

Slévárenská technologie pístů pro výrobu spalovacích motorů

Bakalářská práce

Studijní program:

B2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojní inženýrství

Autorpráce:

Dan Konečný

Vedoucí práce:

prof. Ing. Iva Nová, CSc.

Katedra strojírenské technologie





Zadání bakalářské práce

Slévárenská technologie pístů pro výrobu spalovacích motorů

Jméno a příjmení: **Dan Konečný**
Osobní číslo: S18000340
Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojní inženýrství
Zadávací katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: **2020/2021**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte s účelem pístu spalovacího motoru.
2. Zaměřte se na materiál a slévárenskou výrobu pístů spalovacích motorů.
3. Podle možností na KSP, FS TUL proveďte metalografické hodnocení, popř. i měření tvrdosti pístu spalovacího motoru.
4. Zhodnoťte dosažené poznatky a formulujte dílčí závěry.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování práce:

Jazyk práce:

cca 30 stran textu

tištěná/elektronická

Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] BEROUN, S., PÁV, K. Vybrané statě z vozidlových spalovacích motorů. Skripta FSTU v Liberci, 2013.
- [2] RAUCHER, J. Vozidlové motory. [Skripta]. Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, 2005.
- [3] MICHNA Š. et al. Encyklopedie hliníku, Adin s.r.o., Prešov, 2005.
- [4] PECHOUT, M. Spalovací motory - základní přehled. [Skripta]. ČZU Praha 2019.
- [5] Články v odborných časopisech
- [6] Technické materiály firmy Kolbenschmidt nebo Almet, atd.

Vedoucí práce:

prof. Ing. Iva Nová, CSc.
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce:

15. listopadu 2020

Předpokládaný termín odevzdání: 15. května 2022

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 15. listopadu 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

17. června 2021

Dan Konečný

Anotace

Bakalářská práce se zabývá účelem pístu spalovacího motoru, jeho materiálem a vhodnou slévárenskou technologií k vytvoření správné jemnozrné a kompaktní struktury. V teoretické části práce je uveden účelem pístu spalovacích motorů, jejich materiálem a charakteristika vhodné slévárenské technologie. Tato technologie zabezpečuje kompaktnost materiálu pístu a vytvoření jemnozrné struktury. Experimentální část práce je zaměřena na sledování struktury a tvrdosti dvou druhů pístů, z materiálu KS 1275 (AlSi12NiMg) a KS 1295 (AlSi12Cu4Ni2Mg). Struktura byla sledována pomocí světelné mikroskopie. Pro měření tvrdosti byla použita Brinellova metoda.

V závěru práce jsou shrnuty dílčí poznatky. Pro výrobu pístů je výhodná technologie gravitačního lití do kovových forem.

Klíčová slova: píst spalovacích motorů, slitiny hliníku AlSi12NiMg a AlSi12Cu4Ni2Mg. gravitační lití, mikrostruktura, tvrdost.

Annotation

The bachelor thesis deals with the purpose of the internal combustion engine piston, their material and suitable foundry technology to create the right fine grain and compact structure. The theoretical part of the work presents the purpose of the piston of internal combustion engines, their material and characteristics of suitable foundry technology. This technology ensures the compactness of the piston material and the creation of a fine-grained structure. The experimental part of the work is focused on monitoring the structure and hardness of two types of pistons, made of KS 1275 (AlSi12NiMg) and KS 1295 (AlSi12Cu4Ni2Mg). The structure was observed by light microscopy. The Brinell method was used to measure hardness.

At the end of the work are summarized partial findings. Gravity casting technology into metal moulds is advantageous for the production of pistons.

Keywords: piston of internal combustion engines, aluminium alloys AlSi12NiMg and AlSi12Cu4Ni2Mg. gravity casting, microstructure, hardness.

