

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# HODNOCENÍ POREZITY U ODLITKŮ TLAKOVĚ LITÝCH Z AL SLITIN EVALUTION OF POROSITY IN AL-ALLOY DIE-CASTINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

PETRA KLOCOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE SUPERVISOR prof. Ing. JAROSLAV ČECH, CSc.

**BRNO 2008** 

FSI	VI	JT

#### DIPLOMOVÁ PRÁCE

# ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je hodnocení porezity u tlakově litých odlitků, případně míst s lokálním dotlačováním v návaznosti na mechanické a strukturní vlastnosti. Vzorky ze slitiny AlSi9Cu3 byly odebrány z bloku motoru vyrobeného v podniku Škoda Auto, Mladá Boleslav. K vyhodnocení a porovnání výsledků byly použity data z předchozích diplomových prací studentů Vysokého učení technického v Brně.

## Klíčová slova

Tlakové lití, lokální dotlačování, AlSi9Cu3, obrazová analýza, porezita, DAS, ovalita pórů, statistická analýza

# ABSTRACT

The objective of this diploma thesis is an evaluation of die-castings porosity, eventually the evaluation of seats with local squeeze in connection with their mechanical and structural properties. The swatches of alloy AlSi9Cu3 were taken from the engine block made by Škoda Auto Company, Mladá Boleslav. To the evaluation and the comparison of the results there were the other VUT FSI Brno students' theses used.

## Key words

Die casting, local squeeze, AlSi9Cu3, image analysis, porosity, DAS, shape factor, statistical analysis

# **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KLOCOVÁ, Petra. *Hodnocení porezity u odlitků tlakově litých z Al slitin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 66s., příloh. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jaroslav Čech, CSc.

FSI VUT	DIPLOMOVÁ PRÁCE	List 5
	f	
PROHLASEN	I	
Prohlašuji, že jse tlakově litých z Al a pramenů, uvede	m diplomovou práci na téma Hodnocení slitin vypracovala samostatně s použitím ných na seznamu, který tvoří přílohu této	í porezity u odlitků odborné literatury práce.
V Brně 30. Května	2008	
	Petra Klocová	

FSI VUT	DIPLOMOVÁ PRÁCE	List 6
BODĚKOVAN	í	
FUDERUVAN		
Děkuji tímto svém	u vedoucímu diplomové práce prof. Ing. řipomínky a rady při vypracování diplo	Jaroslavu Čechovi,
také paní Aleně M	álkové, Ing. Martinu Julišovi a Ing. Simor	ně Pospíšilové.

		1
FSI VUT	DIPLOMOVÁ PRÁCE	List 7
OBSAH		
ABSTRAKT		4
BIBLIOGRAFICKÁ CITA	ACE	4
PROHLÁŠENÍ		5
PODĚKOVANÍ		6
1. ÚVOD		
2. CÍLE DIPLOMOV	É PRÁCE	11
3. TEORETICKÁ ČÁ	ST	
3.1 Stanovení lokáln	ní doby tuhnutí	
3.1.1 Specifika krys	talizace kovů při zvýšeném tlaku [3]	
3.1.2 Vliv tlaku na l	krystalizaci	
3.2 Rozbor porezity	,	
3.2.1 Rozdělení do t	tříd pórovitosti a jejich vlastnosti	
3.2.2 Vliv morfologi	ie pórů na pevnost v tahu [10]	
3.2.3 Vliv morfologi	ie pórů na mez průtažnosti	21
3.2.4 Vliv porezity n	a mechanické vlastnosti [8]	
3.2.5 Stanovení me	ze únavy v závislosti na porezitě (parametru pórů)	24
3.2.6 Výsledky zkou	šky střídavého zatěžování tah-tlak	
3.3 DAS (dendrite ar	rm spacing)	
3.3.1 Vliv DAS na m	nechanické vlastnosti [12]	
3.3.2 Popis struktu	ry a vypočtu závislosti DAS	
3.3.3 Shrnutí [12]		

FSI VUT	DIPLOMOVÁ PRÁCE	List 8
4. EXPERIMENTÁLI	NÍ ČÁST	
4.1 Chemické složení	í a mechanické vlastnosti AlSi9Cu3 [13]	
4.1.1 Popis odlitku	motoru a vzorků pro vyhodnocení	
4.1.2 Značení a zho	tovení vzorků	
4.1.3 Získání mecho	anických vlastností a výběr vzorků	
4.1.4 Příprava vybr	aných vzorků	
4.2 Způsob měření p	oorezity	
4.2.1 Příprava vzork	κů	
4.2.2 Princip a průb	ěh měření	
4.2.3 Výpočet porez	ity	
4.3 Zjišťování paramo	etru kulatosti pórů	
4.3.1 Příprava a výl	běr vzorků	
4.3.2 Princip a průb	ěh měření	
4.4 Vliv porezity na i	ndex jakostí [8]	
4.5 Měření vzdáleno	sti DAS	
4. 5.1 Princip a prů	běh měření	
4.5.2 Naměřené ho	odnoty	51
4.6 Stanovení trendů	vybraných závislostí	
4.7 Statistické prově	ření všech výsledků	53
4.8 Grafické porovná	ní dílčích naměřených hodnot	54
4.8.1 Závislost mec	hanických vlastností na porezitě	
4.8.1.1 Mechanicl	ké vlastnosti v závislosti na porezity s LSC	54
4.8.1.2 Mechanicl dotlačová	ké vlastnosti v závislosti na porózitu u tlakově litý ní (bez LSC)	ch bloků bez lokálního 54
4.8.2 Závislost mec	hanických vlastností na DAS (dendrite arm spac	cing)55
4.8.3 Závislost mec	hanických vlastností na ovalitě "s" (parametru kul	atosti póru)55
4.9 Celkové grafické v	yhodnocení	55

FSI VUT	DIPLOMOVÁ PRÁCE	List 9
4.9.1 Popis grafu zá	vislosti mechanických vlastností na porezitě	
4.9.2 Popis grafu zá	vislosti mechanických vlastností na DAS	
4.9.3 Popis grafu zá	vislosti mechanických vlastností na ovalitě	
5. Závěr		63
Seznam použitých zd	rojů	65
Seznam příloh		67

# 1. ÚVOD

Pro konstrukci např. bloků motorů (ŠKODA Fabia) je nutná přesná znalost pevnostních, strukturních a napěťových poměrů v celém průřezu odlitku. U geometricky komplikovaných odlitků (např. bloky motorů), vzhledem k rozdílným podmínkám ochlazování a tuhnutí taveniny dochází k tomu, že mechanické, strukturní i napěťové poměry se místně mění. Nemůžeme vycházet z toho, že vlastnosti jsou konstantní napříč celým průřezem stěny odlitku. Vzhledem k tomu, že konstruktéři nemají a neznají prognózy mechanických a napěťových vlastností v jednotlivých stěnách (průřezech stěn). Musí vycházet při výpočtu pevnosti z homogenního rozdělení vlastností napříč odlitkem. Napětí, které vyplývají z vlastního výrobního procesu (např. obrábění, tepelné zpracování) se nezahrnují do výpočtu pevností. Vychází se ze stavu bez napětí, a proto konstruktéři musí pracovat s bezpečnostními faktory a koeficienty. [1]

U hliníkových slitin určených pro odlitky (Rm, Rp0,2,A) s předepsanými mechanickými vlastnostmi byly vypracovány některé kriteriální funkce závislosti mechanických a strukturních vlastností na základě empirických závislostí. Jsou k tomu potřeba velké materiálové a časové náklady. Platnost je omezena fyzikálními podmínkami, metodou lití a danou slitinou.

Mechanické vlastnosti určitého odlitku (Rm, Rp0,2,A,HB apod.) závisí signifikantně na jeho strukturních vlastnostech (velikost zrna, vzdálenost sekundárních větví dendritů (DAS), eutektické fáze, porezita apod.). Tyto vlastnosti závisí také na chemickém složení, metalurgickém zpracování taveniny (zjemnění zrna, zušlechtění), parametry procesu lití a tuhnutí, dodatečnými úpravami (tepelné zpracování).

Výpočet vzdálenosti sekundárních větví dendritů (DAS) z teplotních polí poskytují v současné době skoro všechny simulační programy. Potíže přináší najít v literatuře nebo v databankách pro danou slitinu specifické (spolehlivé) koeficienty. Přesto se zkouší předvídat z DAS mechanických vlastností (Rm, Rp0,2). Tyto výsledky jsou však pouze kvalitativním odhadem s poměrně značným faktorem nejistoty. [2]

U slitin Al-Si se struktura utváří prostřednictvím primárního dendritického růstu na Al bohaté α- fáze, jehož prostřednictvím interdendritických eutektik. Sekundární odstup dendritických ramen, forma vytváření a rozdělení tvrdých eutektických částic Si, případně intermetalických fází, jsou podstatnými strukturálními příznaky, které působí na pevnostní vlastnosti po ztuhnutí slitiny.[3]

# 2. CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této diplomové práce je především navázání na předešlé diplomové práce studentů FSI VUT v Brně a zpracované hodnoty zjišťované na vzorcích odlitku bloku motoru z podniku Škoda Auto, Mladá Boleslav porovnat v důsledku odlišného místa odběru. Veškeré vzorky byly odlity tlakově ze slitiny AlSi9Cu3. Použité hodnoty k porovnání jsou:

- vliv porezity na mechanické vlastnosti (Rp<sub>0,2</sub>, Rm, A)
- o vliv parametru kulatosti bublin na mechanické vlastnosti
- vliv vzdálenosti sekundárních větví dendritu (DAS) na mechanické vlastnosti

Pro hodnocení těchto veličin bude využito metalografických struktur, programu MathCad pro statistickou analýzu, programu Olympus Five pro obrazovou analýzu a programu Excel pro zpracování a porovnání dílčích výsledků.

Počet měření a zkušebních vzorků v experimentální části bude vhodný pouze pro dílčí výsledky. Pro podrobnější zkoumání této problematiky by bylo zapotřebí větší množství zkoumaných vzorků, aby bylo dosaženo vyšší statistické věrohodnosti výsledků.



dobou tuhnutí přibývá DAS, délka eutektických eventuelně intermetalických částic, objem pórů. Doba tuhnutí se ukazuje jako parametr pro kvalitu struktury odlitků, přes kterou se může při simulaci provést prognóza mechanických vlastností, pokud jsou známy. Korelace mezi těmito parametry a parametry struktury, popisuje ji rovnice [1].

$$t_s = \frac{T_{L-}T_s}{\vartheta_0} = \frac{\Delta T}{\vartheta_0} [s]$$
(3.1)

t<sub>s</sub> – lokální doba tuhnutí [s]

T<sub>L</sub> – teplota likvidu [K]

T<sub>S</sub> – teplota solidu [K]

 $\vartheta_0$  - rychlost ochlazování [K/s]

FSI	Vι	JT
	~ ~	

Tvorba vad u (Al-Si) slitin závisí na specifických fyzikálně – metalurgických vlastnostech kovů a slitin, charakteru použité technologie. Fyzikálně – metalurgické parametry slitin (krystalická stavba, alotropie, teplota likvidu a solidu, měrná tepelná kapacita, tepelná vodivost, měrná hmotnost apod.) jsou pevně dány.

U odlitků z Al slitin se velmi často využívá lokální dotlak (squeeze casting). Jeho vysoká hodnota na jedné straně snižuje životnost forem a zvětšuje prostoje tlakových strojů, na druhé straně zvyšuje dolití odlitků, zmenšuje objem vzduchu, který je ve ztuhlých odlitcích uzavřen (porezita) a tím zvyšuje jejich kvalitu (pevnost, těsnost apod.)

## 3.1.1 Specifika krystalizace kovů při zvýšeném tlaku [3]

Při tlakovém lití má na kritickou velikost krystalizačního zárodku vliv jak podchlazení taveniny způsobené vysokou akumulační schopností kovové formy, tak i atermické podchlazení, tj. podchlazení způsobené zvýšeným tlakem působícím na krystalizující taveninu.

Zvýšený tlak příznivě působní na vznik malého krystalizačního zárodku o kritické velikosti  $r_{KR}$  a tím i na vznik jemnozrnné krystalické struktury, viz obr. 2. Z obrázku je zřejmé, že čím větší tlak působí na krystalizující taveninu, tím menší je kritická hodnota velikosti zárodku. [2]



FSI VUT DIPLOMOVÁ PRÁCE	List 14
-------------------------	---------

Vliv tlaku na teplotu krystalizace kovů a jejich slitin (na teplotu likvidu a solidu) vyjadřuje Clausiusova- Clampeyronova rovnice [4]

$$\frac{dT}{dp} = \frac{T(V_L - V_S)}{\Delta H_{LS}^0} \tag{3.2}$$

kde značí:

 $\Delta H_{L,S}^0$  - změnu entalpie při krystalizaci [J.mol<sup>-1</sup>];

 $(V_L - V_S)$  - rozdíl molových objemů v kapalném a tuhém stavu [m<sup>3</sup>.mol<sup>-1</sup>];

T - teplotu [K];

dT/dp - diferenciální koeficient udávající změnu teploty krystalizace v závislosti na tlaku.

Tato rovnice popisuje zvýšení teploty krystalizace odlévané slitiny účinkem tlaku jako důsledek zmenšení měrného objemu. Pro většinu kovů se rostoucím tlakem působícím na taveninu zvyšuje teplota likvidu i solidu odlévaného materiálu (VL>V<sub>s</sub> => dT/dp > 0). [4]

## 3.1.2 Vliv tlaku na krystalizaci

Na obrázku 3. je uvedeno schéma působení tlaku na krystalizující slitinu o teplotě likvidu ( $T_L$ ) a solidu ( $T_S$ ). V důsledku působení tlaku dochází k posuvu rovnovážných teplot likvidu  $T_L$  a solidu  $T_S$  do oblasti vyšších teplot ( $T_L = f(p)$  a  $T_S = f(p)$ ).

Na schématu jsou 3 oddělené oblasti:

oblast 1 -stabilního tekutého stavu;

oblast 2 - metastabilního tekutého stavu;

oblast 3 - metastabilního tuhého stavu.

Za předpokladu, že tavenina má teplotu T, lze ze schématu vyčíst podmínky vzniku atermického podchlazení taveniny vlivem jejího teplotně-tlakového stavu.[4]



Obr. 3 Vliv teplotně - tlakového stavu na vznik atermického podchlazení taveniny při tlakovém lití [4]

Při tlaku p° (atmosférický tlak) je teplota likvidu  $T_L^\circ$ , teplota solidu  $T_s^\circ$  a podchlazení  $\Delta T^0$ , tyto podmínky přísluší oblasti 1, ve které se může proces krystalizace taveniny uskutečnit jen v důsledku intenzivního podchlazení. Jak je typické pro gravitační lití do kovových forem.

Je-li tlak na taveninu vyšší než p<sub>0</sub>, např. p<sub>1</sub> je teplota T nad křivkou likvidu. Rozdíl teplot likvidu a solidu při tlaku p<sub>1</sub> je  $\Delta T_I^q$ . Hodnota podchlazení  $\Delta T_I^q$  se v tomto případe shoduje s teplotou ohlazení  $\Delta T^0$  bez působení tlaku. Při tlaku p<sub>2</sub> jsou takové podmínky, že teplota T je v oblasti 2 (v metastabilním stavu taveniny), průsečík teploty T a tlaku p<sub>2</sub> je označen II. Pak od teploty T (resp. bodu II) do teploty likvidu lze vymezit teplotní interval  $\Delta T_{II}^q$  (podchlazení při působení tlaku) a od bodu II do teploty solidu teplotní interval  $\Delta T_{II}^q$  (podchlazení při (podchlazení bez působení tlaku). V této oblasti je podchlazení vznikající v důsledku tlaku  $\Delta Tn^p$  pro zajištění krystalizace nedostatečné, protože teplota T (bod II) není v oblasti pod solidem T<sub>S</sub>. Rozhodujícím faktorem je dodatečné podchlazení  $\Delta T_{II}^q$ . [4]

**DIPLOMOVÁ PRÁCE** 

Změna v procesu krystalizace nastává splněním podmínky Ts°< T< Ts<sup>p</sup>. V tomto případě krystalizaci zabezpečuje podchlazení v důsledku tlaku - oblast 3 (metastabilního tuhého stavu).

Působením tlaku p<sub>3</sub> na taveninu jsou vytvořeny takové podmínky, že teplota T je v oblasti 3. Zde je průsečík teploty T a tlaku p<sub>3</sub> označen III. Pak od teploty likvidu TL do bodu III lze vymezit teplotní interval  $\Delta T_{III}^{P}$  a od teploty solidu T<sub>S</sub> do bodu III teplotní interval  $\Delta T_{SIII}^{P}$ . Výsledná hodnota podchlazení  $\Delta T_{III}^{P}$  převyšuje hodnotu  $\Delta T^{0}$ , tím více, čím více je tavenina v okamžiku působení tlaku podchlazená a platí:  $\Delta T_{III}^{P} = \Delta T^{0} + \Delta T_{SIII}^{P}$ .

