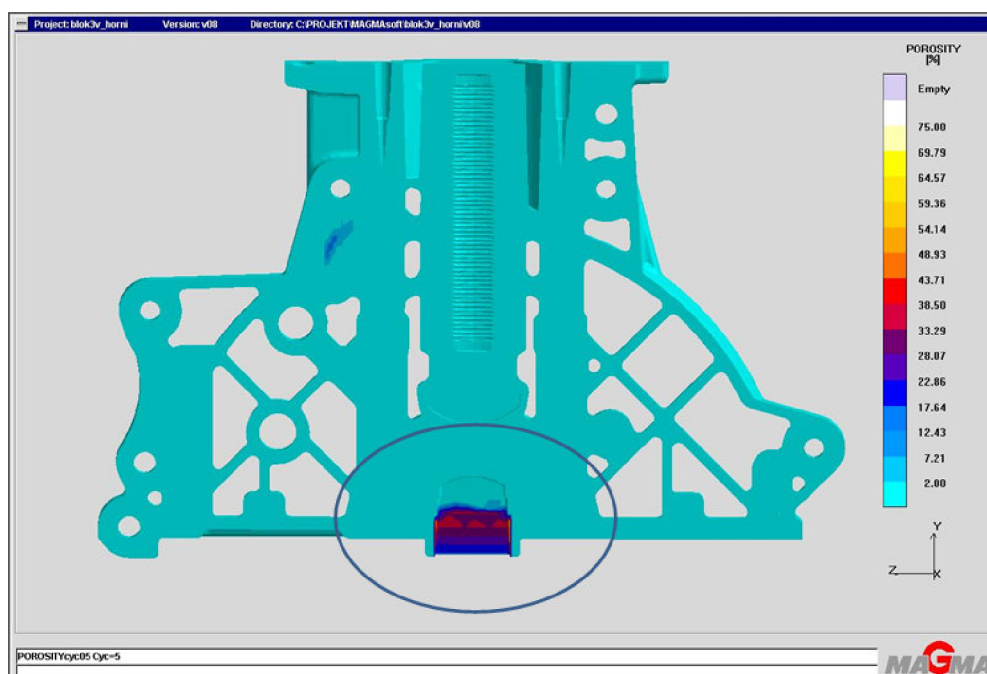


Obr. 2.42 Porezita naměřená v oblasti 4. ložiska bloku motoru, tlakové lití bez LSC, horní pohled na ložisko v řezu



Obr. 2.43 Porezita naměřená v oblasti 4. ložiska bloku motoru, tlakové lití bez LSC, horní pohled na ložisko v řezu

Stanovení porezity horního dílu motoru odlévaného s lokálním dotlakem v programu Magma



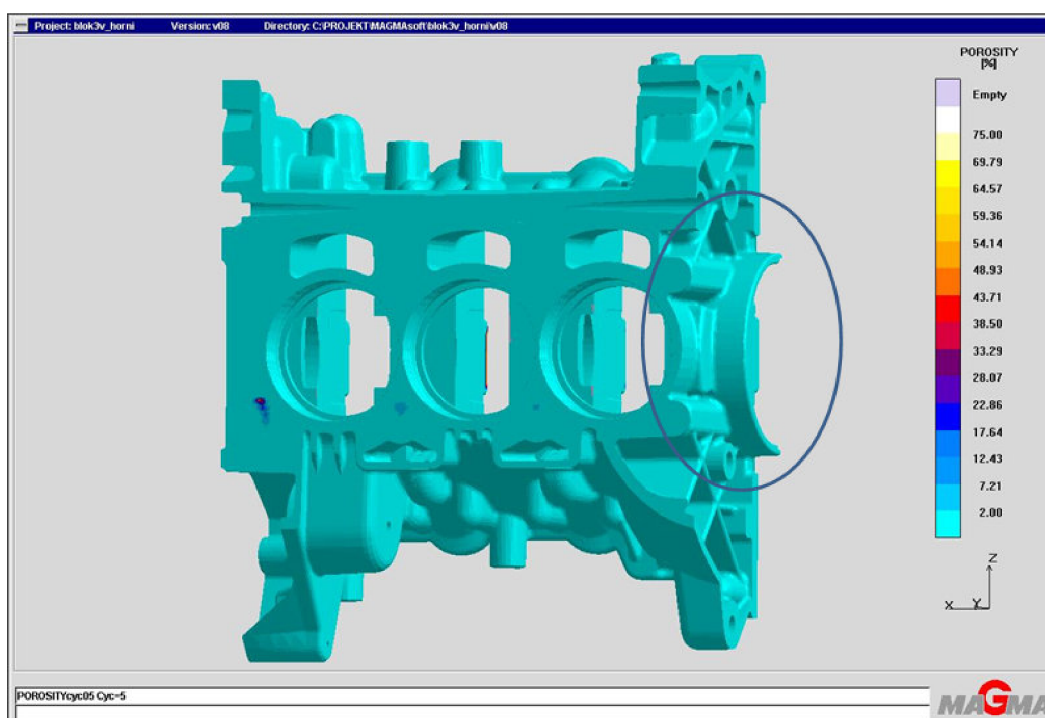
Obr. 2.44 Porezita naměřená v oblasti 4. ložiska bloku motoru litého tlakově s LSC, boční pohled

Pozn.: označeno je místo, kde je u lití s dotlakem rezervoár slitiny AlSi9Cu3(Fe). Magma tam identifikuje porezitu, která je způsobena vtačením slitiny do prostoru ložiska (dotlak) a následně tam zůstává prázdný rezervoár, což ale není porezita v ložisku. Ložisko je podle simulace Magma bez vad.