Poděkování:

Rád bych tímto poděkoval paní prof. Ing. Ivě Nové, CSc., jež mi byla vřele nápomocná při zhotovení práce a pomohla mi nahlédnout do problematiky, kterou se práce zabývá. Také bych chtěl poděkovat své rodině a nejbližším, kteří mě podporovali po celou dobu studia. V neposlední řadě bych poděkoval kolegyním studijního oddělení z oddělení pro vazbu bakalářské práce za skvělou spolupráci a rady během studia.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	8
1. ÚVOD.....	10
2. REŠERŽNÍ ČÁST PRÁCE.....	11
2.1 Charakteristika pístu spalovacího motoru.....	11
2.1.1 Základní úlohy a části pístu spalovacího motoru.....	11
2.1.2 Namáhání pístu spalovacích motorů.....	12
2.1.3 Materiál pístů spalovacích motorů.....	14
2.2 Technologie a zpracování pístů spalovacích motorů.....	16
2.2.1 Gravitační lití slitin hliníku do kovových forem.....	16
2.2.2 Technologie kování pístů ze slitin hliníku.....	19
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE.....	22
3.1 Charakteristika a výroba pístů spalovacích motorů.....	22
3.2 Použité slévárenská formy.....	24
3.3 Metalurgická příprava taveniny a výroba odlitků.....	25
3.3.1 Metalurgická příprava taveniny.....	25
3.3.2 Výroba odlitků pístů spalovacích motorů.....	25
3.4 Sledování kompaktnosti a makrostruktury stěn vyrobených pístů.....	26
3.5 Sledování mikrostruktury odlitků pístů.....	27
3.5.1 Vyhodnocení mikrostruktury sledovaných pístů spalovacích motorů.....	33
4. DISKUSE VÝSLEDKŮ.....	40
5. ZÁVĚR.....	42
6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	44

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

% – procenta/procento

ρ – hustota taveniny [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

μ – mikro [10^{-6} m]

$^{\circ}\text{C}$ – stupeň Celsia

atd – a tak dále

cca – přibližně/cirka

D – průměr kuličky [m]

EDX – Energiově disperzní spektroskopie

F – zátěžná síla [N]

g – tíhové zrychlení 9,81 [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]

h – výška sloupce taveniny ve formě [m]

HBS – označení tlakové zkoušky dle Brinella se zakalenou ocelovou kuličkou

HBW – označení tlakové zkoušky dle Brinella s kuličkou ze slinutých karbidů

hmot – hmotnostní

K – Kelvin

k – materiálový koeficient [-]

kg – kilogram

KS – Kolbenschmidt

m – metr

N – Newton [$\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]

např – například

P_h – hydrostatický tlak [Pa]

Pa – Pascal [$\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$; $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$]

s – čas [s]

s – směrodatná odchylka [HBW]

SRN – Spolková republika Německo

tj – to je

tzv – takzvaně

VEB – Volkseigener Betrieb

\bar{x} – aritmetický průměr tvrdosti [HBW]

v – variační koeficient [%]

1. ÚVOD

Píst spalovacích motorů patří mezi nejdůležitější a nejvíce zatížené součásti spalovacích motorů, se kterými se nespočetně setkáváme v běžném životě. Jelikož spalovací motory naleznou široké využití v průmyslové i osobní dopravě, poptávka spojená s tímto trendem je napříč všemi sektory příznivá. Kvůli masivnímu trhu osobních, rodinných, sportovních a luxusních automobilů i jiných dopravních prostředků je kladen veliký důraz na efektivitu a kvalitu nejenom údržby součástí spalovacích motorů, ale i na jejich samotnou výrobu.

Výroba pístů pro spalovací motory je problematikou, kterou se lidstvo zabývá více než 140 let. Základní kámen pro toto odvětví položil známý Nicolaus Otto s jeho čtyřtákním motorem se zvýšeným kompresním poměrem, jemuž se začalo říkat „Ottův motor“. Od tohoto milníku jsme již pokročili natolik, že dnešní výrobní technologie součástí spalovacích motorů jsou na velmi vysoké úrovni.

Metod výroby a technologií pro výrobu pístů spalovacích motorů je veliká škála. Jako velmi vhodná technologie se projevuje technologie gravitačního lití s vyšším ochlazovacím účinkem forem, díky čemuž dochází k vytvoření vhodné struktury odlitku a potřebným mechanickým vlastnostem.

V teoretické části bakalářské práce je přiblížen účel pístu ve spalovacích motorech, popsán vhodný materiál pro jejich výrobu a také popsána samotná technologie gravitačního lití a technologie tváření pístů. Následně jsou v experimentální části provedena metalografická hodnocení materiálu a měření tvrdosti pístu spalovacího motoru.

Cílem řešení této bakalářské práce je zaměřit se na sledování kvality stěn pístů, hodnocení struktury pístů a následné provedení testu tvrdosti. Pozorované písty byly vyrobeny gravitačním litím slitiny hliníku do kovové formy.