Z uvedeného plyne, že intenzita odvodu tepla krystalizující taveniny je v procesu krystalizace určující v případě, že  $\Delta T^0 > \Delta Ts^p$ . V opačném případě, když  $\Delta T^0 < \Delta Ts^p$ , sehrává v procesu krystalizace vedoucí úlohu tlak .[4]

Z analýzy vlivu tlaku na proces krystalizace vyplývá, že nutnou podmínkou pro uskutečněni krystalizace taveniny v celém objemu odlitku je dosažení takové hodnoty tlaku v tavenině, která zaručí nárůst teploty krystalizace podle vztahu [3]:

$$T_L^P \ge \left(T_L^0 + \Delta T_L\right) \tag{3.3}$$

kde značí:

T<sup>p</sup><sub>L</sub> - teplota likvidu za působení tlaku [°C, K];

 $T_{L}^{0}$  - teplota likvidu bez působení tlaku [°C, K];

ΔT<sub>L</sub>- zvýšení teploty taveniny v důsledku uvolňování latentního krystalizačního tepla LKR [°C, K]

Pokud na krystalizující taveninu Al-Si působí zvýšený tlak, dochází ke změně vzhledu rovnovážného diagramu. Z obrázku 4. je zřejmé, že při tlaku 5000 [MPa] je eutektická teplota 677 [°C] a oblast tuhého roztoku a při této teplotě činí cca 33 [hmot % Si]. Teplota tavení čistého hliníku se při lití s tuhnutím pod tlakem zvyšuje asi o 6,3 [°C] na každých 100 [MPa]. V případě čistého křemíku dochází při dodržování stejných podmínek k poklesu teploty tavení o 5,8 [°C]. Také bod eutektické krystalizace se s každým 1 [MPa] posouvá o 0,03 [hmot.% Si] k vyššímu obsahu křemíku. Maximální mez rozpustnosti křemíku v hliníku při teplotě eutektické přeměny se s tlakem 100 [MPa] posouvá o 0,25 [hmot. % Si]. Mění se též rozpustnost jiných prvků v tuhém roztoku  $\alpha$ . Tyto z měn y se projevují zvýšením podílu primárně vylučované  $\alpha$ - fáze ve struktuře odlitku, snížením podílu eutektika a nárůstem obsahu křemíku v eutektiku.[5]





#### 3.2 Rozbor porezity

Fyzikální chování celulárních struktur se určuje převážně prostřednictvím jejich poréznosti, která se vyznačuje především podílem, uspořádáním a formou jednotlivých pórů. S tím může být spojeno i zhoršení mechanických vlastností odlitku, případně vznik zmetkovitosti.

V praxi bylo prokázáno, že střední úroveň napětí v tuhém tělese s objemovým podílem P kulovitých vnitřních dutin je zvýšena úměrně koncentrací pórů P.100%, v důsledku vnitřního vrubového působení dutých prostor a zmenšení nosného průřezu matrice se vůči udanému vnějšímu napětí zvýší o faktor 1\*(1-P).

Důsledkem toho je, že matrice začíná téct již o faktoru (1-P) nižším vnějším napětím. Mez průtažnosti R<sub>p0,2</sub> porézního materiálu je vůči hranici materiálu bez pórů o tento faktor zmenšena.

Proto platí vztah [6]:

$$R_{p0,2} = R_{p0,2}^{0} * (1-P)$$
 [MPa] (3.4)

Pokud se rovnice (4) aplikuje na Rm, pak se zjistí, že experimentálně stanovené Rm – hodnoty se vzrůstající porézností klesají rychleji než teoreticky vypočtené. Příčinou je to, že póry všeobecně se od ideální kulové formy odchylují a mají často protažený nebo ještě komplikovanější tvar. Pro kvalifikaci vnitřních dutin (vměstky, duté prostory) ve struktuře materiálu se používá tvarový faktor **f** nebo jeho reciproční hodnota – takzvaný faktor ovality **S** (shape factor), zobrazené v rovnicích [7]:

$$f = \frac{4\pi \cdot A}{U^2} \le 1 \quad [-] \tag{3.5}$$

$$S = \frac{1}{f} = \frac{U^2}{4\pi \cdot A} \ge 1 \quad [-] \tag{3.6}$$

A ....plošný obvod [µm<sup>2</sup>]

U...obvod plochy řezu elementu struktury, která byla vyjmuta z metalografického výbrusu [µm<sup>2</sup>]

Veličina S pro kruhové plochy řezu má hodnotu 1 a pro složitější tvary hodnotu větší než 1. Citlivě reaguje na změny geometrie vměstků, vnitřních dutin a jejich vliv na mechanické vlastnosti.



Obr. 5 Parametr faktoru ovality [8]

Na rozdíl od rovnice (3.4), pro pevnost v tahu se používá vztah [7] :

$$R_m = R_{m0} (1-s.P)$$
 (3.7)

Aplikuje- li se tento vztah na výsledky vyšetřování dosáhne se s metalograficky stanoveným středním – faktorem ovality s = 1,4 velmi dobrého souladu mezi experimentálními hodnotami a vypočítaným průběhem křivky.



Obr. 6 Závislost R<sub>m</sub> na pórovitosti P [9]

Dnes dostupné systémy pro zpracování obrazu umožňují rychlé kvantitativní určení geometrických parametrů struktury, jako je například tvarový faktor **f** nebo jeho reciproká hodnota, tzv. faktor ovality (shape factor). Veličina, která pro kruhový řez má hodnotu 1 a pro složitější tvary hodnotu větší než 1 citlivě respektuje změny geometrie vměstků a vnitřních dutin a jejich vliv na s tím související mechanické vlastnosti. To bylo prokázáno v četných pokusech, například také na litinách s různým složením grafitu.

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

## 3.2.1 Rozdělení do tříd pórovitosti a jejich vlastnosti

Tab. (3.1) Experimentálně zjištěné a vypočítané hodnoty pro mez průtažnosti 0.2 %  $R_{p0,2}$  pevnost v tahu  $R_m$  a tažnosti A slitiny EN AC AlSi9Cu3(Fe) pro různé třídy pórovitosti (PK), P = pórovitost, s = faktor kulatosti [10]

РК		1	2	3	4	5
p <sup>1)</sup>	%	1,5 až 2,5 (2)	3,5 až 4,5 (4)	5,5 až 8,5 (7)	12 až 18 (15)	15 až 22 (21)
S <sup>1)</sup>		1,78	1,78	1,79	1,98	2,1
$R_p^{(1)}$	MPa	155 až 165	149 až 172	150 až 170	140 až 170	130 až 140
R <sub>p</sub> <sup>1)</sup>	MPa	167	163	156	145	134
R <sub>m</sub> <sup>1)</sup>	MPa	282 až 290	265 až 270	243 až 258	200 až 210	164 až 175
R <sub>m</sub> <sup>2)</sup>	MPa	289	278	257	211	168
A <sup>1)</sup>	%	1,5 až 1,7	25 až 1,65	1,0 až 1,2	0,65 až 0,75	0,4 až 0,65
A <sup>2)</sup>	%	1,5	1,3	1,0	0,5	0,22
A <sup>3)</sup>	%	1,5	1,35	1,1	0,7	0,6

1) Experimentální hodnoty

2) Vypočítané hodnoty s modulem  $E_0$  pro (přibližně) neporézní materiál

3) Vypočítané hodnoty s modulem E, závislým na pórovitosti

## 3.2.2 Vliv morfologie pórů na pevnost v tahu [10]

Póry s faktorem kulatosti s > 1 vykazují při stejné pórovitosti P vyšší míru přerušeni kovové matrice než kulovité póry s s = 1, což odpovídá pórovitosti vyšší o faktor s. Kromě toho s narůstajícím faktorem **s** narůstá i vrubový účinek pórů, čímž se zvyšuje tvorba trhlin ve struktuře materiálu, což se projevuje především na pevnosti.

V řádce 6 tabulky 1 jsou uvedeny naměřené hodnoty a v řádce 7 podle vztahu vypočítané hodnoty pevností v tahu u jednotlivých tříd pórů. Jako výchozí hodnota pro stav bez pórů bylo dosazeno  $R_{mo} = 300$  MPa (hodnota extrapolovaná na P = 0). S ohledem na přesnost měření při zjišťování pevnosti v tahu a všech ostatních relevantních parametrů, souvisejících s morfologií pórů *a* přirozeně podléhajících silnému kolísání, vychází - jak je vidět - až na příliš vysoké hodnoty pórovitosti dobrý soulad mezi naměřenými a vypočítanými pevnostmi v tahu. Z těch vyplývá, že relativní úbytek pevnosti v tahu  $\Delta R_m/R_{mo} = x\Delta P$  je 5,3 % v třídě pórovitosti (PK) 1,7.1 % v PK 2, 14,3 % v PK 3, 30 % v PK 4 a dokonce 44 % v PK 5. O stejné procentuální hodnoty je možno odstraněním pórů zvýšit pomoci vhodných technologií pevnosti v tahu.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

#### 3.2.3 Vliv morfologie pórů na mez průtažnosti

Pro vliv poréznosti na mez průtažnosti lze nalézt adekvátní analytické vztahy. Až do porózity cca 10% poskytují odvozené rovnice velmi dobrý soulad s praxí.

Při zkoumání vlivu morfologie pórů na mez průtažnosti je možno postupovat následujícím způsobem: vychází se z křivky tečeni (značně) nepórovitého materiálu, která je popsána konstitutivní rovnicí [10]:

$$\sigma = \mathbf{k} \boldsymbol{\varphi}^{\mathsf{n}} \tag{3.8}$$

Přitom  $\boldsymbol{\sigma}$  je skutečné napětí,  $\boldsymbol{\phi}$  skutečné (logaritmické) protaženi,  $\mathbf{n}$  exponent zpevnění a  $\mathbf{k}$  koeficient zpevnění. Exponent  $\mathbf{n}$  je rovný rovnoměrnému protažení, zjištěnému v tahové zkoušce. Pokud se ve vztahu (3.8) položí  $\boldsymbol{\sigma} = R_{po}$ , vychází s příslušným protažením  $\boldsymbol{\phi}_{po}$  a modulem pružností  $E_0$  pro přibližně (přibližně) nepórovitý materiál [10]:

$$R_{po} = k \varphi_{p0}^{n} = k \left( \frac{R_{p0}}{E_{0}} \right)^{n}$$
 případně  $k = E_{0}^{n} R_{p0}^{1=n}$  [MPa] (3.9)

Pokud rovnoměrné protaženi není známo, je možno postupovat následujícím způsobem: jako mez průtažnosti  $A_0$  se přibližně dosadí protaženi na mezi pevnosti v tahu  $R_{m0}$ , přičemž z (3.8) a (3.9) vychází [10]:

$$R_{m0} = kA_0^n = \bigoplus_0 A_0 \sum_{p=0}^n R_{p0}^{1-n}$$
 [MPa] (3.10)

Z toho vychází zpevněni:[10]

 $n = \frac{\ln R_{n0} / R_{p0}}{\ln R_{0} A_{0} / R_{p0}}$ 

Pro zde zkoumané slitiny vychází s hodnotami ze vztahu [1] Rpo = 170 MPa.  $R_{m0} = 300$  MPa,  $A_o = 0,017$  (1,7%). Eo = 75 GPa, jako parametr zpevnění n = 0,2819 a k = 946 MPa. Vzhledem k tomu, že veličiny **n** a **k** jsou určovány pouze vlastnostmi matrice slitiny, je možno je použit i pro pórovitý materiál. S pevností v tahu, vypočítanou podle rovnice (3.7) vychází podobně jako u (3.10) pro mez průtažnosti pórovitého materiálu[10]:

$$A = \left(\frac{R_m}{k}\right)^{\frac{l}{n}} \quad [\%] \tag{3.12}$$

(3.11)



Obr. 7 Pevnost v tahu  $R_m$  a 0,2 % -mez kluzu  $R_{p0,2}$  ze zkoušky tahem na materiálu GD - AlSi9Cu3 v závislosti na třídě pórovitosti 1

Na obrázku 7. Je uvedena  $R_m$  a  $R_{p0,2}$  ve třídách pórovitosti a na obrázku 8 je uvedena tažnost A5 v závislosti na 5 třídách pórovitosti. Z grafů vyplývá, že v první třídě tažnost vzniká a je ovlivňována pórovitostí. Pevnost v tahu klesá s přibývající pórovitostí od průměrné hodnoty 285 na 267, 248, 204, až na 169 MPa. Tažnost postupuje od 1,6 do 1.4,1.1,0.7, a 0.5 %. Vliv na  $R_{p0,2\%}$  - mez kluzu je naproti tomu nepatrný a nastává pouze při velmi vysoké pórovitosti až 5. třídy pórovitosti, kdy je snadno pozorovatelný. Z obrázku plyne, že  $R_m$  se zvětšující se třídou porezity prudce klesá. U hodnoty  $R_{p0,2}$  dochází také k určitému poklesu, který je však poměrně malý. [8]



#### **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

# 3.2.5 Stanovení meze únavy v závislosti na porezitě (parametru pórů)

Mez únavy hliníkových slitin je dle normy DIN 50 100 definována maximálním tah-tlakem- střídavým napětím, při zkoušce dosažené hraničním počtem zatěžovacích cyklů NG = 5\*10 střídavého zatěžovaní. Protože na zkoušku únavy má veliký vliv kvalita povrchu, byly získány výsledky srovnatelné s univerzální zkouškou tahem ofrézovány o 0.2 mm.[8]



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

## 3.2.6 Výsledky zkoušky střídavého zatěžování tah-tlak

Tato zkouška byla prováděna na odlitých zkušebních tyčích, které jsou znázorněny na obrázku 11. s rozměrovými parametry viz.tabulka (3.2)



Obr. 11 Tvar zkušebních tyčinek vyrobených pro zkoušku tahem dle DIN50 125 5x16 s rozdílnou pórovitostí [8]

Tab. (3.2) Rozměry použitých zkušebních tyčinek [8]

Zkušební tyčinka						
	1	2	3	4	5	6
Objem [cm <sup>3</sup> ]	13,5	3,4	3,4	13,5	5,1	10,1
Natržení [mm]	20x2	20x2	20x1	20x1	20x1	20x1

Kvantitativní vyhodnocení a popis pórovitosti se v praxi ukázalo jako mimořádně těžké. Na základě výsledků kvantitativní pórovitosti bylo vyhodnoceno 5 tříd pórovitosti, zobrazených na obrázku 12. Přírůstek pórovitost není ovšem rovnoměrný, ale dochází ke skákavému vzestupu od PK 3 k PK 4.



Plocha zkušební tyče byla ověřena u zařízení mezi ±35 a ±130 MPa vyneseným střídavým zatěžováním až do lomu. Po dostatečném metalografickém vyšetření střídavé zkoušky tah-tlak došlo k rozdělení do pěti tříd pórovitosti. K těmto třídám pórovitosti mohou být přiděleny jednoznačné meze únavy. Vynášením rozdílného zatížení v logaritmické stupnici, přísluší střídavé zatěžování (LW) zobrazující Wöhlerovu křivku na obrázku 12 a 13. Zakreslený je do grafů také hraniční počet zatěžovacích cyklů u 5\*10<sup>7</sup> změny zatěžování, kdy snížení zkoušky je až za uváženou dobu.



Obr.12. Wöhlerova křivka pro plochou zkoušku tahem slitiny AlSi9Cu3 s rozdílenou pórovitostí [8]

Kromě obrázku 12 při LW (změně zatěžováni) 1 je souhrnně vynášena mez pevnosti v tahu nyní pro PK 1 až 3 a PK 4 a 5. Obrázek 13 znázorňuje zvětšený konec diagramu na obrázku 12. Na základě výsledků je rozlišování zkoušky tah - tlak únavové pevnosti mezi třídami pórovitosti 1 až 3 nemožné. Mez únavy je nejen závislá na určitém stupni rozsahu pórovitosti, ale také je ovlivňována tvarem póru. Tak může nepatrně u třídy 1 příslušné porezity s nepříznivými povrchovými póry neboli oxidy dojít k lomu v průběhu zkoušky dříve nežli u třídy 3 při stejném zatížení, protože tyto třídy snesou zřetelně větší změny zátěže. Zřejmě nižší meze únavy při zkoušce odpovídají třídy pórovitosti 4 a 5.