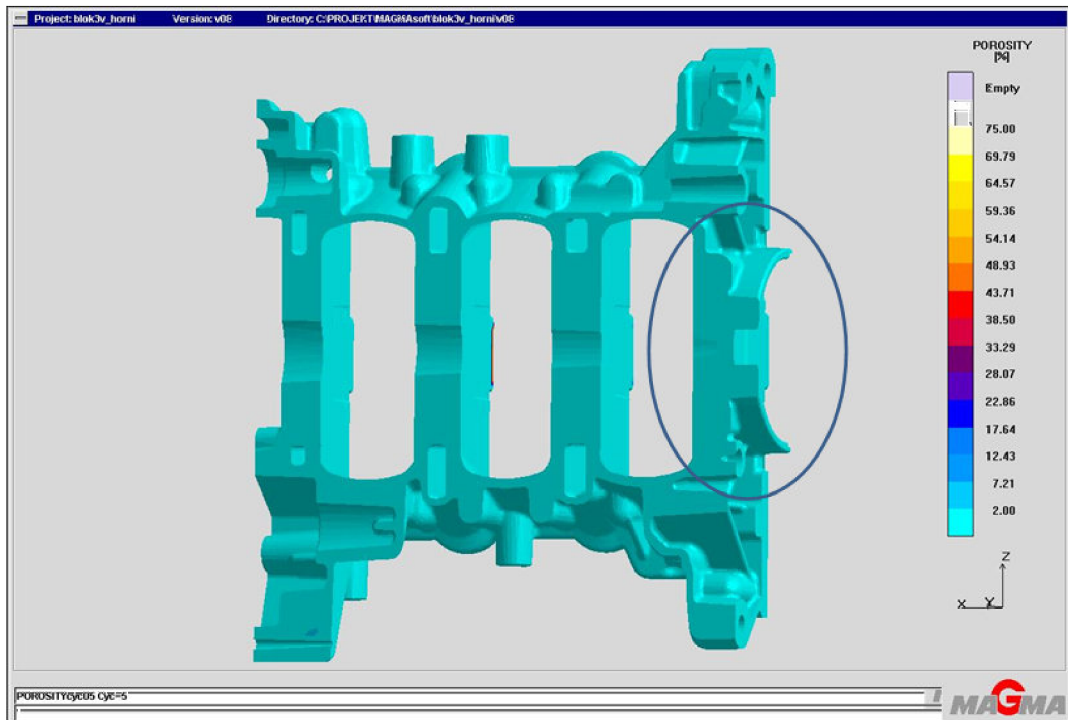
Z obr. 2.44 vyplývá, že software MAGMASoft vypočítal výskyt porezity v místě 4. ložiska u dílu s lokálním dotlakem menší než 7,21%. Toto bylo potvrzeno i experimentálním měřením porezity, neboť maximální hodnota byla pro tuto oblast 3,27 % pórů v kovu.

Výsledky experimentálního měření porezity jsou v intervalu hodnot, které byly zjištěny pomocí numerické simulace.

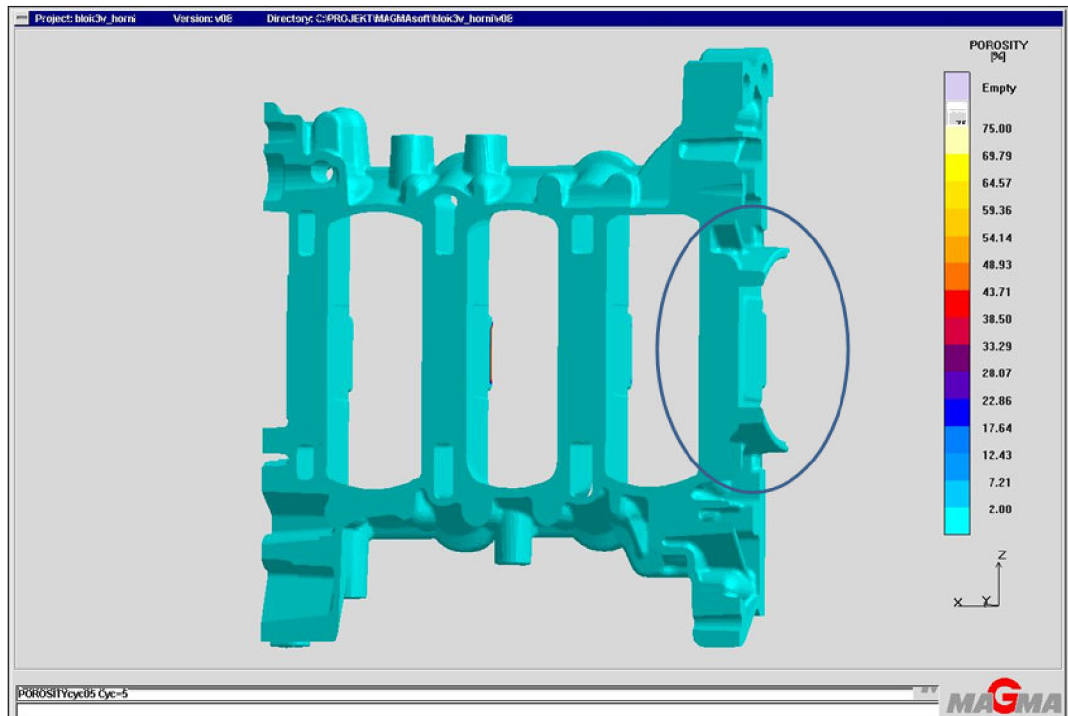
Lokální dotlak při odlévání tohoto odlitku zmenšil objem vzduchu v problematické oblasti ložiska, čímž se zvýšila jeho pevnost a těsnost. Tlak na tuhnoucí kov zjemní také mikrostrukturu a tím zvýší kvalitu odlitku. [49]



Obr. 2.45 Porezita naměřená v oblasti 4. ložiska bloku motoru, tlakové lití s LSC, horní pohled na ložisko



Obr. 2.46 Porezita naměřená v oblasti 4. ložiska bloku motoru, tlakové lití s LSC, horní pohled na ložisko v řezu



Obr. 2.47 Porezita naměřená v oblasti 4. ložiska bloku motoru, tlakové lití s LSC, horní pohled na ložisko v řezu

ZÁVĚR

Byly zkoumány dvě technologie výroby odlitků pro zjištění porezity a jejího zhodnocení v závislosti na mechanických vlastnostech.