Průběžné řešení bakalářské práce bylo ovlivněno koronavirovou pandemií.

2. REŠERŽNÍ ČÁST PRÁCE

2.1 Charakteristika pístu spalovacího motoru

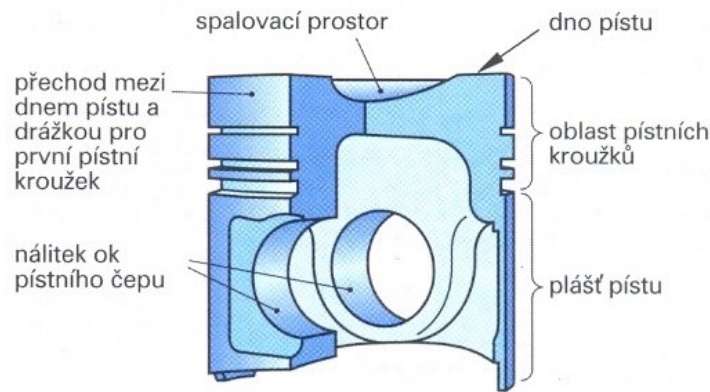
Píst je jedna z nejvíce mechanicky i tepelně zatížených součástí celého spalovacího motoru. Z hlediska času je vystaven velice proměnlivým tlakům, což má za následek vysoké špičkové hodnoty (u zážehových motorů 4 až 6 MPa při normálním průběhu hoření a s možností výrazného lokálního zvýšení při výskytu detonací, u přeplňovaných vznětových motorů 9 až 14 MPa). Obdobně to je i s teplotami, kde dochází k jejich výrazným výkyvům uvnitř válce (od 350 až do 2800 K u zážehových motorů a od 350 do 2200 K u přeplňovaných vznětových motorů). Zmíněné mechanické namáhání pístu způsobují setrvační síly (obrácené působení než od tlaku plynů) a to je jedním z důvodů, proč se zejména u rychloběžných automobilových motorů klade důraz na požadavek nízké hmotnosti pístu (nižší hmotnost má za následek nižší mechanické namáhání součástí), [1].

2.1.1 Základní úlohy a části pístu spalovacího motoru

Jak uvádí BEROUN [1], píst má zejména tři důležité úlohy. Za prvé je to v podstatě těsnění, které těsní kompresy a spalovací síly ve spalovacím motoru. Druhou funkcí pístu je ta, že píst funguje prakticky jako ložisko, jež zatěžujeme spalovacím procesem a následně je nuceno toto zatížení přenášet přes spojovací tyč, ojnici až na klikovou hřídel. Jeho třetí a zároveň poslední funkce je ta, že píst slouží jako vodič tepla, který přenáší část tohoto tepla vytvořeného ve válci ven do vnějšího prostředí. To ve skutečnosti činí téměř 80 % tepla, které je odváděno pryč za pomoci pístních kroužků, [2].

Píst je tvarově komplikovaná součást, a tudíž je možné ho rozdělit na sedm částí. **Horní část pístu** neboli hlava, někdy nazývána koruna, má za práci absorbovat část tepla z procesu spalování a přenést sílu vzniklou při procesu spalování. To má za následek, že hlava pístu je druhá nejteplejší část motoru hned po zapalovací svíčce a je nutné tomu přizpůsobit i tloušťku hlavy (poměrně tlustá), aby nápor tepla vydržela. Další část pístu tvoří místo, kde jsou **drážky pro pojistné kroužky**. Jejich rozmístění je různé a odvíjí se od konstrukce každého motoru a jeho parametrů. Samotné pojistné kroužky pak tvoří **třetí část pístu**. Pístní kroužky jsou pružné a vyráběné především z litiny s lupínkovým grafitem (lepší mazání a podmínky tření). Další (čtvrtou a pátou) část tvoří **otvor pro pístní čep a čep samotný**. Ten tvoří spojení pístu a **ojnice** (šestá část) a zajišťuje (díky nesouososti se středem pístu) jejich menší namáhání při rázovém namáhání, a navíc

odstraňuje klepání pístu. Z důvodu přenosu velkého namáhání může být tato část nejtlustší na celém pístu (společně s hlavou). Poslední část pístu se pak nazývá **plášť pístu** a je to nosná část pístu. Z důvodu možného přímého dotyku se stěnou válce a převádění energie spalování během pracovního zdvihu a zatížení komprese se jedná o součást nejnáročnější na mazání, [2]. Na obr. 2-1 je schéma řezu pístu spalovacího motoru, [4].