Stupeň meze únavy není možný při zkouškách mezi PK 4 a PK 5. Ze střídavého tah-tlak meze únavy vyplívají závislosti na pórovitosti, které jsou znatelné ve dvou oblastech. [8]

Oblast 1:

 $\sigma_{ZDW}$  = ±(70 bis 120) MPa při zkoušce, odpovídá pórovitosti třídy 1 až 3;

#### Oblast 2:

 $\sigma_{ZDW} = \pm (35 \text{ bis } 60) \text{ MPa při zkoušce, odpovídá pórovitosti třídy 4 a 5.}$ 



#### 3.3 DAS (dendrite arm spacing)

Pro popis dendritické struktury je nejdůležitějším kriteriem vzdálenost sekundárních os dendritů, označovaná jako DAS (dendrite arm spacing). [12] A je také ovlivněn rychlostí ochlazováni. Základní představa podpořená množstvím experimentů spočívá v tvrzeni, že mechanické vlastnosti slitiny jsou tím lepši, čím menši je vzdálenost sekundárních větví dendritů.

Experimentální zjišťování a ověřování hodnot DAS je prováděno pomocí metalografických výbrusů struktury, s pečlivým výběrem nejvhodnějších dendritů, reprezentujících strukturu. Dříve se na fotografii metalografického výbrusu zvoleného dendritu změřila pravítkem vzdálenost přes několik sekundárních větví a vydělila počtem mezer. V této práci se již hodnoty DAS zjišťují pomocí počítačových programů. Ale k těm je samozřejmě zapotřebí kvalitně připravených metalografických výbrusů (resp. jejich přes mikroskop zvětšené fotografie), ale samotné počítaňí vzdáleností DAS je poměrně jednoduše realizováno přes obrazovku počítače pomoci programu Olympus AnalySIS Five.

Zatímco velikost primárních zrn α(Al) ve slévárenských slitinách bývá v rozmezí 1-10 mm, hodnoty DAS bývají nejčastěji v rozmezí 10-150 μm.[12]





## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

## 3.3.1 Vliv DAS na mechanické vlastnosti [12]

S velikostí DAS souvisí i řada dalších strukturních jevů. Čím jemnější je struktura (tj. menší hodnota DAS), tím menší jsou segregační vzdálenosti. Při menším rozsahu segregací proto vznikají menší částice intermetalických vměstků. Nečistoty se vylučují jako oddělené částice v mezidendritických prostorech a netvoří síťoví, chemické složení slitiny je více homogenní, příznivěji je rozložena mikroporezita. Z obrázku 15 vyplývá čím menší je hodnota DAS, tím vyšší jsou mechanické vlastnosti odlitku. [12]



Obr.15. Závislost mechanických vlastností slitin na DAS [12]

## 3.3.2 Popis struktury a vypočtu závislosti DAS

Závislost hodnoty DAS je pouze na rychlosti chladnutí v intervalu tuhnutí, nikoliv na velikosti primárních zrn, stavu krystalizačních zárodků nebo také na vlivu očkování. Ze studií vyplývá, že čím je doba tuhnutí kratší, tím je menší hodnota DAS. Tato závislost je obecně popsána vztahem [12]:

$$DAS = c \cdot t_s^n [\mu m]$$
 (3.13)

c - konstanta, závislá na složení slitiny (pro Al-Si je a=10,7)

n – konstanta závislá na slitině (pro Al-Si je n = 0,3)

t<sub>s</sub> – místní doba tuhnutí [s]



## DIPLOMOVÁ PRÁCE





FSI VUT	DIPLOMOVÁ PRÁCE	List 33
Základním princip hodnot, ze kterýc považovány za re mechanické vlastr	pem měření DAS je získání možná co ch pak budou průměrné hodnoty při da eprezentativní, a bude možno na jejich z nosti zkoumaného materiálu.[12]	největšího počtu ných podmínkách ákladě posuzovat
3.3.3 Shrnu	tí [12]	
Uvedené informa zmenšování roze mechanických vlas	ice o DAS se dají shrnout do násleo estupů dendritických ramen (DAS) pů: stností jednak:	lujících tvrzení - sobí na zvýšení
∘ <b>přím</b> prod půso	no, tj. zvyšováním meze pevnosti, meze l loužení, lomové houževnatosti, únavových bbí na lepší tepelné zpracování	<luzu, poměrného<br="">i vlastností a dále</luzu,>
<ul> <li>nepř</li> <li>nukle</li> <li>prosi</li> <li>maxi</li> <li>porus</li> </ul>	<b>ťímo</b> , tj. omezováním mezidendritických pro eace a růstu fází doprovodných prvků v torech (tj. potlačením vzniku resp málních rozměrů, např. β-fází při šením spojitosti. [12]	ostorů, omezování mezidendritických o. zmenšováním slitinách hliníku)

F	SI	V	U	٦
•	<u> </u>	•	-	

# 4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část je zaměřena na získání výsledků, jejich popisu metod měření a jejich následném vyhodnocení. Cílem experimentální části a celé diplomové práce je porovnání výsledků vzorků z předchozích diplomových prací studentů VUT FSI v Brně. Které byly získány tlakovým litím, případně s místy lokálního dotlačování slitiny AlSi9Cu3 z odlitku bloku motoru, podniku Škoda Auto, Mladá Boleslav. Na vzorcích se zjišťovaly tyto hodnoty pro porovnávání:

- o vliv porezity na mechanické vlastnosti
- o vliv parametru kulatosti bublin na mechanické vlastnosti
- vliv vzdálenosti sekundárních větví dendritu (DAS) na mechanické vlastnosti

## 4.1 Chemické složení a mechanické vlastnosti AlSi9Cu3 [13]

Odlitek je ze slitiny AlSi9Cu3 – ČSN EN 1706 (EN AC-46500). Chemické složení je uvedeno v tab. 4.1. Ostatní prvky jsou ve stopovém množství. Chemické složení bylo zjištěno na spektrometru LECO v Mladé Boleslavi.[13]

		Chemi	cké slože	ení v hmo	nmotnostních %						
AI	Si	Cu	Mg	Mn	Fe	Zn	Ni	Sn	Cr	Ti	Pb
zbytek	8,0-10,0	2,0-3,5	0,1-0,5	0,1-0,4	1	1,2	0,3	0,1	0,05	0,15	0,2

Tab. 4.1 Chemické složení slitiny AlSi9Cu3 podle normy DIN EN 1706[13]

Mechanické vlastnosti dané slitiny

- mez pevnosti Rm = 240 MPa
- o smluvní mez kuzu Rp0,2 = 140 MPa
- tažnost A = 1%
- tvrdost HB = 80

#### DIPLOMOVÁ PRÁCE

## 4.1.1 Popis odlitku motoru a vzorků pro vyhodnocení

Porezita, vzdálenost sekundárních větví dendritu a parametr kulatosti bublin byly změřeny na vzorcích pocházejících ze spodního dílu bloku motoru, který je na obrázku 20. až 22.



Obr. 20 Blok motoru – čelní pohled [12]



Obr. 21. Blok motoru – spodní pohled [12]

#### DIPLOMOVÁ PRÁCE



Obr. 22 Blok motoru – pohled shora [12]

Blok motoru zobrazený na obrázku 20 – 22 je tříválcový motor vyrobený firmou Škoda Auto, a. s. Mladá Boleslav ze slitiny AlSi9Cu3. Bloky motorů jsou vyráběny metodou vysokotlakého lití do kovových forem. Na vybraných blocích motoru bylo v oblastech ložisek použito lokálního dotlačování viditelné z obrázku 23.[12]



FSI VUT

VUT	
	VUT

Na fotografii jsou v místech ložisek graficky zvýrazněná obdélníčková místa po zasunutí dotlačovacích hrotů LSC, z nichž je jedno vyvedeno do detailu.

## 4.1.2 Značení a zhotovení vzorků

Značení vzorků, které bude dále používáno v následujících kapitolách je čerpáno z diplomové práce Jirků. L.[12], kdy veškeré porovnávané vzorky byli jím přímo ve slévárně Škoda Auto, a. s. Mladá Boleslav odlity a následně dále zpracovány.

V každé ze dvou taveb byly odlity čtyři spodní díly bloku motoru. Ty byly vyrobeny v různých variantách, které by měly zajistit různorodost později zjištěných výsledků měření. Některé z bloků byly tedy odlity i s následujícím působení místního dolisováni – tj. tuhnutí pod tlakem tzv. LSC – local squeeze casting. [12]. A právě tyto vzorky s lokálním dolisováním jsou předmět zpracování této diplomové práce. Další vzorky byly odlity bez působení LSC (na okamžik se na tlakových odlévacích strojích vypnulo zajíždění ocelových dolisovacích hrotů, které zajíždějí do tuhnoucího odlitku). Bloky byly ve výrobě po odlití žíhány a obráběny.

Lití bylo provedeno na tlakových licích strojích se studenou komorou Hydra 2000. Obě tavby proběhly na stroji se závodním pořadovým číslem 34. Teplota lití byla 685 °C, rychlost 1R byla 0,15 m/s, rychlost 2R 6,06 m/s. Tlačný píst působil silou 297 MPa, forma byla vakuována na podtlak 0,2 bar.[12]

Získané zkušební odlitky byly řádně a srozumitelně označeny, aby byly výrobní atributy každého kusu na první pohled zřejmé. Číslice v označení znamená číslo tavby, písmeno "**B**" je označení pro blok motoru, znak (plus nebo mínus) před písmenem "L" napovídá, jestli bylo při odlévání vzorku použito místního dotlačování (L = local squeeze casting), stejné pravidlo platí pro písmeno "**Z**" (podrobeno žíhání). Výjimku ve značení představuje písmeno "**O**" (podrobeno obrobení), u kterého se zaručuje předchozí místní dolisování i žíhání a znaky "+L+**Z**" se v označení odlitku automaticky vynechává. Tento systém značení je zřetelný v tabulce 4.1 kde je znázorněno množství a jednotlivé varianty provedení zkoumaných spodních dílů bloku motoru. [12]

#### DIPLOMOVÁ PRÁCE

Fab. 4.1 Př notoru[12]	ehled varian	it vyrobených zk	usebnich (	odlitku – spo	dhich dilù bl
Poř. číslo	Tavba	Název odlitku	LSC	Žíháno	Obrobeno
1	první	1B-L-Z	ne	ne	ne
2	první	1B+L-Z	ano	ne	ne
3	první	1B+L+Z	ano	ano	ne
4	první	1B+O	ano	ano	ano
5	druhá	2B-L-Z	ne	ne	ne
6	druhá	2B+L-Z	ano	ne	ne
7	druhá	2B+L+Z	ano	ano	ne
8	druhá	2B+O	ano	ano	ano

V tabulce jsou červeně vyznačeny především hodnoty s lokálním dolisováním, jež byly vybrány k přípravě a dalšímu zpracování pro vyhodnocení a konečnému porovnání s ostatními hodnotami.

Z každého bloku motoru, v tomto případě spodního dílu bloku 3v motoru EA 111 03D/1,2l, který byl ke studiu vyroben, byly odebrány čtyři vzorky. Všechny byly vyřezány z oblasti ložisek (z prostoru přibližně znázorněného na obrázku 24) a patřičně očíslovány. Vzorky vyřezané z bloku motoru byly označeny dvojčíslím – **první** číslo znamená pořadí, v jakém byl blok během obou taveb odlit, **druhé** číslo znamená pořadí ložiska na odlitku (číslování ložisek na odlitku je znázorněno na obrázku 25). Například číslo 82 o příslušném vzorku vypovídá, že byl odebrán z osmého odlitého bloku (tj. blok 2B+O, viz. tab. 4.1) a konkrétně z jeho druhého ložiska.[12]



Obr. 24 Přibližné označení výřezu v oblasti ložisek [12]

Obr. 25 Místa odběru vzorků z bloků a způsob jejich číslování – toto číslo představuje druhý údaj z dvoj číselného označení vzorku [12]
FSI	Vι	JT

### 4.1.3 Získání mechanických vlastností a výběr vzorků

Vyřezané hranolky byly dále obrobeny do tvaru standardizovaných tahových tyček (podle normy DIN 50125:2004-01) o průměru pracovní části 6 mm a délky 30 mm (viz. obr. 26).[12]



Obr. 26 Standardizovaná tyčka pro zkoušku tahem (pro vzorky ze spodního dílu bloku motoru a kokily)[12]

Po provedení tahové zkoušky a získání potřebných mechanických vlastností (Rp<sub>0,2</sub>, Rm,A) byly ze zbytků tahových tyček nařezány vzorky a označeny dle tabulky 4.2 Přehledu vzorků odňatých z tlakově litých bloků motoru. Takto označené tahové tyčky se staly základem orientace a rozpoznání veškerých vzorků, o kterých bude zmínka v dalších kapitolách této diplomové práce.

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

List 40

Přehled zhotovených tyčinek k tahové zkoušce odebraných ze spodních dílů bloků motoru							
Poř. číslo	Označ. vzorku	Tavba	Ložisko č.	LSC	Žíháno	Obrobeno	Poznámka
1	11	první	první	ne	ne	ne	póry v tyčce
2	12	první	druhé	ne	ne	ne	póry v tyčce
3	13	první	třetí	ne	ne	ne	tyčka nezhotovena
4	14	první	čtvrté	ne	ne	ne	tyčka nezhotovena
5	21	první	první	ano	ne	ne	
6	22	první	druhé	ano	ne	ne	
7	23	první	třetí	ano	ne	ne	
8	24	první	čtvrté	ano	ne	ne	
9	31	první	první	ano	ano	ne	
10	32	první	druhé	ano	ano	ne	
11	33	první	třetí	ano	ano	ne	
12	34	první	čtvrté	ano	ano	ne	
13	41	první	první	ano	ano	ano	
14	42	první	druhé	ano	ano	ano	
15	43	první	třetí	ano	ano	ano	
16	44	první	čtvrté	ano	ano	ano	
17	51	druhá	první	ne	ne	ne	póry v tyčce
18	52	druhá	druhé	ne	ne	ne	tyčka nezhotovena
19	53	druhá	třetí	ne	ne	ne	tyčka nezhotovena
20	54	druhá	čt∨rté	ne	ne	ne	
21	61	druhá	první	ano	ne	ne	
22	62	druhá	druhé	ano	ne	ne	tyčka nezhotovena
23	63	druhá	třetí	ano	ne	ne	tyčka nezhotovena
24	64	druhá	čtvrté	ano	ne	ne	
25	71	druhá	první	ano	ano	ne	
26	72	druhá	druhé	ano	ano	ne	
27	73	druhá	třetí	ano	ano	ne	
28	74	druhá	čtvrté	ano	ano	ne	
29	81	druhá	první	ano	ano	ano	
30	82	druhá	druhé	ano	ano	ano	
31	83	druhá	třetí	ano	ano	ano	
32	84	druhá	čtvrté	ano	ano	ano	

V tabulce 4.2 je červeně označeno 10 vzorků tlakově litých s lokáním dolisováním, které ještě nebyly v předchozích pracích vyhodnocovány a staly se tak předmětem zpracování této práce. Ostatní vzorky (neoznačené červeně) se již staly předmětem předchozích diplomových prací, ze kterých jsou výsledky čerpány, viz. Bergerová, K. [11], Jirků, L [12].

### 4.1.4 Příprava vybraných vzorků

Převzaté vzorky byly rozděleny v igelitových pytlících, které obsahovali 2 kusy: příčný a podélný řez odebraný z jedné tahové tyčinky. Sáčky byly pečlivě označeny shodným číslem se samotnými metalografickými výbrusy. Vzorky byly již nařezány, zality to do dentakrylu (viz. podrobný popis v diplomové práci Jirků, L. [12]) a přebroušeny brusnými kotouči. Broušení probíhalo na papírech různých drsností, od hrubší k jemnější, konkrétně byly použity papíry zrnitosti 240, 400 a nakonec 600. [12]

K dokonalé přípravě metalografických výbrusů musel být ještě každý vzorek pečlivě leštěn na přístroji Kompakt 1031 (viz. obr. 27) za použití leštícího kotouče různé drsnosti. V průběhu leštění byly použity 3 leštící kotouče (viz. obr. 28), které odpovídaly nanášené lešticí diamantové pastě Urdiamant o příslušné zrnitosti D6, D2 a D0,7. Před samotným ručním leštěním bylo důležité vzorky řádně očistit denaturovaným lihem a dodržovat jejich stálé zvlhčování i v průběhu. Otáčky přístroje byly zvoleny v rozmezí 140 až 160 ot/min. Kdy doba leštění vzorku závisela především na vizuální kontrole a trvala cca 10 až 20 minut.



Obr. 27: Leštící přístroj Kompakt 1031 [14]



Obr. 28 Vlevo leštící kotouč z PVC a napravo brusný kotouč s obručí [14]

F	SI	VU	Т

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Tímto postupem připravené metalografické výbrusy jako na obrázku 29. jsou nachystané k dalšímu studiu hodnocení porezity, DAS vzdálenosti sekundárních větví dendritů a ovality.

podélný řez



Obr. 29 Vlevo příčny řez, vpravo podélná řez připraveného metalografického výbrusu

### 4.2 Způsob měření porezity

Měření porezity se provádí pomocí optické mikroskopie a následného převedení obrazu do rozhraní kamery a konečného vyfocení. Dále se pořízené fotografie zkopírují do počítače, kde se zpracovávají pomocí počítačové softwaru AnalySIS.