Ze zjištěných měření porezity na 12 vzorcích (podélný a příčný řez) odlévaných tlakovým litím a 14 vzorcích odlévaných tlakovým litím s lokálním dotlakem 4. ložiska motoru EA 111 03D/1,2 Škoda Auto a. s. lze shrnout následující závěry.

Odlitek série HD bez lokálního dotlaku vykazuje nejvyšší porezitu na podélném řezu vzorku (průměrná 2,15 %, maximální 7,2 %) a průměrnou celkovou porezitu 2,3krát vyšší než u série HDS. Zároveň má série vzorků HD mírně vyšší průměrnou mez kluzu a nižší průměrnou mez pevnosti a tažnost. To je důkazem schopnosti vzduchových bublin narušovat soudržnost hliníkové slitiny a snižovat její mechanické vlastnosti.

Tento závěr se shoduje s dříve prokázaným měřením Lefnera, který zjistil, že vyšší porezita byla detekována právě na podélných řezech. Při porovnání celkové porezity (příčné i podélné řezy dohromady) obou sérií byla u HD patrná 2,5krát vyšší porezita. [2]

Bylo provedeno zhodnocení výskytu porezity pro příčný i podélný řez obou typů odlitků vlastním měřením, celkovým měřením i se zahrnutím dat z dřívějších závěrečných prací a průměrných hodnot zjištěné porezity. Pro predikci závislosti mezi příslušnou mechanickou vlastností byly hodnoty podrobeny testu linearity, jehož ukázka je v příloze práce. Pro některé soubory byly kritické hodnoty testu linearity r_p menší než testovací veličina korelace. Pro tyto soubory platí s 95 % spolehlivostí, že jsou mechanické veličiny lineárně závislé na porezitě. Pro zhodnocení závislosti všech typů, tj. i nelineárních závislostí byla jako vhodná zvolena regresní analýza, při jejímž provedení byl jako nejvhodnější pro grafickou závislost zvolen model s největším determinacním indexem R^2 .

Regresní analýza blíže vysvětluje variabilitu závislé veličiny na principu regresní funkce. Při zhodnocení více typů regresní závislosti byl porovnáván tzv. upravený determinacní index. Na základě výběru nejvyšší hodnoty byl lineární model přijat nebo vyměněn za jiný typ křivky. Z původních 8 přímk tak nakonec tvoří lineární závislost pouze naměřené průměrné hodnoty porezity u příčného řezu série HD v závislosti na mezi pevnosti R_m (tab. 2.15).

U většiny hodnocených souborů dat, byly závislosti vyhodnoceny jako nelineární.

Grafy závislosti porezity odlitků vykazují značné kolísání mechanických hodnot, které může být způsobeno nepřesným stanovením meze pevnosti R_m , smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ a tažnosti A . Anomálie růstu mechanických hodnot společně se zvětšující se porezitou může být zapříčiněna i výběrem místa měřené oblasti porezity.

Pro statisticky významné soubory dat platí následující shrnutí:

Rozbor závislosti meze pevnosti R_m , smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ a tažnosti A na porezitě P u odlitku s LSC (značení vzorků HDS):

$R_m - P$: funkce polynomu 4. stupně vykazovala nárůst a pokles u všech i samostatných hodnot vlastního měření.

$R_{p0,2} - P$: polynom 4. stupně pro podélný řez vykazoval mírný pokles smluvní meze kluzu do zhruba 1,8 % pro celková měření i vlastní měření (u podélného řezu).

$A - P$: mocninná funkce má vzrůstající tendenci.

Rozbor závislosti meze pevnosti R_m , smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ a tažnosti A na porezitě P u odlitku bez LSC (značení vzorků HD):

$R_m - P$: polynom 4. stupně klesal v grafu pro příčný i podélný řez v souboru všech měření. Stejná tendence byla zaznamenána u průměrných hodnot.

$R_{p0,2} - P$: polynom 3. stupně pro podélný řez klesal a poté naznačoval mírný nárůst smluvní meze kluzu až do max. 5 % výskytu vady, obdobně u příčného řezu, kde bylo max. 2,3 %.

$A - P$: závislost naměřených hodnot je nelineární a jako polynomická statisticky nevýznamná s 95 % spolehlivostí.

Proložíme-li ostatními statisticky nevýznamnými závislostmi všech souborů měření regresní přímkou (dle grafů testu linearity), zjistíme následující závěr:

Odlitky s LSC:

- se zvětšující se porezitou, která dosahuje maxima při 1,18 %, dochází k mírnému nárůstu hodnot R_m , A a k téměř konstantní závislosti $R_{p0,2}$ u příčného řezu.
- se zvětšující se porezitou, která dosahuje maxima při 1,82%, dochází k poklesu mechanických vlastností u podélného řezu.