Obr. 2-1 Schéma pístu spalovacího motoru s vyznačením jednotlivých jeho částí, [4]

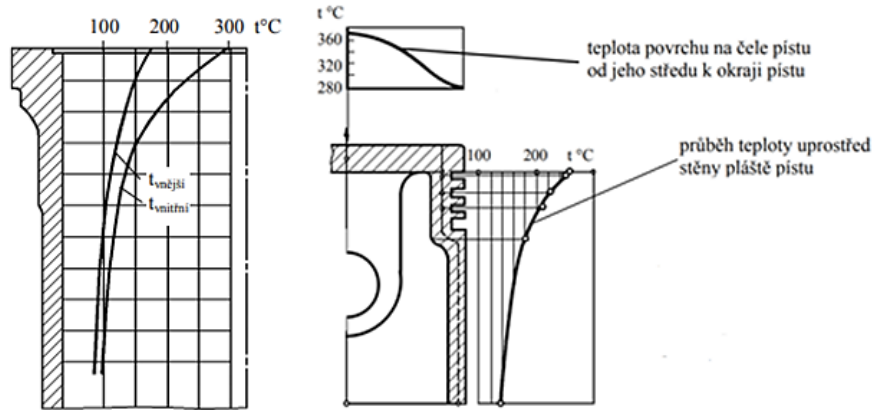
Také tvar pístu je důležitým faktorem pro správný chod motoru. Píst tvoří **dva základní geometrické tvary**. Za prvé *eliptický*, který zajišťuje správnou deformaci otvoru pro pístní čep, protože při tepelném namáhání dochází k tvarovým deformacím. Proto je šířka pístu v oblasti otvoru podstatně užší, než je tomu jinde. Druhý tvar je pak *kužel*, který je zde ze stejného důvodu jako elipsa a je tvořen užší hlavou pístu a širší částí v oblasti pláště pístu, [2].

2.1.2 Namáhání pístu spalovacích motorů

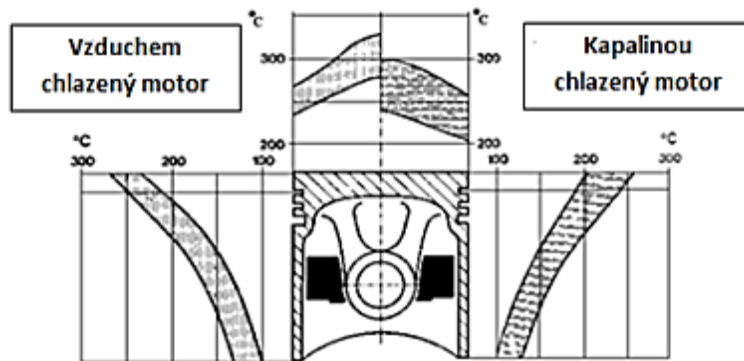
Namáhání pístu spalovacího motoru můžeme rozdělit na dvě základní formy – tepelné a **mechanické** namáhání.

Tepelné namáhání je způsobeno cykly plynů uvnitř válce (spalin), kde dochází k jejich odvádění z válce pomocí pístu. Odvod doprovází také teplo vznikající při tření pístních kroužků a stěny válce. Hlavní částí pístu, která je vystavena tepelné zátěži, je samotná hlava, protože doslova vytlačuje plyny pryč ze spalovací komory. To, jaké teplo je přeneseno z plynů na píst, je ovlivněno velikostí plochy, která je s těmito plyny v kontaktu. Dá se říct, že čím vyšších teplot se dosahuje v motoru, tím menší plochy hlavy pístu (která bude v kontaktu) se budeme snažit dosáhnout. U pístů vyskytujících se ve vznětových motorech je toto namáhání vyšší než u motorů zážehových (oproti teplotám, které jsou u