### 4.2.1 Příprava vzorků

K měření porezity byly použity připravené metalografické výbrusy. Tyto výbrusy bylo nutné před samotným měřením naskenovat do počítače při rozlišení 1200 dpi ve formátu TIFF (tento formát má na rozdíl od JPEG schopnost zachovat měřítko). A potom byly obrázky upraveny oříznutím, pootočením v programu Photoshop a připraveny tak k vyhodnocení.

### 4.2.2 Princip a průběh měření

K měření bylo použito počítačového programu AnalySIS firmy Olympus. Ten hodnotí porezitu pomocí "grafických filtrů", které si ze zadaného obrázku "vyberou" barvu, na kterou jsou nastaveny. Intenzitu zbarvení si uživatel nastaví před měřením sám. Na rozdíl od kolegů z předchozích diplomových prací nebylo použito pouze dvoubarevného zobrazení (černá a bíla), ale naskenované obrázky zůstaly v barevném provedení. K vyhodnocení daného

**FSI VUT** 

### **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

místa sloužil obdélníkový rám, který danou oblast označil a následně vyhodnotil jak je patrné z obrázku 30. Vyhodnocovali se příčné a podélné řezy pouze jedním výběrem.



Obr. 30 Příčný metalografický výbrus č. 73 s obdélníkovým výběrem vyhodnocované oblasti.



Obr. 31. Podéný metalografický výbrus č. 73 s obdélníkovým výběrem vyhodnocované oblasti.

K dobrému rozeznání pórů místo škrábanců a rýh bylo třeba nastavit kontrast barev a citlivost detekčních filtrů programu viz. obr 32. Na obrázku je příčný řez vzorku 73, kdy postup výběru oblasti na podélném řezu je stejný.



Obr. 32 Nastavení kontrastu barev a citlivosti detekčních filtrů na příčném řezu 73.



DIPLOMOVÁ PRÁCE

VYHODNOCENÍ POREZITY						
Číslo vzrorku	Ďoz	Hodnoty porezity	R <sub>p0,2</sub>	R <sub>m</sub>	Α	Ζ
	Rez	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
24	podélný	0,33	156	222	27	2.2
24	příčný	0,23	100	232	2,7	2,3
22	podélný	0,08	150	220	0.7	26
33	příčný	0,17	159	229	2,7	3,0
24	podélný	0,09	166	231	1,2	2
34	příčný	0,11	100			2
42	podélný	0,2	111	236	2,5	3
43	příčný	0,15	144			
64	podélný	0,08	177	234	1,8	17
01	příčný	0,12	177			1,7
64	podélný	0,23	177	050	0.0	2
04	příčný	0,19	177	292	2,3	2
70	podélný	0,3	142	205	27	26
12	příčný	0,36	143	205	2,7	2,6
72	podélný	0,15	167	227	2	20
13	příčný	0,32	107	221	2	∠,0
94	podélný	0,22	152	224	2.4	27
01	příčný	0,09	103	234	2,4	2,1
00	podélný	0,08	146	227	4	2.7
83	příčný	0,42	146 237		4	2,1

Tab. 4.3 Výsledná naměřená porezita u tlakově litých vzorků s LSC (lokální dotlačován)

### 4.3 Zjišťování parametru kulatosti pórů

### 4.3.1 Příprava a výběr vzorků

Parametry kulatosti byly zjišťovány na stejné skupině vzorků, jako v předchozím hodnocení porezity. Parametry zjištěných pórů byly studovány pomocí optické mikroskopie a následného převedení obrazu do rozhraní kamery a konečného vyfocení. Dále se pořízené fotografie zkopírovali do počítače, kde se dále zpracovaly pomocí počítačové softwaru AnalySIS..

### 4.3.2 Princip a průběh měření

Postup měření parametrů kulatosti pórů se podstatně lišil od zjišťování samotné porezity. Hodnocení se provádělo na fotografiích pořízených na mikroskopu Olympus GX-71 na ÚMVI FSI VUT (obr. 34). Pro obrazovou analýzu byl použit software Olypmus Five. Bylo však také zapotřebí zvolit některé "mantinely" výzkumu, tj. nadefinovat mezní (minimální a maximální) hodnoty některých hodnocených faktorů – jako **elongation** a **sphericity**.

Tím došlo k eliminaci některých faktorů, které by mohly zkreslit výsledek. Nastavením maximálních hodnot např. protažení pórů (třeba poměr stran póru 1:10) nebo jejich rozměr (např. 4 mm), bude hodnotící program veškeré objekty nad tyto limity ignorovat – např. právě často se vyskytující rýhy na vzorcích. [12]



Obr. 34 Mikroskop Olympus GX-71

Program analyzuje v zadaných obrázcích objekty, které se barevně odlišují od svého okolí a splňuje rozměrové a tvarové zadané mezní podmínky. AnalySIS spočítá obvod i plochu každého póru a podle známých měřítek obrázku (podle zadaného zvětšení - 50x, 100x apod.) dopočítá i vlastní rozměry póru. Výsledky všech hodnocených objektů ve vzorku pak program automaticky vkládá do tabulek. [12]

Program pracuje s těmito pojmy:

- aspect ratio (poměr stran objektu) jeho maximální přípustná hodnota se definuje se v okrajových podmínkách
- o diameter max. (největší rozměr objektu) definuje se v okr. podmínkách
- o diameter mean. (střední rozměr objektu)
- o diameter min. (nejmenší rozměr objektu)
- o elongation (vodorovné protažení) definuje se v okr. podmínkách
- **sphericity** (svislé protažení) definuje se v okr. podmínkách



### DIPLOMOVÁ PRÁCE



Obr. 37 Snímek pórů vzorku 33



Obr. 38 Analýza snímku pórů vzorku č. 33 softwarem AnalySIS

V tabulce 4.4 jsou uvedeny naměřené hodnoty ovality tlakově litých vzorků stejné množiny jako v předchozích měřeních.

Značení	Řez	Kulatost	Prodloužení Elongation	Tvarový (Shape)	Parametr	R <sub>m</sub>
VZIOIKU		Sphericity	Elongation	factor	kulatosti	[MPa]
24	podélný	0,35	2,04	0,28	3,57	000
24	příčný	0,31	1,85	0,30	3,33	232
22	podélný	0,34	2,21	0,21	4,76	220
33	příčný	0,35	1,97	0,31	3,23	229
24	podélný	0,42	1,61	0,10	10,00	221
54	příčný	0,35	2,32	0,18	5,56	201
12	podélný	0,31	2,06	0,21	4,76	226
43	příčný	0,38	1,80	0,71	1,41	230
61	podélný	0,37	1,90	0,24	4,17	224
01	příčný	0,33	1,97	0,31	3,23	234
64	podélný	0,36	1,75	0,15	6,67	252
04	příčný	0,35	2,38	0,63	1,59	252
70	podélný	0,37	1,96	0,18	5,56	205
12	příčný	0,68	2,01	0,82	1,22	205
72	podélný	0,36	2,09	0,16	6,25	227
13	příčný	0,32	2,29	0,70	1,43	221
91	podélný	0,34	2,21	0,27	3,70	234
01	příčný	0,39	1,76	0,80	1,25	234
93	podélný	0,46	1,67	0,14	7,14	227
03	příčný	0,30	2,06	0,71	1,41	231

Tab. 4.4. Výsledné hodnoty ovality tlakově litých vzorků s LSC (s lokálním dolisováním)



### 4.5 Měření vzdálenosti DAS

Po zjištění mechanických vlastností jednotlivých vzorků bylo zapotřebí zjistit vzdálenost mezi sekundárními větvemi dendritů ve strukturách vzorků

### 4. 5.1 Princip a průběh měření

Neiprve bylo potřeba připravené vzorky důkladně prohlédnout pod mikroskopem, nalézt ve struktuře zřetelné dendrity a pomocí převodníků si je vyfotografovat. Byl použit mikroskop Olympus 6x71 (inv. č. 807253), zvětšení bylo nastavováno dle velikosti dendritů 50 nebo 100 násobné.[12] U podélných řezů byla snaha o nafocení tři míst s dendrity, ale protože metalografická struktura obsahovala malé množství dendritů na úkor velkého množství jehlic křemíku, se u některých vzorků nepodařilo nafotit ani daná tři místa. Spatná metalografická struktura je zřejmě dána špatnou

### **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

modifikací během lití. Očíslované fotografie byly uloženy do počítače a dále zpracovány programem AnalySIS (firma Olympus).

Důležité bylo nastavení zvětšení každého vzorku a tím dáno cejchování obrazovky. Potom se na monitoru jednoduše označily středy sekundárních větví dendritů. Jejich vzdálenost pak počítač spočítal pomocí uvedeného měřítka. Měření bylo tím přesnější, čím více ramen bylo na fotografii označeno. Pro každou fotografii určoval program AnalySIS všechny změřené vzdálenosti, naměřené maximum, minimum a vypočítával průměrnou hodnotu DAS a směrodatnou odchylku. Na obrázcích 40 až 41 jsou příklady hodnocených vzorků. Nahoře je fotografie z mikroskopu, dole tatáž fotografie po počítačové analýze.



Obr. 40 Podélná řez vzorku 61 tlakově litého s LSC před počítačovou analýzou DAS. Zvětšeno 100x



Obr. 41 Podélný řez vzorku 61 tlakově litého s LSC po počítačové analýze DAS. Zvětšeno 100x

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

### 4.5.2 Naměřené hodnoty

V tabulce 4.5 jsou pak uvedeny výsledné DAS všech měřených vzorků z tlakově litých zkušebních odlitků (spodní díly bloku motoru).

Označení vzorku	Část vzorku	DAS [µm]	Směrodatná odchylka	R <sub>p0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A	Z
		04.00	5.00	[мрај	[MPa]	[%]	[%]
24	podeiny	24,29	5,82	156	232	2,7	2,3
	pricny	19,81	3,12				
33	podélný	20,63	5,18	159	229	2.7	3.6
	příčný	21,16	4,35			_,.	0,0
34	podélný	21,93	4,76	166	221	1.2	2
54	příčný	22,13	3,83	100	231	۲,۲	2
42	podélný	22,85	5,30	111	226	2.5	2
43	příčný			144	230	2,5	3
64	podélný	24,49	6,09		234	1,8	1,7
61	příčný	18,91	5,25	177			
64	podélný	21,71	5,35	477	050		~
64	příčný	21,15	4,92	177	252	2,3	2
70	podélný	18,75	4,42	4.40	205	0.7	2.0
12	příčný	20,87	3,95	143	205	2,7	2,6
72	podélný	21,75	5,27	167	207	2	2.0
13	příčný	20,53	4,56	167	221	2	2,0
04	podélný	20,14	4,01	450	224	0.4	0.7
61	příčný	18,46	4,25	153	234	∠,4	∠,/
0.2	podélný	22,02	5,27	1.10	007	4	0.7
83	příčný	19,43	4,21	146	237	4	2,7

Tab. 4.5 Výsledné DAS všech měřených vzorků z tlakově litých zkušebních odlitků (spodní díly bloku motoru) s LSC

### 4.6 Stanovení trendů vybraných závislostí

Hlavním účelem této práce je definovat parametry zjištěné porezity ve zkoumaných vzorcích a posoudit její vliv na výsledné mechanické vlastnosti odlitku. A tyto výsledky porovnat s hodnotami získanými z předchozích diplomových prací studentů Jirků, L., Svoboda, J.(obsaženo v práci Jirků,L.) a Bergerová, K. Aby se ze získaných hodnot dal odhadnout vliv porezity na mechanické vlastnosti zkoumaných vzorků, byly zhotoveny tyto grafické závislosti:

- Rm,  $Rp_{0,2} = f(DAS)$ ,
- Rm,  $Rp_{0,2} = f(porezita)$
- Rm,  $Rp_{0,2} = f(s)$ .

FSI VUT	DIPLOMOVÁ PRÁCE	List 52

Tlakově lité vzorky se dále dělily podle působení či nepůsobení místního dotlaku (LSC). Studie závislosti mezí pevností Rm a Rp<sub>0,2</sub> na vzdálenosti sekundárních dendritických větví, zanesená v grafech. Zobrazené hodnoty Rm a Rp<sub>0,2</sub> jsou přímou závislostí na hodnotách DAS. Rovnice proložených lineárních regresí jsou potom ve tvaru:

$$Rp_{0,2} = K_1 + \langle K_2 \cdot DAS \rangle$$
(4.3)

$$Rm = K_3 + \langle \! \langle K_4 \rangle \cdot DAS \rangle$$
(4.4)

kde hodnoty  $K_1$  a až  $K_4$  jsou konstanty. V následujících grafech s touto závislostí jsou meze pevnosti Rm a smluvní meze  $Rp_{0,2}$  vynášeny v závislosti přímo na DAS.

Všechny zmiňované grafy jsou proloženy regresní křivkou pro snadnější rozeznání trendů jednotlivých závislostí. Křivky jsou popsány rovnicemi, z jejichž konstant je zřejmý sklon a strmost dané křivky, díky kterým se dá dopočítat teoretická mez pevnosti Rm nebo vzdálenost sekundárních větví dendritů DAS.

Pro rovnice lineárních regresí závislostí Rm,  $Rp_{0,2} = f$  (porezita) a Rm,  $Rp_{0,2} = f$  (s) platí obdobná matematická vyjádření, která jsou ve tvaru[12]:

$$Rm = K_5 + K_6 \cdot P \tag{4.5}$$

$$Rp_{0,2} = K_7 + K_8 \cdot P \tag{4.6}$$

$$Rm = K_9 + \langle K_{10} \cdot s \rangle$$
<sup>(4.8)</sup>

$$Rp_{0,2} = K_{11} + \{K_{12} \cdot s\}$$
(4.9)

Kde K<sub>5</sub>, K<sub>6</sub>, K<sub>7</sub>, K<sub>8</sub>, K<sub>9</sub>, K<sub>10</sub>, K<sub>11</sub>, K<sub>12</sub> jsou opět konstanty přímky, "P" je porezita a "s" je ovalita (parametr kulatosti).

### 4.7 Statistické prověření všech výsledků

Všechny naměřené hodnoty spolu s materiálovými veličinami (tj. Rm, Rp<sub>0,2</sub>, DAS, porezita a ovalita) byly statisticky zpracovány. Důvodem toho bylo usnadnění vyřazení hrubé chyby v naměřených souborech a rozpoznat zda se jedná o normální rozdělení a linearitu souborů, které jsou spolu párově svázány. Ke statistickému zhodnocení byl použit software MathCad, díky kterému by nedošlo ještě před statistickou kontrolou správnosti naměřených dat k jejich řádnému roztřídění. A proto by byla brána nadměrně veliká část naměřených hodnot automaticky jako hrubá chyba. Vstupní (zkoumané naměřené) hodnoty byly uspořádány do matic, byly vypočteny průměrné hodnoty, směrodatné odchylky v maticích apod. [12] Samotné statistické hodnocení naměřených souborů dat probíhalo pomocí testů:

- testu hrubé chyby (tzv. Grubbsův test),
- o testu normálního rozdělení (tzv. Kolmogorův test),
- test lineární závislosti (např. závislost meze pevnosti na porezitě, DAS)

V množině hodnot, které byly naměřeny na vzorcích tlakově litých spodních dílů bloku motoru, byla nalezena hrubá chyba měření pouze u množiny hodnot Rm, kdy došlo k postupnému vyřazení 6 členů viz. příloha 1.

Odhalené statistické hrubé chyby měření však nebyly ze zpracovávaných souborů dat eliminovány, protože se jednalo o soubory hodnot Rm týkajících se vzorků z bloků zhotovených s místním dotlakem (LSC). Těchto hodnot je pouze deset a došlo by tak k snížení počtu členů u souborů porezity, DAS a ovality. Ze statistického hlediska je lepší a hlavně přesnější, když zkoumaný soubor obsahuje větší počet členů.

Většina zkoumaných množin splňuje podmínky normálního rozdělení. Výjimku tvoří soubory hodnot DAS vzorků všech druhů odlitků. Linearita souborů se posuzovala pro všechny typy zkoumaných odlitků v závislostech Rm, Rp<sub>0,2</sub> = f(DAS) a Rm = f(porezita). Z hodnocení linearity vyplývá, že většina zkoumané závislosti nevykazuje známky linearity.