Odlitky bez LSC:

- se zvětšující se porezitou, která dosahuje maxima při 2,35 %, dochází k poklesu hodnot R_m , k mírnému poklesu $R_{p0,2}$ a k téměř konstantní závislosti A u příčného řezu.
- se zvětšující se porezitou, která dosahuje maxima při 5 %, je téměř konstantní závislost pro $R_{p0,2}$. Mez pevnosti i tažnost u podélného řezu s větším výskytem vady klesají.

Konstantní i vzrůstající závislost nepotvrzuje teoretický předpoklad poklesu funkcí mechanické veličiny v závislosti na výskytu vady.

Celkový trend závislosti mechanických vlastností na porezitě:

Se zvětšující se porezitou dochází obecně u tlakově litých odlitků k poklesu mechanických vlastností.

Tato diplomová práce zjistila výsledek, který není v rozporu se zjištěním v práci Lefnera [2]. Lze souhlasit, že většina závislostí pro mez pevnosti, smluvní mez kluzu a tažnost na porezitě není lineární, jak uvádějí tab. 2.7, 2,15 a tabulka v příloze 7.

Výsledná analýza ovšem ve většině případů nepokládá na hladině významnosti 0,05 závislost proměnlivých hodnot porezity a ani průměrů těchto hodnot za statisticky významnou regresní závislost. Nelze tedy na základě naměřených ploch porezity v softwarech AnalySIS a Stream Motion konstatovat s určitostí polynomickou závislost na experimentálně naměřených mechanických hodnotách, přestože byly odlehle výsledky vyselektovány Grubbsovým testem jako hrubé chyby.

Model byl otestován jako celek, tj. zda příslušná kombinace všech nezávisle proměnných P statisticky významně zpřesní odhad závisle proměnné R_m , $R_{p0,2}$ nebo A oproti použití pouhého průměru této hodnoty.

Oblast horního dílu bloku motoru vykazuje určité snížení mechanických vlastností a u odlitku bez lokálního dotlaku je patrný nárůst pórovitosti až na 5 %. To však vyhovuje normám stanoveným Škoda Auto a. s. i pro horní hranici pórovitosti 5 %. Jedinou výjimkou bylo zjištění pórovitosti 7,2 % na podélném řezu vzorku HD7, jenž byl z funkčních závislostí vyřazen jako hrubá statistická chyba.

Simulace

U odlitku horního dílu motoru, litého tlakovým litím do kovové kokily, byly provedeny simulace výskytu porezity – staženin v několika místech. Výsledky simulace porezity byly srovnávány s výskytem porezity v těchto místech rozřezaného motoru. Numerická simulace vzorků typu HD bez LSC doložila výskyt porezity 7,2 %, což se shoduje s nalezenou hodnotou při měření. Vyšší hodnota nebyla měřením potvrzena. Průměrná porezita u odlitku HD byla zjištěna v hodnotě 1,69 %.

Pro vzorky typu HDS s lokálním dotlakem predikoval program max. 7,2 % a experimentálně byl zjištěn výskyt porezity max. 3,27 %. Průměrná naměřená hodnota této vady pak byla 0,74 %.

Bylo potvrzeno, že dotlak při squeeze castingu zmenšuje objem vzduchu v tavenině a tím zvyšuje kvalitu odlévaného výrobku. Vzhledem k úspoře finančních nákladů lze konstatovat, že výroba odlitků bez lokálního dotlaku globálně splňuje předepsanou hranici 5 % výskytu porezity.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KRAUTSCHNEIDER, R. *Využití experimentů a simulací při řešení napěťových poměrů u Al slitin*. Disertační práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2006. 155 s.
- [2] LEFNER, J. *Hodnocení mechanických a strukturních vlastností nového bloku*. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2009. 115 s.
- [3] BAŘINOVÁ, D. *Rozbor termofyzikálních parametrů ovlivňujících experimentální měření a simulaci u odlitků pro automobilový průmysl*. Disertační práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2006. 185 s.
- [4] TALANDA, I. *Studium hlavních faktorů, které ovlivňují jakost u technologických procesů*. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2010. 39 s.
- [5] ŠOLC, P. *Využití simulace pro predikci vad a hodnocení odlitků z Al slitin*. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2008. 60 s.
- [6] RAZSKA, M. *Využití simulace a experimentu pro řešení napěťových poměrů u slitin Al*. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2004. 110 s.
- [7] MIKYSKA, F. *Srovnání metod tlakového lití a squeeze*. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2003. 62 s.
- [8] TUČEK, J. *Závislost rychlosti průchodu ultrazvukových vln na technologii výroby a mechanických vlastnostech odlitku z litiny a slitiny hliníku*. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2003. 103 s.
- [9] ČSN EN 1706 *Hliník a slitiny hliníku – Odlitky – Chemické složení a mechanické vlastnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. 28 s.
- [10] ROUČKA, J. *Metalurgie neželezných slitin*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
- [11] PTÁČEK, L., aj. *Nauka o materiálu II*. 2. upr. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [12] MICHNA, S., aj. *Encyklopedie hliníku*. 1. vyd. Děčín: ALCAN, 2005. 699 s. ISBN 80-89041-88-4.
- [13] JIRKŮ, L. *Hodnocení porezity u tlakově litých odlitků z Al-slitiny*. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. Brno, 2007. 138 s.
- [14] NOGOWIZIN, B. *Druckgusslegierungen und ihre Eigenschaften*. Druckusspraxis. 2003, Nr. 4, s. 161–168.
- [15] Školící a vzdělávací příručka. Mladá Boleslav (CZ): Škoda Auto a.s.
- [16] RAGAN, E., aj. *Objemová hmotnost a pevnost v tahu tlakových odliatkov*. Slévárenství. Květen 2008, roč. LVI, č. 5-6, s. 267-269. ISSN 0037-6825.