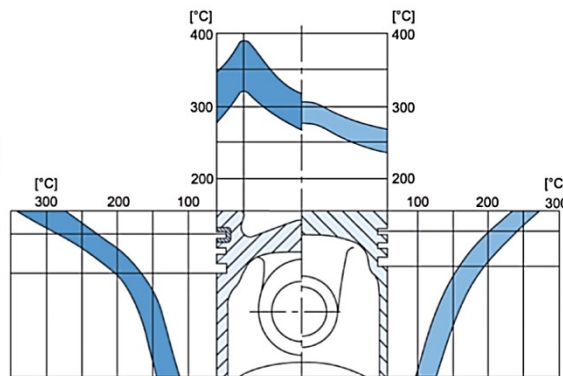
vznětových motorů nižší než u zážehových). Na základě vysokých teplot tak dochází k dilataci pístu, tudíž je nutno navrhovat písty s dostatečnou vůlí za studena. Na následujících obr. 2-2 až 2-4 jsou uvedeny příklady rozložení teplot pro jednotlivé základní druhy motorů.



Obr. 2-2 Průběh povrchových teplot na vložném válci (vlevo) a na čele a uprostřed stěny pláště pístu zážehového motoru (vpravo), BEROUN [1]

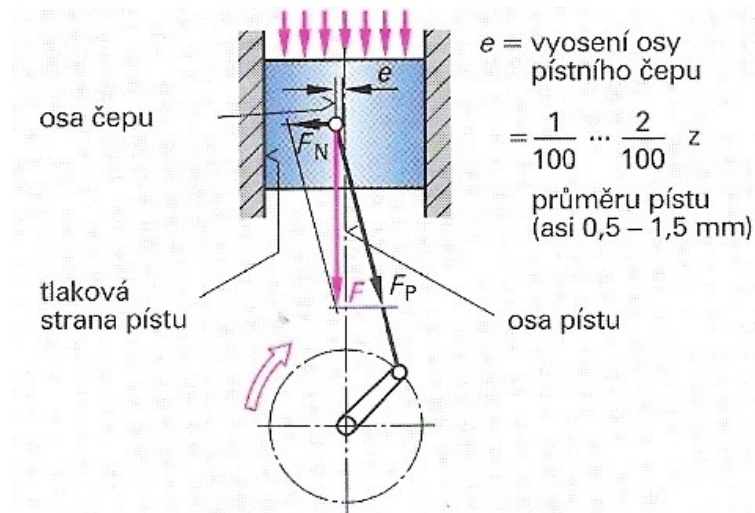


Obr. 2-3 Rozložení teplot na dně a v plášti pístu vzduchem a kapalinou chlazeného motoru, podle RAUSCHERA [10]



Obr. 2-4 Porovnání rozložení teplot pístu u vznětového a zážehového spalovacího motoru, MAHLE [10]

Mechanické namáhání pístu pak způsobuje především pohyb pístu, jelikož píst s ojnici ve válci funguje na principu klikového mechanismu. Pohyb zapříčiní expanze a následné odvádění plynů z komory válce, které doprovází zejména rázové působení vysokých tlaků. Na samotný píst tedy působí velký tlak shora a zespoda, ale zároveň také tlak ze stěn válce v důsledku tepelných i mechanických deformací pístu, [3], [5]. Na obr. 2-5 je schéma pístu spalovacího motoru s vyznačením sil v čepu, pístu a v ojnici.



Obr. 2-5 Schéma pístu spalovacího motoru s naznačením vyosení ojnice a zatíženými silami vyvolanými tlaky ve válci spalovacího motoru, [4]

2.1.3 Materiál pístů spalovacích motorů

Pro písty spalovacích motorů se v dnešní době nejčastěji používají siluminy (slitiny Al, Si a legur) s vyšším obsahem křemíku a charakteristických legur. Účelem tohoto složení je získání lepších mechanických fyzikálních a užitných vlastností, mezi které patří: vyšší mez kluzu a pevnosti i za zvýšených teplot, vyšší tvrdost, nižší součinitel tepelné roztažnosti, vyšší součinitel tepelné vodivosti, dále lepší kluzné vlastnosti či odolnost proti opotřebení, při zachování dobrých slévárenských vlastností (oproti běžným slitinám Al-Si).

Obsah křemíku se zde vyskytuje v míře od 10 do 25 % a hlavními legurami jsou nejčastěji nikl, měď a hořčík v různých poměrech. Si má jednu negativní vlastnost na slitinu a tou je zvyšování křehkosti s nárůstem jeho obsahu. Ni a Cu snižují součinitel teplotní roztažnosti a zlepšují mechanické vlastnosti i za vyšších teplot, bohužel také zhoršují slévárenské vlastnosti. Měď zde zvyšuje pevnost, tvrdost a obrobitelnost, ale zhoršuje slévatelnost a odolnost proti korozi a také zvětšuje četnost tvorby trhlin za tepla. Hořčík následně ve slitinách zvyšuje pevnost a tvrdost po tepelném zpracování.