### 4.8 Grafické porovnání dílčích naměřených hodnot

Jak již bylo výše zmíněno, cílem této práce je porovnání naměřených hodnot (porezita, DAS, ovalita) v závislosti na mechanických vlastnostech (Rp<sub>0,2</sub>,Rm, A) získaných z diplomových prací studentů VUT FSI [11], [12], [15]. Závislosti daných hodnot byly rozděleny do grafů podle toho, jestli se jedná o samotné tlakové lití anebo tlakové lití s místním dolisováním (dotlačováním) neboli squezee casting LSC.

Přehled všech porovnávaných hodnot je uveden v příloze 4, kde jsou zpracovány do tabulek podle jmen studentů. Příloha obsahuje tabulky naměřených hodnot Bergerová 2005 [11], Jirků 2007 [12], Klocová 2008[ 15]. Kdy hodnoty tlakově litých bloků studenta Svobody, J. 2007[13] jsou zahrnuty v práci Jirků, L. 2007 [12].

### 4.8.1 Závislost mechanických vlastností na porezitě

Cílem bylo porovnáním hodnot, které byly pro lepší viditelnost závislosti a odlišností křivek od sebe zvoleny s vhodným měřítkem do jednoho grafu.

### 4.8.1.1 Mechanické vlastnosti v závislosti na porezity s LSC

Graf číslo 1 uvedený v příloze 5 znázorňuje závislost mechanických vlastností jako Rp<sub>0,2</sub>, Rm (na ose vlevo) a tažnosti (na ose vpravo) na naměřených hodnotách porezity v procentech. V grafu jsou vyneseny křivky hodnoty tlakově litých bloků s lokálním dolisováním LSC, které jsou obsaženy pouze v pracích Jirků 2005 [12] a Klocová 2008 [15]. Křivky jsou tvořeny z hodnot podélného (body označené kolečkem) a příčného řezu (body označené čtverečkem) vzorků. Z důvodů velikého rozdílu hodnot výsledné porezity se osa X skládá ze dvou os, kde osa označená č. 1 náleží hodnotám porezity Klocová 2008 a osa č. 2 pak hodnotám porezity Jirků 2007. Směrnice trendu a jejich rovnice jsou uvedeny v přílohách.

### 4.8.1.2 Mechanické vlastnosti v závislosti na porózitu u tlakově litých bloků bez lokálního dotlačování (bez LSC)

Stejně jako v kapitole 4.7.1.1 je graf číslo 2 uvedený v příloze 5, kdy představuje závislost mechanických vlastností Rp<sub>0,2</sub>, Rm, A na porezitě avšak s tím rozdílem, že se jedná o hodnoty tlakově litých bloků bez lokálního dolisování (bez LSC). Tyto hodnoty jsou pouze v práci Jirků L, [12] viz. příloha 4.

# 4.8.2 Závislost mechanických vlastností na DAS (dendrite arm spacing)

Obdobným způsobem jako je uvedeno v předchozích dvou kapitolách je sestavena závislost mechanických vlastností Rp<sub>0,2</sub>, Rm, A na DAS v µm. Kde však ještě k porovnávání hodnot (viz. příloha 4) Jirků 2007, Klocová 2008 přibyly ještě data studentky Bergerové 2005. Zpracována data jsou také rozdělena do dvou grafů:

- závislost mechanických vlastností na DAS s lokalním dolisování (LSC)
- závislost mechanických vlastností na DAS tlakově litých bloků bez lokálního dolisování

# 4.8.3 Závislost mechanických vlastností na ovalitě "s" (parametru kulatosti póru)

Stejným způsobem jako v kapitole 4.7.1 Závislost mechanických vlastností na porezitě vznikly i další dva grafy uvedené v příloze 7, pouze s tím rozdílem že se jedná o závislost mechanických vlastností na ovalitě (parametru kulatosti póru). Kde jsou porovnávána opět data Jirků 2005 a Klocová 2008 viz. příloha 4, a rozdělena do dvou grafů podle toho jestli se jedná o hodnoty získané na vzorcích tlakově litých s lokálním dolisováním či bez.

### 4.9 Celkové grafické vyhodnocení

Celkový počet vzorků z této práce [13] a s ostatních diplomových prací [11],[12] činil 40 kusů vzorků, které však musíme z dvojnásobit, protože se vyhodnocoval zvlášť příčný a podélný řez připadající na jeden očíslovaný vzorek. Konečný počet je tedy 80 vzorků, z nichž 24 bylo odlito pouze tlakově a zbylých 56 vzorků tlakově s lokálním dolisováním.

Výše zmíněný celkový počet vzorků je dále porovnáván v grafech číslo 4.1,4.2,4.3, pouze s rozdělením na vzorky tlakově lité a tlakové lité s lokálním dolisováním bez rozlišení zda se jedná o vzorky Bergerová 2005, Jirků 2007, Klocová 2008 viz. příloha 4. Také se v dalším vyhodnocení neuvažuje příčný a podélný řez zvlášť, tudíž celkový soubor hodnot k porovnání obsahuje 40 členů. Z nichž do skupiny tlakově litých bez lokálního dolisování připadá desetinové množství ze zdrojů [11], [12].

Graf závislosti mechanických vlasností Rpo.2, Rm na porezitě tlakově litých vozků s lokálním dolisováním (s LSC) a litých tlakově bez lokálního dolisování (bez LSC)



Graf 4.1 Závislost mechanických vlastností na porezitě u vzorků litých tlakově a tlakově s lokálním dolisováním

### 4.9.1 Popis grafu závislosti mechanických vlastností na porezitě

Graf 4.1 znázorňuje závislost mechanických vlastností  $Rp_{0,2}$  a Rm v MPa na porezitě v procentech rozdělených do dvou skupin podle způsobu lití daného vzorku. Jedná se o rozdělení na tlakově lité (bez LSC) vzorky a lité tlakově s lokálním dolisováním (s LSC). Protože se však hodnoty meze pevnosti Rm a smluvní meze kluzu  $Rp_{0,2}$  těchto dvou skupin od sebe výrazně liší je v grafu vynesena (vpravo) druhá stupnice náležící hodnotám  $Rp_{0,2}$  a Rm skupiny vzorků litých tlakově bez LSC. Stejně tak se od sebe liší i hodnoty naměřené porezity a proto jsou v grafu 4.1 vyneseny dvě osy x, s tím že osa označená červenou číslicí 1(v rozsahu porezity 0% – 5%) přísluší skupině hodnot tlakově litých s lokálním dolisováním (s LSC). Druhá osa s označením 2 (v rozsahu 0% – 12,5%) porezity pak přísluší hodnotám tlakově litých bez lokálního dolisování (bez LSC). Pro lepší orientaci jsou křivky označeny popiskami odlišeny od sebe barvami, které jsou shrnuty do legendy napravo od grafu.

Z grafu vyplývá, že křivka meze pevnosti Rm s lokálním dolisováním (s LSC) klesá postupně s přibývajícím procentem porezity. Tj. čím vyšší hodnota porezity tím je nižší hodnota meze pevnosti Rm. Matematický popis rovnice regresní křivky je uveden v prvním řádku tabulky 4.6 na straně 61 a koeficient spolehlivosti je R<sup>2</sup>= 0,024. Hodnoty souboru Rm s LSC se pohybují v rozmezí cca od 200 MPa do 260 MPa v závislosti na porezitě, která má největší četnost v rozmezí od 0% do 1%.

Obdobné vlastnosti má křivka meze pevnosti Rm bez lokálního dolisování (bez LSC) s tím rozdílem, že se její hodnoty Rm pohybují v rozmezí cca 90 MPa až 150 MPa. A tím je i dáno vyšší procento porezity pohybující se v rozmezí cca od 3% do 11% (dle osy x označené č. 2). Rovnice regresní křivky je uvedena ve třetím řádku tabulky 4.6 a koeficient spolehlivosti je  $R^2$ = 0,024.

Naopak se však chovají křivky smluvní meze kluzu Rp<sub>0,2</sub>, kdy Rp<sub>0,2</sub> s lokálním dolisováním (s LSC) má mírný stoupající charakter, tj. že se vrůstající hodnotou porezity nepatrně stoupá i hodnota Rp<sub>0.2</sub>. Rozmezí této smluvní meze kluzu se pohybuje cca od 140 MPa do 190 MPa v závislosti na rozmezí porezitv 0% 4,5%, opět hodnot сса od do s větší četností v rozmezí od 0% do 1%. Koeficient spolehlivosti je roven  $R^2$ = 0,019 a rovnice regresní křivky je v druhém řádku tabulky 4.6.

Křivka smluvní meze kluzu  $Rp_{0,2}$  bez lokálního dolisování (bez LSC) s koeficientem spolehlivosti  $R^2 = 0,511$  má prudší stoupající charakter než  $Rp_{0,2}$  s LSC a její rozmezí je cca od 0 MPa do 140 MPa, což odpovídá rozmezí 3% až 11 % porezity. Rovnice regresní křivky je také uvedena v tabulce 4.6.

Graf závislosti mechanických vlastností Rp0,2, Rm na DAS (dendrite arm spacing) získaných na vzorcích tlakově litých s lokálním dolisováním (s LSC) a tlakově litých bez LSC



Graf 4.2 Závislost mechanických vlastností na DAS u vzorků litých tlakově a tlakově s lokálním dolisováním

### 4.9.2 Popis grafu závislosti mechanických vlastností na DAS

Graf 4.2 znázorňuje závislost mechanických vlastností Rp<sub>0,2</sub> a Rm v MPa na DAS (dendrite arm sparing) vzdálenost sekundárních větví dendritů v mikrometrech rozdělených do dvou skupin stejně jako je popsáno v kapitole 4.8.1. Hodnoty obou závislostí se pohybují přibližně ve stejné rozmezí proto zde nejsou vynášeny žádné další osy. Pro lepší orientaci jsou křivky označeny popiskami odlišeny od sebe barvami, které jsou shrnuty do legendy napravo od grafu.

Z grafu vyplývá, že hodnoty  $Rp_{0,2}$  a Rm s lokálním dolisováním (s LSC) nejsou na hodnotě DAS příliš závislé vzhledem k jejich skoro rovinnému průběhu, který je zřejmí z jejich koeficientů spolehlivosti: pro  $Rp_{0,2}$   $R^2$ = 0,005 a pro Rm  $R^2$ = 0,020. Rozmezí obou hodnot se pohybuje cca od 150 MPa do 260 MPa, kde vyšší hodnoty náleží spíše mezi pevnosti. Rozmezí hodnot DAS platí pro všechny křivky stejně a to cca od 15 µm do 30 µm s největší četností v intervalu od 19 µm do 27 µm. Na straně 61 v tabulce 4.7 jsou v prvním a druhém řádku uvedeny rovnice obou regresních křivek.

Závislost křivky meze pevnosti Rm bez lokálního dolisování (bez LSC) má na rozdíl od Rm s LSC mírně vzrůstající charakter což znamená, že se zvyšující se hodnotou DAS roste Rm. Pohybují se i v nižších rozmezích cca od 80 MPa do 180 MPa. Mírné stoupání udává hodnota koeficientu spolehlivosti  $R^2$ = 0,096 a rovnice regresní křivky uvedená ve třetím řádku tabulky 4.7 na straně 61.

V nejnižších hodnotách meze kluzu cca od 0 MPa do 120 MPa se pohybuje křivka smluvní meze kluzu  $Rp_{0,2}$  bez lokálního dolisování (bez LSC). Tato křivka má klesající charakter s koeficientem spolehlivosti  $R^2$ = 0,051 a matematickým popisem rovnice regresní křivky v tabulce 4.7 na straně 61. Klesající charakter křivky tak udává, že mez kluzu s rostoucí hodnotou DAS klesá.





Graf 4.3 Závislost mechanických vlastností na ovalitě s u vzorků litých tlakově a tlakově s lokálním dolisováním

### 4.9.3 Popis grafu závislosti mechanických vlastností na ovalitě

Graf 4.3 znázorňuje závislost mechanických vlastností Rp<sub>0,2</sub> a Rm v MPa na ovalitě **s** [-] (kulatosti póru) zpracovaných do stejných dvou skupin jako v příchozích kapitolách. Hodnota ovality se u obou závislostí pohybuje přibližně ve stejné rozmezí od 0 do 1 proto zde nejsou vynášeny žádné další osy. Pro lepší orientaci jsou křivky opět označeny popiskami a odlišeny od sebe barvami, které jsou shrnuty do legendy napravo od grafu.

V grafu je viditelný prostor mezi četností hodnot skládajících se z naměřených hodnot Klocová 2008 a Jirků 2007 viz. příloha 5 spojených tak do jednoho tlakově litého s LSC (např. Rm).

Na rozdíl od předchozích grafů 4.1 a 4.2 se hodnoty obou skupin tlakově litých s LSC a tlakově litých bez LSC od sebe výrazně liší. Důvodem může být malý počet členů v soboru hodnot tlakově litých bez LSC, protože bylo čerpáno pouze ze vzorků Jirků 2007 (viz. příloha 5), který obsahuje jen čtyři hodnoty.

Závislost meze pevnosti Rm a smluvní meze kluzu  $Rp_{0,2}$  hodnot tlakově litých s LSC je velice podobný, obě křivky mají mírně klesající charakter. U meze pevnosti Rm křivka klesá cca z 230 MPa na 220 MPa s koeficientem spolehlivosti  $R^2$ = 0,055 a rovnicí regresní křivky popsané v první řádku tabulky 4.8 na straně 61. Stejně tak smluvní mez kluzu  $Rp_{0,2}$  klesá z hodnoty cca 160 MPa na 153 MPa s koeficientem spolehlivosti  $R^2$ = 0,011 a rovnice regresní křivky v tabulce 4.8. Z průběhu křivek tedy vyplývá, že mez pevnosti a smluvní mez kluzu se ze vzrůstající ovalitou mění nepatrně.

Avšak křivky meze pevnosti Rm a smluvní meze kluzu  $Rp_{0,2}$  hodnot tlakově litých bez LSC mají právě opačný průběh, který je v grafu 4.3 zkreslený nedostatkem hodnot v souboru. Jejich koeficienty spolehlivosti jsou pro Rm:  $R^2$ = 0,374 a pro  $Rp_{0,2}$ :  $R^2$ = 0,406 rovnice regresních křivek v tabulce 4.8 na straně 61.

-01	× //	
FSI	νι	Л

K názornějšímu popisu křivek ve výše uvedených grafech 4.1, 4.2, 4.3 byly zpracovány rovnice regresních křivek a jejich konstant (prvního, druhého členu) postupně do tabulek 4.6, 4.7, 4.8. Konstanty jsou označeny indexy podle toho, o jakou jde závislost viz. kapitola 4.6 Stanovení trendů vybraných závislostí.

Způsob lití skupiny		Rovnice regresní	Konstanty		
vzorků	Zavislost souboru	křivky	prvního členu	druhého členu	
tlakově lité s LSC	Rm = f (porezity)	y = -2,639+228,4	K5=228,4	K6=-32,639	
tlakově lité s LSC	Rp <sub>0,2</sub> = f (porezity)	y = 1,576x + 155,3	K7=155,3	K8=1,576	
tlakově lité bez LSC	Rm = f (porezity)	y = 12,92x - 6,718	K5=-6,718	K6=12,92	
tlakově lité bez LSC	Rp0,2 = f (porezity)	y = -3,800x + 141,7	K7=141,7	K8=-3,80	

Tab. 4.6 Rovnice regresních křivek a konstant pro graf č. 4.1 závislost mechanických vlastností na porezitě.

Způsob lití skupiny		Rovnice regresní	Konstanty		
vzorků	Závislost souboru	křivky	prvního členu	druhého členu	
tlakově lité s LSC	Rm = f (DAS)	y = -1,190x + 249,2	K3=249,2	K4=-1,190	
tlakově lité s LSC	$Rp_{0,2} = f(DAS)$	y = -0,496x + 167,6	K1=167,6	K2=-0,496	
tlakově lité bez LSC	Rm = f (DAS)	y = 2,577x + 93,29	K3=93,29	K4=2,577	
tlakově lité bez LSC	Rp0,2 = f (DAS)	y = -6,388x + 208,4	K1=208,4	K2=-6,388	

Tab. 4.7 Rovnice regresních křivek a konstant pro graf. č 4.2 závislost mechanických vlastností na DAS (dendrite arm sparing)

Způsob lití skupiny	Závislost	Rovnice regresní	Konstanty		
vzorků	souboru	křivky	prvního členu	druhého členu	
tlakově lité s LSC	Rm = f (s) ovality	y = -12,82x + 233,8	K9=233,8	K10=-12,82	
tlakově lité s LSC	$Rp_{0,2} = f(s)$	y = -4,445x + 159,8	K11=159,8	K12=-4,455	
tlakově lité bez LSC	Rm = f (s)	y = 936,3x - 587,3	K9=-578,3	K10=936,3	
tlakově lité bez LSC	Rp0,2 = f (s)	y = -3436x + 2662	K11=2662	K12=-3436	

Tab. 4.8 Rovnice regresních křivek a konstant pro graf č. 4.3 závislost mechanických vlastností na ovalitě s.