- [17] RAGAN, E. *Príspevok k závislosti pevnosti odliatku na dotlaku pri tlakovom liatí*. Slévárenství, 1979, č. 8.
- [18] SCHINDELBACHER, G. *Einfluss unterschiedlicher Porosität auf die mechanischen Eigenschaften der Legierung GD- $AlSi9Cu3$* . Gießerei-Praxis. 1993, N. 19, s. 381-392.
- [19] ŘÍHOVÁ, M. *Hodnocení porezity u odlitků gravitačně litych z Al slitin*. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2008. 64 s., 3 přílohy.
- [20] MALIK, J., aj. *Vplyv technologických faktorov tlakového liatia na kvalitu odliatkov zo silumínu*. Slévárenství. Květen 2007, roč. LV, č. 5-6, s. 259-162. ISSN 0037-6825.
- [21] RUŽBARSKÝ, J. *Vplyv technologických parametrov tlakového liatia na štruktúru odliatkov*. Slévárenství. Březen 2009, roč. LVII, č. 3-4, s. 80-82. ISSN 0037-6825.
- [22] LEIS, W. *Giessen im CCT*. Symposium 2003, Aalen
- [23] VILČKO, J., aj. *Liatie s tuhnutím pod tlakom odliatkov zo slitin typu Al-Si*. Úvod do problematiky technologie výroby vysokokvalitných odliatkov. Slévárenství. 1990, č. 12, s. 499–503.
- [24] FAURA, F., et al. *On the optimum plunger acceleration law in the slow shot phase of pressure die casting machines*. International journal of machine tools & manufactures. 2001, N. 41, s. 173–191.
- [25] LIPOVÝ, R. *Výroba odlitků pro automobilový průmysl ze slitin Al pomocí Squeeze-casting*. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2002.
- [26] POŽÁR, J. *Moderní metody výroby součástek metodami lití s krystalizací pod tlakem a tvářením v polotuhém stavu*. Slévárenská ročenka. 2000, 167 s.
- [27] MONROE, R. *Porosity in Castings*. In *AFS Transactions*. USA: [s.n.], 2005. s. 519-546.
- [28] BOLIBRUCHOVÁ, D., aj. *Chyby hliníkových odliatkov odlevaných metodou vysokotlakového odlievania*. Slévárenství. Září 2008, roč. LVI, č. 9-10, s. 422-426. ISSN 0037-6825.
- [29] STUCKY, M. *Aluminium casting quality main factors and means of control*. CTIF, Fonderie Fondateur d'aujourd'hui. août septembre 2005, N°247, s. 28-44
- [30] MATTHEW, O., et. al. *The influence of certain elements on porosity formation in an $AlSi9Cu3$ casting alloy*. Giessereiforschung 53. 2001, N. 1, s. 1-14
- [31] STROPPE, H. *Einfluss der Porosität auf die mechanischen Eigenschaften von Gußlegierungen*. Giessereiforschung 52. 2000, N. 2, s. 58-60.
- [32] KOVAŘÍK, J. *PAM - CAST/Simulor – zkušenosti se simulací slévárenských procesů*. Slévárenství. 1997, č. 8-9, s. 346-348. ISSN 0037-6825.
- [33] AXIOM TECH [online]. [cit. 2008-02-11]. Magmasoft. Dostupné z www: <<http://www.axiomtech.cz/magma.htm>>.