V tabulce 2.1 je uvedeno označení a chemické složení slitin hliníku používaných pro výrobu pístů spalovacích motorů, [6].

Chemické složení používaných slitin hliníku [hmot. %]										
ZÁKLAD	PŘEDPIS	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti
AlSi10CuMg	KS 270	9-10,5	0,9	2,5-3,5	0,5	0,7-1,2	-	0,5	0,8	0,2
AlSi12NiMg	KS 1275	11,5-12,5	0,7	0,2	0,2-0,3	1,3-1,7	-	0,8-1,2	0,2	0,2
AlSi12CuNiMg	ČSN 4243366	11-13	0,6	0,8-1,5	0,3	0,8-1,3	-	0,8-1,3	0,15	0,2
AlSi12Cu3Ni2Mg	M 142	11-13	0,7	2,5-4	0,3	0,5-1,2	0,05	1,75-3	0,3	0,2
AlSi12Cu4Ni2Mg	M 174+	11-13	0,7	3-5	0,3	0,5-1,2	0,05	1-3	0,3	0,2
AlSi15Cu3Ni2Mg	M 145	14-16	0,7	2,5-4	0,3	0,5-1,2	0,05	1,75-3	0,3	0,2
AlSi16CuNiMg	M 126	14-18	0,7	0,8-1,5	0,2	0,8-1,8	0,05	0,8-1,3	0,3	0,2
AlSi18CuNiMg	424386 S	17-19	0,7	0,8-1,5	0,2	0,8-1,3	-	0,8-1,3	0,2	0,2
AlSi20Cu2NiMgMn	ČSN 424386	19-22	0,6	1,5-2	0,1-0,4	0,75-1,1	-	0,25-1	0,1	0,2
AlSi21CuNiMg	KS 280	20-22	0,7	1,4-1,8	0,4-0,6	0,4-0,6	-	1,4-1,6	0,2	0,2
AlSi25CuNiMg	AlSi25CuNiMg	23-26	0,7	0,8-1,5	0,2	0,8-1,3	0,6	0,8-1,3	0,2	0,2
AlCu4Ni2Mg2	ČSN 424315	0,6	0,7	3,75-4,5	-	1,25-1,75	-	1,75-2,25	0,1	0,2

Tabulka 2.1 Označení a chemické složení slitin hliníku používaných pro výrobu pístů spalovacích motorů [6]

Většinou se jedná o eutektické (obsah Si kolem 12 %), nebo nadeutektické (obsah Si nad 12 %) slitiny hliníku, které jsou ovšem ovlivněny obsahem dalších obsažených prvků. (Eutektikum je tuhá směs dvou látek, jejichž krystaly se vytvářely při tuhnutí společně). Pokud je koncentrace nadeutektická, první začne krystalizovat látka ve vyšší než eutektické koncentraci.) Struktura je tedy tvořena dendrity primárního tuhého roztoku Al (seskupení malých krystalů), zrnitého eutektika, krystaly primárního křemíku a intermetalických fází. (homogenní směs tvořena dvěma, nebo více kovy). Výskyt, typ a morfologie intermetalických fází je dána obsahem legur.

I když jsou tyto slitiny navrženy specificky, ani ony se nevyhnou vadám. Mezi nejčastější vady siluminů patří vodíková pórovitost, kombinovaná pórovitost či staženinová pórovitost. (vlivem plynů nebo stažení slitiny při tuhnutí může docházet a také dochází ke vzniku bublin uvnitř taveniny, což vede ke vzniku pórů, které negativně ovlivňují náchylnost ke vzniku trhlin uvnitř slitku) Aby se tomuto jevu co nejvíce zabránilo, je zapotřebí užít suché a čisté vstupní suroviny pro tavení a následné odplynění taveniny (často dvojité). Další typ vad vyskytující se všeobecně ve slitinách hliníku jsou oxidické vměstky, které vznikají kvůli značné náchylnosti Al k oxidaci. Jako poslední hojnou vadu, která je ve slitině nežádoucí, bych zmínil nevyhovující strukturu zrn primárního křemíku, která jsou často velmi velká a křehká. Z tohoto důvodu se často užívá k zjemnění

primárního křemíku očkovaní fosforem. Následná rafinace upravuje finální strukturu slitiny, [6], [7].