## 5. ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce bylo porovnat a prostudovat vzorky odlitků ze slitiny hliníku, které byly odlity tlakově nebo tlakově s lokálním dolisováním (LSC) K porovnávání bylo zapotřebí hodnot získaných ze závislosti mechanických vlastností na strukturních parametrech (porezita, ovalita, DAS). První část těchto hodnot byla použita z předchozích diplomových prací studentů Jirků, L.[12], Bergerová, K. [11] a druhá část byla zpracována v této diplomové práci. Celkový soubor hodnot obsahoval 40 členů, ze který pouze 12 členů připadalo na tlakově lité vzorky bez lokálního dolisování (bez LSC) od Bergerová K. [11] a Jirků, L.[12]

Při vyhodnocování vzorků obrazovou analýzou se prokázalo, že porezita má negativní vliv na mechanické vlastnosti jako je Rm, Rp<sub>0,2</sub>, A (tažnost), tj. se vzrůstajícím procentem porezity mírně klesají zmíněné mechanické vlastnosti. Při celkovém porovnávání porezity, spojením hodnot Rm a Rp<sub>0,2</sub> od všech zdrojů [11],[12],[15] do jednoho souboru v závislosti na porezitě, se z grafu 4.1 ukázalo:

- Hodnoty porezity u meze pevnosti Rm a Rp<sub>0,2</sub> s lokálním dolisováním (s LSC) se pohybují do 5%.
- Hodnoty porezity u meze pevnosti Rm a Rp<sub>0,2</sub> bez lokálního dolisování (bez LSC) se pohybují do 11%, kdy hodnota Rm klesá se zvyšujícím se procentem porezity a naopak hodnota Rp<sub>0,2</sub> stoupá, což může být způsobeno nedostatečným množství členů ve zkoumaném souboru.

Dalším vyhodnocováním pomocí obrazové analýzy strukturního parametru DAS se prokázalo, že měřené dendrity mají nepatrný vliv na mechanické vlastnosti. Po zpracování skupiny hodnot [12],[15] z grafu 4.2 vyplývá:

- Hodnoty meze pevnosti Rm s lokálním dolisováním stejně jako u porezity mírně klesají se zvyšující se hodnotou DAS a naopak hodnoty Rm bez lokálního dolisování (bez LSC) mají mírný stoupající charakter.
- U hodnot smluvních mezí kluzů Rp<sub>0,2</sub> s lokálním dolisováním s LSC je křivka konstantní a u meze kluzu Rp<sub>0,2</sub> bez LSC křivka klesá v závislosti na vrůstající hodnotou DAS, čemuž opět odpovídá malé množství zpracovávaných dat v soboru.

Posledním zkoumaným parametrem byla ovalita (parametr kulatosti póru), u které bylo pomocí obrazové analýzy zjištěno, že rozmezí hodnoty ovality **s** je od 0 do 1, kde z grafu 4.3 je možno podle odlišné čestnosti dvou zkoumaných souboru [12], [15] vidět, že hodnoty vzorků tlakově litých s lokálním dolisováním Jirků 2007 [12] se velice blíží ideálnímu tvaru póru, kouli.

FSI	VL	JT
_		-

Zatímco hodnoty ovality zpracované v této práci [15] se pohybují do 0,3 a póry se tak tvaru koule zdaleka nepřibližují.

- Hodnoty meze pevnosti Rm a Rp<sub>0,2</sub> s lokálním dolisováním (s LSC) mají přibližně konstantní charakter v závislosti na ovalitě.
- U hodnot meze pevnosti Rm a Rp<sub>0,2</sub> tlakově litých bez lokálního dolisování (bez LSC) je výsledný trend nereálný a je způsoben zřejmě malým množstvím vzorků v souboru.

Výsledkem je tedy zjištění, že vzorky lité s přítomností místního dotlačování dosahují vyšších pevností na úkor porezity, než vzorky lité tlakově. Další zjištění týkající se vzdálenosti sekundárních os dendritů je, že na jejich mechanické vlastnosti nemají znatelný vliv, z důvodu velmi nízkého výskytu dendritů v tlakově litých nemodifikovaných odlitcích. Stejně tak vliv ovality na pevnost tlakově litých vzorků s lokálním dolisováním není příliš znatelný a dá se považovat za zanedbatelný, což v tomto případě může být způsobeno malým množství dat ve zpracovávaném souboru.

DIPLOMOVÁ PRÁCE LIST 65 FSI VUT SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [1] Todte, M., Stroppe H., Honsel, Ch..: Giesserei – Praxis č.6 (2003), str. 263 - 269 Nogowiziv, B. : Slitiny pro lití pod tlakem a jejich vlastnosti, [2] Druckguss-Praxis, č.4 (2003), str. 164-168 Nováková I., Nová, I.: Struktura vysokotlakých odlitků ze slitin Al-Si, [3] Slévárenství (v tisku) 2008 [4] Vilčko, J., Dzugas, P.: Liatie s tuhnutím pod tlakom odlitkov zo zliatin typu Al-Si – úvod do problematiky technologie výroby vysokokvalitných odlitkov (část I). Slévárenství č.12 (1990), str. 499-504 Grígerová, T., Greguš, D., Kozel, Š.: Príspevok k štúdiu štruktúry [5] doeuetektického siluminu. In: Sborník z vědecké konference VŠB Ostrava 1990, str. 220-216 Stroppe, H.: Untersuchungen zum Elastizitätsvehalten von Grauguß, [6] Teoretická část, Vědecký časopis technické vysoké školy Magdeburg 10, č. 1/2 (1996), str. 159 – 173 Stroppe, H.,: Einfluß der Porosität auf die mechanischen Eigenschaten [7] von Gußiegierungen, Giessereiforschung č. 2 (2000), str. 58 – 60 [8] Schindelbacher, G. : Vliv pórovitosti na mechanické vlastnosti AlSi9Cu3 Giesserei – Praxis č.19 (1993), str. 381-192 [9] Roučka, J. a kol. : Aluminium 2007, str. 90 - 96 [10] Stroppe, H. a kol. : Optimalizace mechanických vlastností vysoce namáhaných odlitků s přímou kontrolou licího procesu, Slévárenství 5 – 6 (2002), str. 213 - 216 [11] Bergerová, K.: Hodnocení porezity u tlakově litých odlitků ze slitin Al, Diplomová práce VUT-FSI Brno, str. 86 - 112 [12] Jirků, L.:Hodnocení porezity u odlitků tlakově litých z Al slitin, Diplomová práce, VUT – FSI, Brno 2007

FSI VUT		DIPLOMOVA PRÁCE	LIST 66		
[13] Svoboda, J. Hodnocení porezity u odlitků tlakově litých z Al slitin. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. 105 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jaroslav Čech, CSc.					
14]	Leštící a brousící zařízení http://www.mth-hrazdil.cz/Templates/img/kompakt_big.jpg				
[15]	5] KLOCOVÁ, Petra. Hodnocení porezity u odlitků tlakově litých z Al slitin. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 66s., příloh. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jaroslav Čech, CSc.				

# SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha č. 1: Statistické vyhodnocení porezity v programu Mathcad
- Příloha č. 2: Statistické vyhodnocení ovality v programu Mathcad
- Příloha č. 3: Statistické vyhodnocení DAS v programu Mathcad
- Příloha č. 4: Tabulky porovnávaných hodnot
- Příloha č. 5: Grafy závislosti mechanických vlastností Rm, Rp<sub>0,2</sub>, A na porezitě
- Příloha č. 6: Grafy závislosti mechanických vlastností Rm, Rp<sub>0,2</sub>, A na DAS
- Příloha č.7: Grafy závislosti mechanických vlastností Rm, Rp<sub>0,2</sub>, A na ovalitě

# PŘÍLOHA 1

Statistické vyhodnocení porezity v programu Mathcad

# Vyhodnocení porezity

	(232)		(156)		(2.7)		(2.3)		(0.33)	) (	(0.23)
Rm :=	229		159	* A :=	2.7	Z :=	3.6		0.08		0.17
	231		166		1.2		2.0	Ppo :=	0.09	Ppr :=	0.11
	236		144		2.5		3.0		0.2		0.15
	234	Da	177		1.8		1.7		0.08		0.12
	252	Kp =	177		2.3		2.0		0.23		0.19
	205		143		2.7		2.6		0.3		0.36
	227		167		2.0		2.8		0.15		0.32
	234		153		2.4		2.7		0.22		0.39
	237		(146)	(4.0)		2.7		0.08	) (	0.42	

	( 0.33 )
	0.08
	0.09
	0.2
	0.08
	0.23
	0.3
	0.15
	0.22
וו ת	0.08
Pcelk :=	0.23
	0.17
	0.11
	0.15
	0.12
	0.19
	0.36
	0.32
	0.39
	0.42

### Setřídění souborů

Rm := sort(Rm)	Rp := sort(Rp)	$A \coloneqq sort(A)$	Z := sort(Z)
Ppo := sort(Ppo)	Ppr ≔ sort(Ppr)	Pcelk ≔ sort	(Pcelk)

### Aritmetrické průměry souborů:

x1 := mean(Rm)	x2 := mean(Rp)	x3 := mean(A)	x4 := mean(Z)
x1 = 231.7	x2 = 158.8	x3 = 2.43	x4 = 2.54
x5 := mean(Ppo)	x6 := mean(Ppr)	x9 := mean(1)	Pcelk)
x5 = 0.176	x6 = 0.246	x9 = 0.211	

### Směrodatné odchylky souborů:

s1 := stdev(Rm)	s2 := stdev(Rp)	s3 := stdev(A)	s4 := stdev(A)
s1 = 11.01	s2 = 12.065	s3 = 0.693	s4 = 0.693
s5 := stdev(Ppo)	s6 := stdev(Ppr)		
s5 = 0.09	s6 = 0.111		

s9 := stdev(Pcelk)s9 = 0.107

### Rozptyly souborů:

r1 := var(Rm)r2 := var(Rp)r3 := var(A)r4 := var(Z)r5 := var(Ppo)r6 := var(Ppr)r9 := var(Pcelk)

### Počet prvků v souboru naměřených hodnot:

 n1 := 10 n2 := 10 n3 := 10 n4 := 10 

 n5 := 10 n6 := 10 

 n9 := 20 

### Test na hrubé chyby - Grubbsův test

#### Test hrubé chyby veličiny - mez pevnosti - Rm:

$$T1_{Rm} := \frac{x1 - Rm_0}{s1}$$
  $T2_{Rm} := \frac{|Rm_9 - x1|}{s1}$   
 $T1_{Rm} = 2.425$   $T2_{Rm} = 1.844$ 

Tp pro 10 hodnot: Tp=2.294

Hodnota  $T1_{Rm}$  je vetší než hodnota Tp, proto je nutné ji z měřeného souboru vyřadit a daný soubor hodnot přepočítat.

$$\operatorname{Rmx} := \begin{pmatrix} 232 \\ 229 \\ 231 \\ 236 \\ 234 \\ 205 \\ 227 \\ 234 \\ 237 \end{pmatrix} *$$

Rmx := sort(Rmx)	s1x := stdev(Rmx)	n1x := 9
x1x := mean(Rmx)	s 1x = 9.154	r1x := var(Rmx)
$T1_{Rmx} := \frac{x1x - Rmx_0}{s1x}$	T2 <sub>Ri</sub>	$mx := \frac{\left  Rm_8 - x1x \right }{s  1x}$
$T1_{Rmx} = 2.67$	T2 <sub>Rn</sub>	nx = 0.825

Tp pro 9 hodnot: Tp=2.237

Hodnota  $T1_{Rmx}$  je vetší než hodnota Tp, proto je nutné ji z měřeného souboru vyřadit a daný soubor hodnot přepočítat.



```
Tp pro 8 hodnot: Tp=2.172
```

Hodnota T1<sub>Rmy</sub> je vetší než hodnota Tp, proto je nutné ji z měřeného souboru vyřadit a daný soubor hodnot přepočítat.

$$\operatorname{Rmy} 1 := \begin{pmatrix} 232 \\ 229 \\ 231 \\ 234 \\ 205 \\ 227 \\ 234 \end{pmatrix}$$

 Rmy 1 := sort(Rmy 1)
 s 1y1 := stdev(Rmy 1) n 1y1 := 7 

 xly1 := mean(Rmy 1) s 1y1 = 9.455 r 1y1 := var(Rmy 1) 

  $T1_{Rmy 1} := \frac{xly1 - Rmy1_0}{s1y1}$   $T2_{Rmy1} := \frac{\left|\frac{Rmy1_6 - xly1}{s1y1}\right|}{s1y1}$ 
 $T1_{Rmy1} = 2.372$   $T2_{Rmy1} = 0.695$ 



Hodnota  $T1_{Rmy1}$  je vetší než hodnota Tp, proto je nutné ji z mereného souboru vyradit a daný soubor hodnot prepocítat.

$$Rmy2 := \begin{pmatrix} 232 \\ 229 \\ 231 \\ 205 \\ 227 \\ 234 \end{pmatrix}$$

Rmy2 := sort(Rmy2)
$$s 1y2 := stdev(Rmy2)$$
 $n1y2 := 6$  $x1y2 := mean(Rmy2)$  $s 1y2 = 9.792$  $r1y2 := var(Rmy2)$  $T1_{Rmy2} := \frac{x1y2 - Rmy2_0}{s1y2}$  $T2_{Rmy2} := \frac{|Rmy2_5 - x1y2|}{s1y2}$  $T1_{Rmy2} = 2.179$  $T2_{Rmy2} = 0.783$ 

Tp pro 6 hodnot: Tp=1.996

Hodnota  $T1_{Rmy2}$  je vetší než hodnota Tp, proto je nutné ji z mereného souboru vyradit a daný soubor hodnot prepocítat.

$$Rmy3 := \begin{pmatrix} 232 \\ 229 \\ 231 \\ 205 \\ 227 \end{pmatrix}$$

Rmy3 := sort(Rmy3)s 1y3 := stdev(Rmy3)n 1y3 := 5x1y3 := mean(Rmy3)s 1y3 = 10.048r1y3 := var(Rmy3)

$$T1_{Rmy3} \coloneqq \frac{x1y3 - Rmy3_0}{s1y3} \qquad T2_{Rmy3} \coloneqq \frac{|Rmy3_4 - x1y3|}{s1y2}$$
$$T1_{Rmy3} \equiv 1.971 \qquad T2_{Rmy3} \equiv 0.735$$

Tp pro 6 hodnot: Tp=1.869

Hodnota  $T1_{Rmy3}$  je vetší než hodnota Tp, proto je nutné ji z mereného souboru vyradit a daný soubor hodnot prepocítat.

$$\operatorname{Rmy4} := \begin{pmatrix} 232\\ 229\\ 205\\ 227 \end{pmatrix}$$

Rmy4 := sort(Rmy4) s 1y4 := stdev(Rmy4) n 1y4 := 4 x1y4 := mean(Rmy4) s 1y4 = 10.686 r1y4 := var(Rmy4) T1<sub>Rmy4</sub> :=  $\frac{x1y4 - Rmy4_0}{s1y4}$  T2<sub>Rmy4</sub> :=  $\frac{|Rmy4_3 - x1y4|}{s1y2}$ T1<sub>Rmy4</sub> = 1.708 T2<sub>Rmy4</sub> = 0.894

Tp pro 5 hodnot: Tp=1.869

Dle tabulek je kritická hodnota Grubbsova testu T<sub>P</sub> větší než hodnota testovací veličiny  $T_{1}$ Rmy4. Proto s 95% spolehlivostí nezamítáme nulovou hypotézu. V tomto souboru se nevyskytují žádné hrubé chyby měření.