- [34] TODTE, M. *Prognose der mechanischen Eigenschaften von Aluminium – Gussteilen durch numerische Simulation des Erstarrungsprozesses*. Giesserei – Praxis. 6/2003, s. 263–269.
- [35] AXIOM TECH [online]. 2011 [cit. 2011-05-31]. MAGMA-5 - rychlý, spolehlivý a intuitivní nástroj pro optimalizaci slévárenské výroby. Dostupné z [www: <http://www.axiomtech.cz/article/68455.magma-5-8211-rychly-spolehlivy-a-intuitivni-nastroj-pro-optimalizaci-slevarenske-vyroby/>](http://www.axiomtech.cz/article/68455.magma-5-8211-rychly-spolehlivy-a-intuitivni-nastroj-pro-optimalizaci-slevarenske-vyroby/).
- [36] MAGMASoft, User's manual, Aachen, Německo, 1998.
- [37] VRÁBEL, P. *Vývojové směry ve slévárenství*. Slévárenství. 2004, LII, č.10, s. 411-413. ISSN 0037-6825.
- [38] KRISTOŇ, F., aj. *Informační technologie představené na veletrhu GIFA*. Slévárenství. 2003, LI, č.8-9, s. 356-361. ISSN 0037-6825.
- [39] Simtec – Software: Finite element Metod (FEM) and Finite Different Metod (FDM) [online]. 2007 [cit. 2011-02-31]. Dostupné z [www: <http://www.simtec-inc.com/fem_vs_fdm.htm>](http://www.simtec-inc.com/fem_vs_fdm.htm).
- [40] WALKINGTON, W., G. *Die Casting Defects*. Illinois: North American Die Casting Association, 1997. 161 s.
- [41] HAVLÍČEK, P. *Využití simulačních software pro predikci vad a hodnocení vlastností u gravitačně a tlakově litých odlitků z Al slitin*. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2007. 86 s.
- [42] BERGEROVÁ, K. *Hodnocení porezity u tlakově litých odlitků ze slitin Al*. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2005. 126 s., 33 s. příloh.
- [43] SLABÝ, aj. *Základní informace o průběhu výroby-blok válců 03D, tok materiálu a jeho zpracování*. Mladá Boleslav: Škoda Auto a. s. 2005, 17 s., 2 s. příloh.
- [44] ČECH, J., aj. *Hodnocení vlivu technologických a metalurgických faktorů na pórovitost tlakově litých odlitků*. Slévárenství. Květen 2010, roč. LVIII, č. 5-6, s. 159-165. ISSN 0037-6825.
- [45] WEND, H., et al. *Metody pro zkoušení porézности u odlitků – posouzení různých metod*. Giesserei 89. 2002, s. 46-47.
- [46] PTÁČEK, L., aj. *Nauka o materiálu I*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 503 s. ISBN 80-7204-193-2.
- [47] HASIL, J. *Hodnocení porezity u odlitků gravitačně litých z Al slitin*. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2007. 100 s.
- [48] HAVLÍČKOVÁ, J. *Využití simulace pro predikci vad a hodnocení vlastností u tlakově litých odlitků z Al slitin*. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2011. 94 s.
- [49] ČECH, J., aj. *Predikce pórovitosti a mikrostruktury u tlakově litého odlitku z Al slitiny pomocí simulace a experimentu*. Slévárenství. Březen 2010, roč. LVIII, č. 3-4, s. 83-89. ISSN 0037-6825.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
A	[%]	tažnost
c	[kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita
EA 111 03D/1,2		typové označení bloku motoru
CAD		počítačový konstrukční program
HDS		horní díl odlitku motoru lité s LSC
HD		horní díl odlitku bloku motoru
FEM		metoda konečných prvků
FDM		metoda konečných diferencí
LSC		lokální dotlak při tuhnutí
K		konstanta
p	[MPa]	tlak
P	[%]	porezita
p _{atm}	[MPa]	atmosférický tlak
p _{met}	[MPa]	metalostatický tlak
p _σ	[MPa]	tlak vyvolaný povrchovým napětím
P1 – P5		porovnávací řada porezity
r	[m]	poloměr bubliny
ROI		oblast měření porezity obrazovou analýzou
R _m	[MPa]	mez pevnosti
R _{p0,2}	[MPa]	smluvní mez kluzu
S	[m ²]	plocha
t _f	[s]	doba tuhnutí
t _S	[°C]	teplota solidu
t _L	[°C]	teplota likvidu
t _v	[°C]	teplota varu
T	[°C]	teplota
v	[m·s ⁻¹]	rychlost vstřikování taveniny
Z	[%]	kontrakce (zúžení)
α ₂₀	[K ⁻¹]	součinitel tepelné roztažnosti
ρ ₂₀	[kg·m ⁻³]	měrná hmotnost ρ ₂₀ při 20°C
λ ₂₀	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	tepelná vodivost při 20°C
X		Poissonova konstanta (adiabatický exponent plynu)
σ	[MPa]	povrchové napětí na rozhraní zárodek – tavenina

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Chemické složení taveb – jednotlivé vzorky
 Příloha 2 Příklad statistického vyhodnocení
 Příloha 3 Příklad statistického vyhodnocení – Grubbsův test
 Příloha 4 Příklad statistického vyhodnocení – Kolmogorovův test
 Příloha 5 Příklad statistického vyhodnocení – Test linearity
 Příloha 6 Příklad statistického vyhodnocení – Test regrese
 Příloha 7 Přehled statistické významnosti regresních křivek
 Příloha 8 CD s výpisem statistického testování

Příloha 1 [2]

Označení vzorku	Chemické složení v hmotnostních %											
	Al	Si	Cu	Mg	Mn	Fe	Zn	Ni	Sn	Cr	Ti	Pb
HD6 - HD13	dopočet do 100%	9,27	2,68	0,43	0,21	0,73	1,00	0,05	0,03	0,02	0,04	0,09
HDS1	dtto	9,70	2,50	0,46	0,19	0,74	0,85	0,05	0,02	0,02	0,03	0,07
HDS3	dtto	9,35	2,39	0,40	0,23	0,71	0,85	0,05	0,02	0,04	0,03	0,09
HDS6	dtto	9,35	2,39	0,40	0,23	0,71	0,85	0,05	0,02	0,04	0,03	0,09
HDS10	dtto	9,22	2,65	0,32	0,22	0,72	0,75	0,08	0,02	0,02	0,04	0,08
HDS11	dtto	9,23	2,40	0,46	0,20	0,79	0,89	0,05	0,01	0,02	0,03	0,07
HDS12	dtto	9,10	2,32	0,38	0,25	0,75	0,89	0,04	0,02	0,04	0,04	0,08

Příloha 2

Vstupní úprava dat souborů průměrných hodnot R_m a poretity podélného řezu (Ppo) všech měření série HDS

Program Mathcad

Testování provedeno s 95% spolehlivostí.

$$R_m := \begin{pmatrix} 239 \\ 248 \\ 215 \\ 235 \\ 260 \\ 247 \end{pmatrix} \quad Ppo := \begin{pmatrix} 1.05 \\ 0.77 \\ 0.91 \\ 1.47 \\ 0.66 \\ 0.69 \end{pmatrix}$$

Setřídění souborů

$R_m := \text{sort}(R_m)$

$Ppo := \text{sort}(Ppo)$

Aritmetické průměry souborů:

$x1 := \text{mean}(R_m)$

$x5 := \text{mean}(Ppo)$

$x1 = 240.667$

$x5 = 0.925$

Směrodatné odchyly souborů:

$s1 := \text{stdev}(R_m)$

$s5 := \text{stdev}(Ppo)$

$s1 = 13.912$

$s5 = 0.278$

Rozptyly souborů:

$r1 := \text{var}(R_m)$

$r5 := \text{var}(Ppo)$

Počet prvků v souboru naměřených hodnot:

$n1 := 6$

$n5 := 6$

Příloha 3

Test na hrubé chyby – Grubbsův test

Program Mathcad

Test hrubé chyby veličiny - mez pevnosti - R_m :

$$T1_{R_m} := \frac{x1 - R_{m0}}{s1} \quad T1_{R_m} = 1.845$$

$$T2_{R_m} := \frac{|R_{m5} - x1|}{s1} \quad T2_{R_m} = 1.39$$

T_p pro 6 hodnot: $T_p=1.996$

Dle tabulek je kritická hodnota Grubbsova testu T_p větší než hodnota testovací veličiny. Proto s 95% spolehlivostí nezamítáme nulovou hypotézu. V tomto souboru se nevyskytují žádné hrubé chyby měření.