2.2 Technologie a zpracování pístů spalovacích motorů

2.2.1 Gravitační lití slitin hliníku do kovových forem

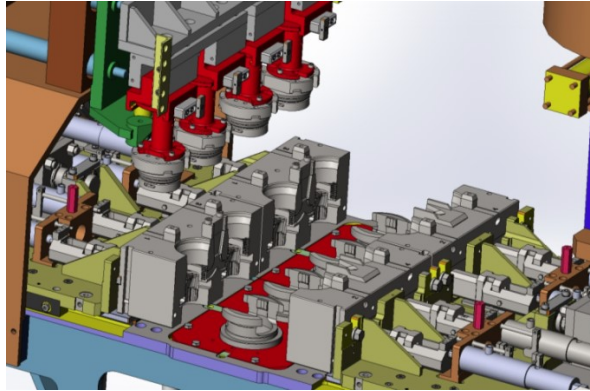
Gravitační lití je jedna ze slévárenských technologií, při které se využívá tíhová síla k přepravě roztavené slitiny do licích forem. K přelévání a dávkování tekutého kovu do forem se většinou využívá plnicí přívodní kanál. Za pomoci tíhové síly se kov převádí do dutin slévárenské formy, kde se přetvoří na odlitek. Podle druhu materiálu slévárenské formy můžeme rozlišovat několik postupů gravitačního lití.

Gravitační lití odlitků hliníku podle druhu materiálu formy lze rozdělit do dvou, popřípadě do tří základních skupin, a to lití do pískové formy, lití do kombinované formy (část formy tvořena kovem a část pískovou směsí) a lití do kokil (kovových forem), přičemž u všech těchto technologií lze využít písková jádra. Při gravitačním lití hliníku je potřeba dodržet správné nálitkování (vytvoření nálitku ve slévárenské formě), aby se co nejvíce zamezilo možnosti vzniku staženin. Nálietek je vedlejší dutina sousedící s dutinou slévárenské formy na odlitek, ve které se shromáždí přebytečná tavenina a při tuhnutí odlitku dochází k rovnoměrnému dodávání taveniny do oblastí dutiny slévárenské formy tam, kde by mohlo docházet ke vzniku staženin. Vznik staženin by znehodnotil celý odlitek.

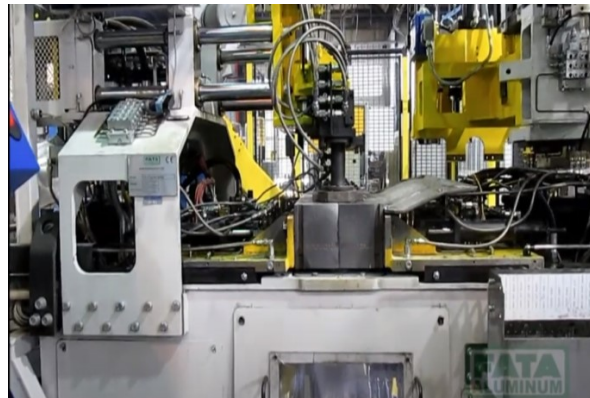
Gravitační lití do kovových forem je velice produktivní a progresivní způsob výroby odlitků ze slitin Al při zachování poměrné jednoduchosti celého procesu. Jedním z rozhodujících faktorů při vytváření požadovaných mechanických vlastností je rychlost a s ní spojená doba ochlazení. Zvýšením této rychlosti a zkrácení doby chladnutí dochází ke znatelnému zjemnění finální struktury odlitku a zvýšení hodnot mechanických vlastností součásti.

Rychlost proudění taveniny při gravitačním lití do kovové formy je zpravidla menší než $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, (výškový rozdíl nepřesahuje 0,3 m). Při gravitačním lití působí v dutině formy hydrostatický tlak $p_h = h\cdot\rho\cdot g$ [Pa], kde značí: h – výšku sloupce taveniny ve formě [m]; ρ - hustotu taveniny odlévané slitiny [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]; g – gravitační neboli normální tíhové zrychlení $9,81$ ($9,80665$) [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]. Největší hydrostatický tlak je na spodku dutiny slévárenské formy a směrem vzhůru se snižuje. Na obr. 2-6 je schéma kovové formy pro gravitační lití pístů spalovacích motorů. Tyto formy jsou namontovány na gravitačních strojích (uprostřed), jak je uvedeno na obr. 2-7. Na obr. 2-8 je uveden pohled na stroj pro gravitační lití a otevřenou

kovovou formu s kovovými jádry. Na obr. 2-9 je odlévání taveniny gravitačním způsobem do kovových forem při výrobě pístů spalovacích motorů. Na obr. 2-10 je pohled na stroj pro gravitační lití a otevřenou kovovou formu.