#### V soubrou hodnot Rm by došlo k vyřazení 6 souborů a proto soubory nevyřazujemea počítame s nim dál.

#### Test hrubé chyby veličiny - mez průtažnosti - Rp0,2:

$T1_{Rp} \coloneqq \frac{x2 - Rp_0}{s2}$	$T2_{Rp} \coloneqq \frac{\left Rp_8 - x2\right }{s2}$
$T1_{Rp} = 1.31$	$T2_{Rp} = 1.509$

Tp pro 10 hodnot: Tp=2.294

Dle tabulek je kritická hodnota Grubbsova testu T<sub>P</sub> 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 - tažnost - A:

$$T1_{A} := \frac{x_{3} - A_{0}}{s_{3}}$$

$$T2_{A} := \frac{\left|A_{9} - x_{3}\right|}{s_{3}}$$

$$T1_{A} = 1.775$$

$$T2_{A} = 2.266$$
Tp pro 10 hodnot: Tp=2.294

Dle tabulek je kritická hodnota Grubbsova testu T<sub>P</sub> 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 - kontrakce - Z:

$$T1_Z := \frac{x4 - Z_0}{s4}$$
  
 $T2_Z := \frac{|Z_9 - x4|}{s4}$   
 $T1_Z = 1.212$   
 $T2_Z := \frac{1}{s4}$ 

Tp pro 10 hodnot: Tp=2.294

Dle tabulek je kritická hodnota Grubbsova testu T<sub>P</sub> 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 - porezita u podélných vzorků - Ppo:

$$T1_{Ppo} := \frac{x5 - Ppo_0}{s5} \qquad T2_{Ppo} := \frac{\left| Ppo_9 - x5 \right|}{s5}$$
$$T1_Z = 1.212 \qquad T2_{Ppo} = 1.719$$

Tp pro 10 hodnot: Tp=2.294

Dle tabulek je kritická hodnota Grubbsova testu T<sub>P</sub> 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 - porezita u příčných vzorků - Ppr:

$T1_{\mathbf{Ppr}} := \frac{x6 - Ppr_0}{2}$	$T2_{\mathbf{Ppr}} := \frac{ \mathbf{Ppr}_9 - \mathbf{x}6 }{ \mathbf{Ppr}_9 - \mathbf{x}6 }$
s6	rpi s6
$T1_{Ppr} = 1.23$	$T2_{Ppr} = 1.574$

Tp pro 10 hodnot: Tp=2.294

Dle tabulek je kritická hodnota Grubbsova testu T<sub>P</sub> 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 porezita - Pcelk:

 $T1_{Pcelk} \coloneqq \frac{x9 - Pcelk_0}{s9} \qquad T2_{Pcelk} \coloneqq \frac{\left|\frac{Pcelk_{19} - x9}{s9}\right|}{s9}$  $T1_{Pcelk} = 1.23 \qquad T2_{Pcelk} = 1.962$ 

Tp pro 20 hodnot: Tp=2.623

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

# Test na normální rozdělení - Kolmogorovův test

#### Kolmogorovův test veličiny Rm:

$$i \coloneqq 0.. n1 - 1$$

$$kolm1_{i} \coloneqq \left| pnorm\left[ Rm_{1}, x1, s1 \right] - \frac{i+1}{n1} \right| \qquad kolm2_{i} \coloneqq \left| pnorm\left[ Rm_{1}, x1, s1 \right] - \frac{i}{n1} \right|$$

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

$$D = 0.235$$
  $D_{D} := 0.409$ 

Dle tabulek kritická hodnota pro Kolmogorovův test D<sub>P</sub> je větší než testovací veličina D. Proto s 95% můžeme konstatovat, že měřený soubor Rm má normální rozdělení.

#### Kolmogorovův test veličiny Rp0,2:

$$i \coloneqq 0.. n2 - 1$$

$$kolm1_i \coloneqq \left| pnorm[Rp_i, x2, s2] - \frac{i+1}{n2} \right| \qquad kolm2_i \coloneqq \left| pnorm[Rp_i, x2, s2] - \frac{i}{n2} \right|$$

D := max(stack(kolm1, kolm2))

D = 0.156  $D_P := 0.409$ 

Dle tabulek kritická hodnota pro Kolmogorovův test D<sub>P</sub> je větší než testovací veličina D. Proto s 95% můžeme konstatovat, že měřený soubor Rm má normální rozdělení.

10

#### Kolmogorovův test veličiny A:

$$i \coloneqq 0.. n3 - 1$$

$$kolm1_{i} \coloneqq \left| pnorm \left[ A_{i}, x3, s3 \right] - \frac{i+1}{n3} \right| \qquad kolm2_{i} \coloneqq \left| pnorm \left[ A_{i}, x3, s3 \right] - \frac{i}{n3} \right|$$

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

D = 0.248  $D_P := 0.409$ 

Dle tabulek kritická hodnota pro Kolmogorovův test D<sub>P</sub> je větší než testovací veličina D. Proto s 95% můžeme konstatovat, že měřený soubor Rm má normální rozdělení.

#### Kolmogorovův test veličiny Z:

$$i \coloneqq 0.. n4 - 1$$
$$kolm1_{i} \coloneqq \left| pnorm[Z_{i}, x4, s4] - \frac{i+1}{n4} \right| \qquad kolm2_{i} \coloneqq \left| pnorm[Z_{i}, x4, s4] - \frac{i}{n4} \right|$$

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

$$D = 0.154$$
  $D_P := 0.409$ 

Dle tabulek kritická hodnota pro Kolmogorovův test D<sub>P</sub> je větší než testovací veličina D. Proto s 95% můžeme konstatovat, že měřený soubor Rm má normální rozdělení.

#### Kolmogorovův test veličiny Pcelk:

i ≔ 0.. n9 – 1

$$\operatorname{kolm1}_{i} \coloneqq \operatorname{pnorm} \operatorname{Pcelk}_{i}, x9, s9 - \frac{i+1}{n9}$$
  $\operatorname{kolm2}_{i} \coloneqq \operatorname{pnorm} \operatorname{Pcelk}_{i}, x9, s9 - \frac{i}{n9}$ 

D := max(stack(kolm1, kolm2))

D = 0.129  $D_P := 0.294$ 

Dle tabulek kritická hodnota pro Kolmogorovův test D<sub>P</sub> je větší než testovací veličina D. Proto s 95% můžeme konstatovat, že měřený soubor Rm má normální rozdělení.

# Posouzení linearity všech souborů naměřených hodnot

Test na nulovou hodnotu koeficientu korelace veličin Rm a Ppo :



Kriticka hodnota testu na nulovou hodnotu koeficientu korelace obou souborů r<sub>p</sub> je menší než testovací veličina určená pomocí funkce corr. Proto s 95% spolehlivostí nezamítáme nulovou hypotézu, soubory veličin Rm a Ppo mají lineární závislost. Pro výraznější linearitu bychom museli mít naměřeno více hodnot.



Kriticka hodnota testu na nulovou hodnotu koeficientu korelace obou souborů r<sub>p</sub> je větší než testovací veličina určená pomocí funkce corr. Proto s 95% spolehlivostí zamítáme nulovou hypotézu, soubory veličin Rm a Ppr nemají lineární závislost.

. . . .

Test na nulovou hodnotu koeficientu korelace veličin Rm a Pcelk :



 $k = -2.448 \times 10^{-3}$ q = 0.778

Kriticka hodnota testu na nulovou hodnotu koeficientu korelace obou souborů r<sub>p</sub> je menší

než testovací veličina určená pomocí funkce corr. Proto s 95% spolehlivostí nezamítáme nulovou hypotézu, soubory veličin Rm a Pcelk mají lineární závislost.

Pro výraznější linearitu bychom museli mít naměřeno více hodnot.

# PŘÍLOHA 2

Statistické vyhodnocení ovality programem Mathcad

# Vyhodnocení ovality

1	(232)	١	$(1\pi\epsilon)$		( 2.7 )		(2.3)		(1.35)		(1.30)
	229		156	56 59 56 44	2.7		3.6		1.33		1.22
	231		159		1.2 2.5	2.0		1.27 1.20		1.32	
Rm := 23 23 25 20 20 22	236		166			3.0				1.41	
	234	D	144		1.8	8	1.7	q	1.25	q	1.30
	252	Rp :=	I// A :=	2.3	2.3   ∠ ≔	2.0	Spo :=	1.33	Spr :=	1.59	
	205		143	-3	2.7	2.6		1.28		1.22	
	227		167	2.0	2.0	2.8		1.33		1.43	
	234		2.4	2.7	- 	1.32		1.25			
	237)		146	I	4.0		2.7		1.32		(1.41)

	(1.35)
	1.30
	1.33
	1.22
	1.27
	1.32
	1.20
	1.41
	1.25
Scolk :-	1.30
SCEIK	1.33
	1.59
	1.28
	1.22
	1.33
	1.43
	1.32
	1.25
	1.32
	(1.41)

r9 := var(Scelk)

# Setřídění souborů

 $Rm := sort(Rm) \quad Rp := sort(Rp) \quad A := sort(A) \qquad Z := sort(Z)$  $Spo := sort(Spo) \qquad Spr := sort(Spr)$ 

Scelk := sort(Scelk)

# Aritmetrické průměry souborů:

x1 := mean(Rm)	x2 := mean(Rp)	x3 := mean(A)	x4 := mean(Z)
x1 = 231.7	$x^2 = 156.778$	x3 = 2.43	x4 = 2.54
$\mathbf{v}\mathbf{F}$ , $\mathbf{m}$ $\mathbf{c}$ $\mathbf{r}$			
$x_{2} := mean(Spo)$	$x_0 := mean(Spr)$		
x5 = 1.298	x6 = 1.345		
x9 := mean(Scelk)	x9 = 1.322		

# Směrodatné odchylky souborů:

s1 := stdev(Rm)	s2 := stdev(Rp)	s3 := stdev(A)	s4 := stdev(A)
s1 = 11.01	s2 = 10.993	s3 = 0.693	s4 = 0.693

 $s5 := stdev(Spo) \qquad s6 := stdev(Spr)$  $s5 = 0.044 \qquad s6 = 0.11$ 

s9 := stdev(Scelk)s9 = 0.087

### Rozptyly souborů:

 $r1 := var(Rm) \qquad r2 := var(Rp) \qquad r3 := var(A) \qquad r4 := var(Z)$  $r5 := var(Spo) \qquad r6 := var(Spr)$ 

# Počet prvků v souboru naměřených hodnot:

$n1 \coloneqq 10$	n2 := 9	n3 ≔ 10	$n4 \coloneqq 10$
n5 := 10	n6 := 10	n9 := 20	

# <u> Test na hrubé chyby - Grubbsův test</u>

# Test hrubé chyby veličiny - celková porezita - Scelk:

	(1.35)	
	1.30	
	1.33	
	1.22	
	1.27	
	1.32	
	1.20	
	1.41	
	1.25	
Scelkx :=	1.30	
	1.33	
	1.28	
	1.22	
	1.33	
	1.43	
	1.32	
	1.25	
	1.32	
	(1.41)	

Scelkx := sort(Scelkx)

x9x := mean(Scelkx) x9x = 1.307

s9x := stdev(Scelkx)

s9x = 0.063

r9x := var(Scelkx)

n9x := 19

$$T1_{\text{Scelkx}} \coloneqq \frac{x9x - \text{Scelkx}_0}{s9x} \qquad T2_{\text{Scelkx}} \coloneqq \frac{\left|\frac{\text{Scelkx}_{18} - x9x}{s9x}\right|}{s9x}$$
$$T1_{\text{Scelkx}} = 1.702 \qquad T2_{\text{Scelkx}} = 1.945$$

Tp pro 19 hodnot: Tp=2.600

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

### Test na normální rozdělení - Kolmogorovův test

#### Kolmogorovův test veličiny Scelk:

i := 0.. n9x - 1  $kolm1_i := \left| pnorm | Scelkx_i, x9x, s9x - \frac{i+1}{n9x} \right| \qquad kolm2_i := \left| pnorm | Scelkx_i, x9x, s9x - \frac{i}{n9x} \right|$ 

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

D = 0.149  $D_P := 0.294$ 

Dle tabulek kritická hodnota pro Kolmogorovův test D<sub>P</sub> je větší než testovací veličina D. Proto s 95% můžeme konstatovat, že měřený soubor Rm má normální rozdělení.

# PŘÍLOHA 3

# Statistické vyhodnocení DAS programem Mathcad



	(24.29)
	20.63
	21.93
	22.85
	24.49
	21.71
	18.75
	21.75
	20.14
DAScelk :=	22.02
	19.81
	21.16
	22.13
	18.91
	21.15
	20.87
	20.53
	18.46
	(19.43)

# 20

# Setřídění souborů

Rm := sort(Rm) Rp := sort(Rp) A := sort(A) Z := sort(Z)

DASpo := sort(DASpo) DASpr := sort(DASpr)

DAScelk := sort(DAScelk)

# Aritmetrické průměry souborů:

x1 := mean(Rm)x2 := mean(Rp)x3 := mean(A)x4 := mean(Z)x1 = 231.7x2 = 158.8x3 = 2.43x4 = 2.54

 $\begin{array}{ll} x5 := mean(DASpo) & x6 := mean(DASpr) \\ x5 = 21.856 & x6 = 20.272 \end{array}$ 

x9 := mean(DAScelk) x9 = 21.106

### Směrodatné odchylky souborů:

s1 := stdev(Rm)	s2 := stdev(Rp)	s3 := stdev(A)	s4 := stdev(A)
s1 = 11.01	s2 = 12.065	s3 = 0.693	s4 = 0.693

s5 := stdev(DASpo) s6 := stdev(DASpr)s5 = 1.674 s6 = 1.13

s9 := stdev(DAScelk)

s9 = 1.645

### Rozptyly souborů:

r1 := var(Rm)	r2 := var(Rp)	$r3 \coloneqq var(A)$	r4 := var(Z)
r5 := var(DASpo)	r6 ≔ var(DASpr)	r9≔ var(DAScel	k)

# Počet prvků v souboru naměřených hodnot:

 $\begin{array}{ll} n1 := 10 & n2 := 10 & n3 := 10 & n4 := 10 \\ n5 := 10 & n6 := 9 & n9 := 19 \end{array}$ 

## Test na hrubé chyby - Grubbsův test

#### Test hrubé chyby veličiny - celková porezita - DAScelk:

 $T1_{DAScelk} \coloneqq \frac{x9 - DAScelk_0}{s9} \qquad T2_{DAScelk} \coloneqq \frac{\left| DAScelk_{18} - x9 \right|}{s9}$  $T1_{DAScelk} = 1.609 \qquad T2_{DAScelk} = 2.058$ 

Tp pro 20 hodnot: Tp=2.600

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

# Test na normální rozdělení - Kolmogorovův test

# Kolmogorovův test veličiny DAScelk:

$$i := 0.. n9 - 1$$

$$kolm1_{i} := \left| pnorm \left[ DAScelk_{i}, x9, s9 \right] - \frac{i+1}{n9} \right| \qquad kolm2_{i} := \left| pnorm \left[ DAScelk_{i}, x9, s9 \right] - \frac{i}{n9} \right|$$

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

D = 0.109  $D_P := 0.294$ 

Dle tabulek kritická hodnota pro Kolmogorovův test D<sub>P</sub> je větší než testovací veličina D. Proto s 95% můžeme konstatovat, že měřený soubor Rm má normální rozdělení.

# Posouzení linearity všech souborů naměřených hodnot



### Test na nulovou hodnotu koeficientu korelace veličin Rm a DAScelk :

Kriticka hodnota testu na nulovou hodnotu koeficientu korelace obou souborů r<sub>p</sub> je větší než testovací veličina určená pomocí funkce corr. Proto s 95% spolehlivostí zamítáme nulovou hypotézu, soubory veličin Rm a DAScelk nemají lineární závislost.