Test hrubé chyby veličiny – celková průměrná pomezita podélného řezu – P_{po} :

$$T1_{P_{po}} := \frac{x5 - P_{po0}}{s5} \quad T1_{P_{po}} = 0.955$$

$$T2_{P_{po}} := \frac{|P_{po5} - x5|}{s5} \quad T2_{P_{po}} = 1.963$$

T_p pro 6 hodnot: $T_p=1.996$

Dle tabulek je kritická hodnota Grubbsova testu T_p větší než hodnota testovací veličiny. Proto s 95% spolehlivostí nezamítáme nulovou hypotézu. V tomto souboru se nevyskytují žádné hrubé chyby měření.

Příloha 4

Test na normální rozdělení – Kolmogorovův test

Program Mathcad

Kolmogorovův test veličiny - mez pevnosti - R_m :

$$i := 0..n1 - 1$$

$$\text{kolm1}_i := \left| \text{pnorm}(R_{m_i}, x1, s1) - \frac{i+1}{n1} \right| \quad \text{kolm2}_i := \left| \text{pnorm}(R_{m_i}, x1, s1) - \frac{i}{n1} \right|$$

$$D := \max(\text{stack}(\text{kolm1}, \text{kolm2}))$$

$$D = 0.176$$

$$D_p := 0.519$$

Dle tabulek kritická hodnota pro Kolmogorovův test D_p je větší než testovací veličina D . Proto s 95% můžeme konstatovat, že měřený soubor R_m má normální rozdělení.

Kolmogorovův test veličiny - celková průměrná pomezita podélného řezu –

Ppo:

$$i := 0..n5 - 1$$

$$\text{kolm1}_i := \left| \text{pnorm}(P_{po_i}, x5, s5) - \frac{i+1}{n5} \right| \quad \text{kolm2}_i := \left| \text{pnorm}(P_{po_i}, x5, s5) - \frac{i}{n5} \right|$$

$$D := \max(\text{stack}(\text{kolm1}, \text{kolm2}))$$

$$D = 0.212$$

$$D_{pR} := 0.519$$

Dle tabulek kritická hodnota pro Kolmogorovův test D_p je větší než testovací veličina D . Proto s 95% můžeme konstatovat, že měřený soubor P_{po} má normální rozdělení.

Příloha 5

Test na nulovou hodnotu koeficientu korelace – Test linearity

Program Mathcad

Test na nulovou hodnotu koeficientu korelace veličin R_m a pomezity podélného řezu (P_{po}) všech měření série HDS

$$\text{corr}(R_{m1}, P_{po1}) = -0.46$$

$$r_{PRm1} := 0.81$$

$$P_{po1} := \begin{pmatrix} 1.05 \\ 0.77 \\ 0.91 \\ 1.47 \\ 0.66 \\ 0.69 \end{pmatrix}$$

Kritická hodnota testu na nulovou hodnotu koeficientu korelace obou souborů r_p je větší než testovací veličina určená pomocí funkce corr . Proto s 95% spolehlivostí zamítáme nulovou hypotézu, soubory veličin R_m a P_{po} nemají lineární závislost.

Příloha 6

Test statistické významnosti modelu – Test regrese

Hladina spolehlivosti 95%

MS Excel – Nástroje – Analýza dat - Regrese

Test statistické významnosti regresního modelu křivky meze pevnosti R_m a průměrných hodnot celkového měření podélného řezu HDS:

Výsledek regresní analýzy	Rm - Ppo		POLYNOM ^4		
Regresní statistika					
Násobné R	0,941				
Hodnota spolehlivosti R	0,886	<i>determinační index</i>			
Nastavená hodnota spolehlivosti R	0,431	<i>opravený determinační index</i>			
Chyba stř. hodnoty	11,494				
Pozorování	6,000				
ANOVA					<i>p-hodnota</i>
	Rozdíl	SS	MS	F	Významnost F
Regrese	4	1029,218	257,305	1,948	0,487

P-hodnota = 0,487 > $\alpha = 0,05$, takže model není statisticky významný a nelze jej pro daná data použít.

Podle hodnoty významnosti F (p - hodnota) je polynom 4. stupně nevhodným modelem.

Test statistické významnosti regresního modelu křivky meze pevnosti R_m a průměrných hodnot celkového měření podélného řezu HDS:

Snížení stupně polynomu:

Výsledek regresní analýzy	Rm - Ppo		POLYNOM ^2		
Regresní statistika					
Násobné R	0,741				
Hodnota spolehlivosti R	0,549	<i>determinační index</i>			
Nastavená hodnota spolehlivosti R	0,248	<i>opravený determinační index</i>			
Chyba stř. hodnoty	13,216				
Pozorování	6,000				
ANOVA					<i>p-hodnota</i>
	Rozdíl	SS	MS	F	Významnost F
Regrese	2	637,333	318,666	1,824	0,303

Podle hodnoty významnosti F (p - hodnota) je také polynom 2. stupně nevhodným modelem.