# PŘÍLOHA 4

Tabulky porovnávaných hodnot

Tabulky všech hodnot použitých pro dílčí zpracování porezity

Tabulka hodnot Jirků 2007

Označ.	Část	Tmavá barevná část (kov) [%]			Světlá b	arevná čá	ást (póry) [%]
vzorku	vzorku	měření na vzorku			měření na vzorku		
		č.1	č.2	Průměr	č.1	č.2	Průměr
	podélný	99,37	-	99,37	6,63	-	6,63
11	příčný	90,2	-	90,2	9,8	-	9,8
	podélný	89,79	-	89,79	10,21	-	10,21
12	příčný	95,14	97,23	96,19	4,86	2,77	3,82
	podélný	97,22	-	97,22	2,78	-	2,78
21	příčný	98,32	97,85	98,09	1,68	2,15	1,915
	podélný	95,93	-	95,93	4,07	-	4,07
22	příčný	98,52	98,59	98,56	1,48	1,41	1,445
	podélný	99,27	-	99,27	0,73	-	0,73
31	příčný	99,5	-	99,5	0,5	-	0,5
	podélný	97,99	-	97,99	2,01	-	2,01
32	příčný	97,81	-	97,81	2,19	-	2,19
	podélný	98,1	-	98,1	1,9	-	1,9
41	příčný	95,78	95,88	95,83	4,22	4,12	4,17
	podélný	99,31	-	99,31	0,69	-	0,69
42	příčný	99,2	98,95	99,08	0,8	1,05	0,93
	podélný	94,94	-	94,94	5,06	-	5,06
51	příčný	95,91	96,49	96,2	4,09	3,51	3,8
	podélný	96,14	-	96,14	3,86	-	3,86
54	příčný	94,76	95,37	95,07	5,24	4,63	4,94
	podélný	99,36	-	99,36	0,64	-	0,64
71	příčný	99,12	99,17	99,15	0,88	0,83	0,86
	podélný	99,18	-	99,18	0,82	-	0,82
74	příčný	99,93	99,91	99,92	0,07	0,09	0,08
	podélný	99,5	-	99,5	0,5	-	0,5
82	příčný	99,16	99,5	99,33	0,84	0,5	0,67
	podélný	99,51	-	99,51	0,49	-	0,49
84	příčný	99,54	99,56	99,55	0,46	0,44	0,45

Pozn.: červeně označené hodnoty označují skupinu vzorků tlakově litých s lokálním dolisováním a zbylé hodnoty patří do skupiny druhé tlakově lité bez LSC

		Prům hod porezity	R <sub>n0.2</sub>	Rm	Δ	7
Číslo vzrorku	Řez	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
	podélný	0.33	[ u]	[ 0]	[/0]	[,0]
24	příčný	0,23	156	232	2,7	2,3
	podélný	0,08				
33	příčný	0,17	159	229	2,7	3,6
	podélný	0,09				
34	příčný	0,11	166	231	1,2	2
	podélný	0,2				
43	příčný	0,15	144	236	2,5	3
	podélný	0,08				
61	příčný	0,12	177	234	1,8	1,7
	podélný	0,23				
64	příčný	0,19	177	252	2,3	2
	podélný	0,3				
72	příčný	0,36	143	205	2,7	2,6
	podélný	0,15				
73	příčný	0,32	167	227	2	2,8
	podélný	0,22				

153

146

234

237

2,4

4

2,7

2,7

Tabulka hodnot porezity Klocová 2008

příčný

podélný příčný

81

83

Pozn.: všechny hodnoty jsou tlakově lité s lokálním dolisováním (s LSC)

0,09

0,08

0,42

Poř.	Označení	Тур			Rp <sub>0,2</sub>	Rm	Α	Z	DAS prům.	Prům.	Porezita	Ovalita	
číslo	vzorku	vzorku	Poznámka	Žíháno	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[µm]	odchylka	[%]	"S"	$\frac{1}{s}$
1	11 - ро	blok motoru		20	100	100	0.2	0.2	19,49	2,90	6,63	0,74	1,35
2	11 - př	tlak. lití		ne	109	109	0,2	0,3	20,67	3,03	9,80	0,77	1,30
3	12 - ро	blok motoru		ne	106	108	0.3	0.7	19,11	2,66	10,21	0,75	1,33
4	12 - př	tlak. lití		ne	100	100	0,5	0,7	19,06	2,78	3,82	0,82	1,22
5	21 - ро	blok motoru	+LSC	ne	190	227	11	2.0	20,27	3,39	2,78	0,79	1,27
6	21 - př	tlak. lití		ne	100		.,.	2,0	22,15	3,14	1,92	0,76	1,32
7	22 - ро	blok motoru	+LSC	ne	153	224	1.7	2.3	19,18	3,34	4,07	0,83	1,20
8	22 - př	tlak. lití					.,.	_,-	-	-	1,45	0,71	1,41
9	31 - ро	blok motoru	+LSC	ano	150	232	2.6	3.6	23,95	2,50	0,73	0,80	1,25
10	31 - př	tlak. lití						.,.	19,92	3,37	0,50	0,77	1,30
11	32 - ро	blok motoru	+LSC	ano	142	202	1,7	1,3	22,69	4,03	2,01	0,75	1,33
12	32 - př	tlak. lití							20,58	2,87	2,19	0,63	1,59
13	41 - po	blok motoru	+LSC	ano	155	235	2,7	3,6	25,54	4,20	1,90	0,78	1,28
14	41 - př	tlak. lití	obrobeno						21,50	3,98	4,17	0,82	1,22
15	42 - po	blok motoru	+LSC	ano	150	175	1,0	1,6	20,92	3,90	0,69	0,75	1,33
16	42 - pr	tlak, liti	obrobeno						19,51	4,18	0,93	0,70	1,43
17	51 - po	blok motoru		ne	91	113	0,3	0,7	23,16	4,35	5,06	0,76	1,32
18	51 - pr	tlak. liti							20,60	3,28	3,80	0,80	1,25
19	54 - po	blok motoru		ne	0	139	0,2	0,2	20,88	3,96	3,86	0,76	1,32
20	54 - pr	tiak. Iiti							19,83	3,83	4,94	0,71	1,41
21	71 - po		+LSC	ano	167	239	2,3	2,3	23,27	5,36	0,64	0,81	1,23
22	71 - pi	liak. III							21,21	4,40	0,00	0,75	1,33
23	74 - p0	tick litt	+LSC	ano	160	236	2,3	2,6	25,00	0,0∠ 4,12	0,02	0,61	1,04
24	82 - pp	blok motoru	1150						23.33	3.06	0,00	0,50	1,79
25	82 - př	tlak lití	obroheno	ano	150	222	2,1	2,3	23,33	3.17	0,50	0.81	1.23
20	84 - po	blok motoru							22,20	3.59	0.49	0.81	1.23
29	84 - pč	tlak lití	obrobono	ano	149	243	3,0	3,3	10.64	2.02	0,45	0.05	1.05
20	04 - pr	uak. ilu	Onedoldo						19,64	3,23	0,45	0,95	1,05

Tabulky všech hodnot použitých pro dílčí zpracování ovality, porezity, DAS Jirků 2007 (pozn.:červeně označené hodnoty jsou tlakově lité s LSC)

Číslo vzorku	Označení vzorku	DAS [µm]	Směrodatná odchylka s² [μm]	Medián [µm]	Mez pevnosti v tahu R <sub>m</sub> [MPa]	Směrodatná odychlka s
1	AS	19,2	13,3	18,5	217	3,65
3	BS	26,2	21,5	27,8	207	4,64
5	CS	21,1	19,2	21,3	236	4,38
7	DS	27,1	24,2	28	217	4,92
9	ES	26,8	24,8	26,9	207	4,98
11	FS	25,7	25	26,9	236	5,00
13	GS	24,1	17,2	23,4	179	4,15
15	HS	26	27	24,3	179	5,20
2	AT	20,5	47,2	17,3	166	6,87
4	BT	25,6	18,3	26,2	166	4,28
6	СТ	17,9	13,4	16,8	166	3,66
8	DT	19,3	24,8	19,3	166	4,98
10	ET	23,3	23,9	24	166	4,89
12	FT	20,6	15,4	19,6	166	3,92
14	GT	27	11,5	27,3	166	3,39
16	HT	26	15,5	25,9	166	3,94

Použité hodnoty z diplomové práce K. Bergeorvé 2005 k vyhodnocení DAS

Pozn.: červeně označené hodnoty označují skupin vzorků tlakově litých s lokálním dolisováním (s LSC)

Značení	Řez	Kulatost	Prodloužení Elongation	Tvarový (Shape)	Parametr	R <sub>m</sub>	
VZIOIRU		ophenoty	Liongation	factor	kulatosti	[MPa]	
24	podélný	0,35	2,04	0,28	3,57	232	
24	příčný	0,31	1,85	0,30	3,33	202	
33	podélný	0,34	2,21	0,21	4,76	220	
	příčný	0,35	1,97	0,31	3,23	225	
34	podélný	0,42	1,61	0,10	10,00	231	
34	příčný	0,35	2,32	0,18	5,56	ametr $R_m$ ttosti       [MPa]         57       232         33       232         76       229         23       231         56       236         76       236         41       236         41       234         67       252         556       205         22       227         43       234         70       234         25       14         41       237	
43	podélný	0,31	2,06	0,21	4,76	236	
43	příčný	0,38	1,80	0,71	1,41	200	
61	podélný	0,37	1,90	0,24	4,17	234	
01	příčný	0,33	1,97	0,31	3,23	234	
64	podélný	0,36	1,75	0,15	6,67	252	
	příčný	0,35	2,38	0,63	1,59	202	
72	podélný	0,37	1,96	0,18	5,56	205	
	příčný	0,68	2,01	0,82	1,22	200	
73	podélný	0,36	2,09	0,16	6,25	227	
10	příčný	0,32	2,29	0,70	1,43	221	
81	podélný	0,34	2,21	0,27	3,70	234	
	příčný	0,39	1,76	0,80	1,25	234	
83	podélný	0,46	1,67	0,14	7,14	237	
	příčný	0,30	2,06	0,71	1,41	231	

Tabulka hodnot z diplomové práce Klocová 2008 k vyhodnocení ovality

Pozn.: všechny hodnoty jsou tlakově lité s lokálním dolisováním.

Označení vzorku	Část vzorku	DAS [µm]	Směrodatná odchylka	R <sub>p0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A [%]
	podélný	24.29	5.82			[/0]
24	příčný	19,81	3,12	156	232	2,7
22	podélný	20,63	5,18			,
33	příčný	21,16	4,35	159	229	2,7
24	podélný	21,93	4,76			
54	příčný	22,13	3,83	166	231	1,2
42	podélný	22,85	5,30			
43	příčný			144	236	2,5
61	podélný	24,49	6,09			
01	příčný	18,91	5,25	177	234	1,8
64	podélný	21,71	5,35			
04	příčný	21,15	4,92	177	252	2,3
72	podélný	18,75	4,42			
12	Část vzorku         DAS [μm]         Směrodatná odchylka         Rp0,2           podélný         24,29         5,82         [MPa]           příčný         19,81         3,12         156           podélný         20,63         5,18         159           podélný         21,16         4,35         159           podélný         21,93         4,76         166           příčný         22,85         5,30         166           podélný         22,85         5,30         144           podélný         24,49         6,09         144           podélný         21,71         5,35         177           podélný         21,71         5,35         177           podélný         21,71         5,35         177           podélný         21,75         4,92         177           podélný         18,75         4,42         143           příčný         20,87         3,95         143           podélný         21,75         5,27         143           podélný         20,53         4,56         167           podélný         20,14         4,01         153           příčný	143	205	2,7		
73	podélný	21,75	5,27			
13	příčný	20,53	4,56	167	227	2
81	podélný	20,14	4,01			
01	příčný	18,46	4,25	153	234	2,4

Použité hodnoty diplomové	práce Klocová 2008 vhodnocení DAS
---------------------------	-----------------------------------

Pozn.: všechny hodnoty jsou tlakově lité s lokálním dolisováním (s LSC)

# PŘÍLOHA 5

Grafy v závislosti mechanických vlastnosti Rp<sub>0,2</sub>, Rm, A na porezitě, DAS a ovalitě



Graf závislosti mechanických vlastností Rp0,2 , Rm a tažnosti A na porezitě získaných na vzorcích s lokálním dolisováním(LSC) 27

PŘÍLOHA 5

![](_page_96_Figure_1.jpeg)

Graf závislosti mechanických vlasností Rp0,2, Rm a tažnosti A na porezitě získaných na vzorcích tlakově litých bez LSC (lokalní dolisování)

# Rovnice a konstanty regresních přímek grafu celkové závislosti (TL+LSC) na porezitě

			Konstanty		
Způsob lití skupiny vzorků	Závislost souboru	křivky	prvního členu	druhého členu	
TL+LSC Klocová 2008	Rp <sub>0,2</sub> = f (porezity)	y = -42,64x + 167,1	K7=167,1	K8=-42,64	
TL+LSC Jirků 2007	Rp <sub>0,2</sub> = f (porezity)	y = 1,956x + 153,8	K7=153,8	K8=1,956	
TL+LSC Klocová 2008	Rm = f (porezity)	y = -35,50x + 238,3	K5=235,3	K6=-35,5	
TL+LSC Jirků 2007	Rm = f (porezity)	y = -0,698x + 224,4	K5=224,4	K6=-0,698	
TL+LSC Klocová 2008	A = f(porezity)	y= -0,129x + 2,230	K13=2,23	K14=-0,13	
TL+LSC Jirků 2007	A = f(porezity)	y = 3,391x + 1,705	K13=1,705	K14=3,391	

Tabulka patřící ke grafu na straně 27.

Rovnice a konstanty regresních přímek grafu celkové závislosti TL na porezitě

Zoůsob lití skupinu			Konstanty		
vzorků	Závislost souboru	kovnice regresni křivky	prvního členu	druhého členu	
TL Jirků 2007	Rp0,2 = f (porezity)	y = 8,271x + 26,74	K7=26,74	K8=8,271	
TL Jirků 2007	Rm = f (porezity)	y = -2,289x + 131,0	K5=131,0	K6=-2,289	
TL Jirků 2007	A = f(porezity)	y = -0,002x + 0,264	K13=0,264	K14=-0,002	

Tabulka patřící ke grafu na straně 28.

![](_page_97_Figure_0.jpeg)

Rpo.2 [MPa], Rm [MPa]

PŘÍLOHA 5

29

![](_page_98_Figure_1.jpeg)

Graf závislosti mechanických vlastností meze pevnosti na DAS získaných
na vzorcích tlakově litých bez lokálního dolisování (bez LSC)

hodnoty	Rm [MPa]
Bergerová 2005	
Jirků 2007	

Daviata a	I como to materia	nomnonich		anaf	aalleavé			
Rovnice a	KONSTANTV	represnich	nrimek.	prain	CEIKOVE	ZAVISIOST	11+150	na DAN
novince a	Ronstanty	1 CBI COINCII	prince	Bruru	centove	20103030	12.200	110 07 13

		Devenies as second	Konstanty		
Způsob lití skupiny vzorků	Závislost souboru	kovnice regresni křivky	prvního členu	druhého členu	
TL+LSC Jirků 2007	Rm = f (DAS)	y = 4,021x + 132,4	K3=132,4	K4=4,021	
TL+LSC Bergerová 2005	Rm = f (DAS)	y = -2,413x + 268,9	K3=268,9	K4=-2,413	
TL+LSC Klocová 2008	Rm = f (DAS)	y = 4,185x + 141,1	K3=141,1	K4=4,185	
TL+LSC Jirků 2007	Rp0,2 = f (DAS)	y = -1,538x + 191,4	K1=191,4	K2=-1,538	
TL+LSC Klocová 2008	Rp0,2 = f (DAS)	y = 1,321x + 128,2	K1=128,2	K2=1,321	
TL+LSC Jirků 2007	A = f(DAS)	y = 0,225x - 3,048	K15=-3,048	K16=0,225	
TL+LSC Klocová 2008	A = f(DAS)	y = 0,001x + 2,474	K15=2,474	K16=0,001	

Tabulka patřící ke grafu na straně 29.

Rovnice a konstanty regresních přímek grafu celkové závislosti TL na DAS

Zoůsob lití skupiny			Konstanty		
vzorků	Závislost souboru	křivky	prvního členu	druhého členu	
TL Jirků 2007	Rm = f (DAS)	y = 1,802x + 80,01	K3=80,1	K4=1,80	
TL Bergerová 2005	Rm = f (DAS)	y = -3E-14x + 166	-	-	

Tabulka patřící ke grafu na straně 30.

Graf závislosti mechanických vlastností Rp0,2, Rm a tažnosti A na ovalitě s získaných na vzorcích s lokálním dolisováním (s LSC)

![](_page_99_Figure_1.jpeg)

PŘÍLOHA 5

31

![](_page_100_Figure_1.jpeg)

Graf závislosti mechanických vlastností Rp0,2, Rm a tažnosti A na ovaltině s získaných na vzorcíh bez lokálního dolisováni (bez LCS)

Rovnice a konstanty regresních přímek grafu závislosti TL+LSC na ovalitě

Způsob lití skupiny vzorků	Závislost souboru	Rovnice regresní křivky	Konstanty	
			prvního členu	druhého členu
TL+LSC Klocová 2008	Rm = f (s)	y = -8,041x + 233,2	K9=233,2	K10=-8,041
TL+LSC Klocová 2008	$Rp_{0,2} = f(s)$	y = -29,89x + 164,6	K11=164,6	K12=-28,29
TL+LSC Jirků 2007	Rm = f (s)	y = 20,29x + 207,5	K9=207,5	K10=20,29
TL+LSC Jirků 2007	Rp0,2 = f (s)	y = -13,28x + 167,0	K11=167,0	K12=-13,28
TL+LSC Klocová 2008	A= f (s)	y = 1,452x + 2,148	K17=2,148	K18=1,452
TL+LSC Jirků 2007	A = f (s)	y = 0,497x + 1,659	K17=1,659	K18=0,497

Tabulka patřící ke grafu na straně 31.

Rovnice a konstanty regresních přímek grafu závislosti TL+LSC na ovalitě

Způsob lití skupiny vzorků	Závislost souboru	Rovnice regresní křivky	Konstanty	
			prvního členu	druhého členu
TL Jirků 2007	Rm = f (s)	y = 936,3x - 587,3	K9=-587,3	K10=936,3
TL Jirků 2007	$Rp_{0,2} = f(s)$	y = -3436x + 2662	K11=2662	K12=-3436
TL Jirků 2007	A = f (s)	y = 1,818x - 1,118	K17=-1,118	K18=1,818

Tabulka patřící ke grafu na straně 32.