Test statistické významnosti regresního modelu křivky smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ a průměrných hodnot celkového měření příčného řezu HD:

Výsledek regresní analýzy	$R_{p0,2}$ - Ppr	POLYNOM ^4			
Regresní statistika					
Násobné R	0,992				
Hodnota spolehlivosti R	0,984	<i>determinační index</i>			
Nastavená hodnota spolehlivosti R	0,953	<i>opravený determinační index</i>			
Chyba stř. hodnoty	2,535				
Pozorování	7,000				
ANOVA					
					<i>p-hodnota</i>
	Rozdíl	SS	MS	F	Významnost F
Regrese	4	816,000	204,000	31,733	0,031

P-hodnota = 0,031 < $\alpha = 0,05$, takže model je statisticky významný a lze jej pro daná data použít.

Podle hodnoty významnosti F (p - hodnota) je polynom 4. stupně vhodným modelem.

Podle determinačního indexu i chyby střední hodnoty je pro tento soubor dat polynom 4. stupně nejvhodnějším modelem.

Příloha 7

Přehled statistické významnosti regresních křivek

Test statistické významnosti souboru - Regresní analýza (F test)								
Soubor měření	Typ řezu	Mechanická veličina	Typ regresní křivky	Determinační index R ²	Vhodnost modelu [%]	P hodnota	Statistická významnost	Test linearity
Vlastní hodnoty	příčný	HDS - Rp0,2	polynom 4. st.	0,157	16%	0,351	NE	
		HDS - Rm	polynom 4. st.	0,397	40%	0,011	ANO	lineární
		HDS - A	mocninný	0,291	29%	0,002	ANO	
		HD - Rp0,2	polynom 4. st.	0,336	34%	0,019	ANO	
		HD - Rm	polynom 4. st.	0,461	46%	0,001	ANO	lineární
		HD - A	polynom 2. st.	0,105	10%	0,191	NE	
	podélný	HDS - Rp0,2	polynom 3. st.	0,438	44%	0,004	ANO	lineární
		HDS - Rm	polynom 2. st.	0,196	20%	0,073	NE	
		HDS - A	polynom 2. st.	0,140	14%	0,163	NE	
		HD - Rp0,2	polynom 4. st.	0,327	33%	0,018	ANO	
		HD - Rm	polynom 4. st.	0,223	22%	0,109	NE	
		HD - A	polynom 4. st.	0,268	27%	0,053	NE	
Všechny hodnoty	příčný	HDS - Rp0,2	polynom 4. st.	0,143	14%	0,168	NE	
		HDS - Rm	polynom 4. st.	0,249	25%	0,017	ANO	
		HDS - A	polynom 4. st.	0,177	18%	0,085	NE	
		HD - Rp0,2	polynom 2. st.	0,202	20%	0,004	ANO	lineární
		HD - Rm	polynom 2. st.	0,419	42%	0,000	ANO	lineární
		HD - A	polynom 2. st.	0,063	6%	0,211	NE	
	podélný	HDS - Rp0,2	polynom 4. st.	0,353	35%	0,009	ANO	lineární
		HDS - Rm	polynom 2. st.	0,113	11%	0,146	NE	
		HDS - A	polynom 2. st.	0,095	9%	0,204	NE	
		HD - Rp0,2	polynom 3. st.	0,264	26%	0,007	ANO	
		HD - Rm	polynom 4. st.	0,284	28%	0,011	ANO	
		HD - A	polynom 3. st.	0,131	13%	0,136	NE	

Pokračování

Test statistické významnosti souboru - Regresní analýza (F test)									
Soubor měření	Typ řezu	Mechanická veličina	Typ regresní křivky	Determinační index R ²	Vhodnost modelu [%]	P hodnota	Statistická významnost	Test linearity	
Průměr vlastních hodnot	příčný	HDS - Rp0,2	polynom 4. st.	0,935	94%	0,374	NE		
		HDS - Rm	polynom 4. st.	0,841	84%	0,567	NE		
		HDS - A	polynom 4. st.	0,651	65%	0,783	NE		
		HD - Rp0,2	polynom 2. st.	0,499	50%	0,251	NE		
		HD - Rm	lineární	0,849	85%	0,003	ANO	lineární	
		HD - A	polynom 3. st.	0,330	33%	0,712	NE		
	podélný	HDS - Rp0,2	polynom 4. st.	0,915	91%	0,425	NE		
		HDS - Rm	polynom 4. st.	0,928	93%	0,393	NE		
		HDS - A	polynom 4. st.	0,709	71%	0,730	NE		
		HD - Rp0,2	polynom 4. st.	0,506	51%	0,744	NE		
		HD - Rm	polynom 4. st.	0,813	81%	0,339	NE		
		HD - A	polynom 3. st.	0,603	60%	0,369	NE		
	Průměr všech hodnot	příčný	HDS - Rp0,2	polynom 3. st.	0,628	63%	0,502	NE	
			HDS - Rm	polynom 3. st.	0,745	74%	0,358	NE	
HDS - A			polynom 3. st.	0,626	63%	0,505	NE		
HD - Rp0,2			polynom 4. st.	0,984	98%	0,031	ANO		
HD - Rm			lineární	0,903	90%	0,001	ANO	lineární	
HD - A			polynom 4. st.	0,366	37%	0,866	NE		
podélný		HDS - Rp0,2	polynom 3. st.	0,730	73%	0,377	NE		
		HDS - Rm	polynom 4. st.	0,886	89%	0,487	NE		
		HDS - A	polynom 4. st.	0,748	75%	0,690	NE		
		HD - Rp0,2	polynom 4. st.	0,640	64%	0,590	NE		
		HD - Rm	polynom 4. st.	0,896	90%	0,198	NE		
		HD - A	polynom 3. st.	0,535	53%	0,456	NE		