Obr. 2-6 Schéma formy pro odlévání pístů spalovacích motorů, FATA Aluminium [13]

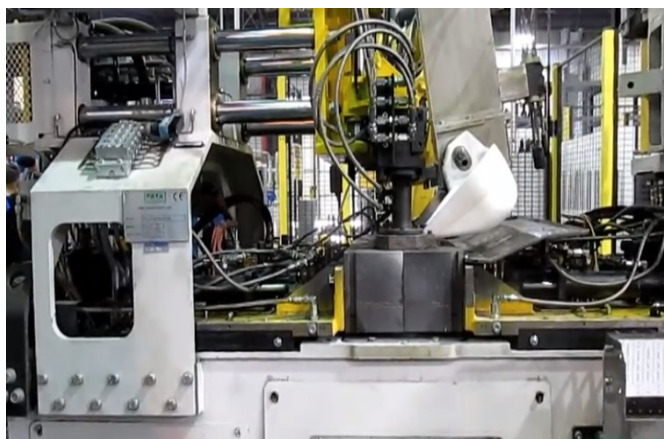


Obr. 2-7 Stroj pro gravitační lití do kovových forem pro výrobu pístů spalovacích motorů firmou FATA – Aluminium piston casting, uprostřed je půlená kovová forma [13]

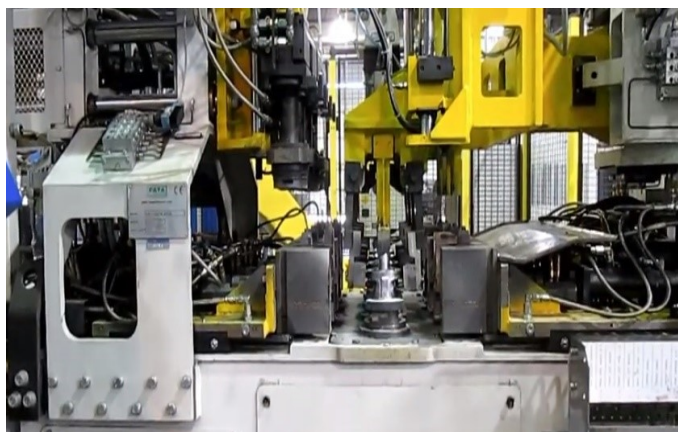


Obr. 2-8 Pohled na stroj pro gravitační lití a otevřenou kovovou formou s kovovými jádry

[13]



Obr. 2-9 Odlévání taveniny do kovových forem gravitačním způsobem při výrobě pístů spalovacích motorů [13]



Obr. 2-10 Pohled na stroj pro gravitační lití a otevřenou kovovou formou s odlitkou [13]

Pro zlepšení životnosti (trvanlivosti) formy se používají před odléváním speciální žáruvzdorné postřiky nebo nátěry, což zamezí přímému styku odlitku s formou. Vysoká kvalita těchto přípravků se významně projevuje na kvalitě povrchu odlitku, proto je důležité na tento parametr klást zvýšený důraz. Většinou se pohybuje tloušťka nátěru kolem 0,1-1 mm a musí se nanášet několikrát za směnu.

Výhody gravitačního lití slitin hliníku do kovových forem

- a) odlitky vykazují hutnost bez vnitřních vad a porozity;
- b) odlitek mají jemnozrnnou strukturu (následek rychlého ochlazení v kovové formě) a tím i lepší mechanické vlastnosti;
- c) požadovaná rozměrová, tvarová i povrchová přesnost a kvalita odlitků;
- d) gravitační lití do kovových forem je možno zautomatizovat;

e) dutina a temperace kovové formy vymezuje stejné podmínky.

Nevýhody gravitačního lití slitin hliníku do kovových forem

- a) kovová forma je drahá a předpokládá se, že bude určena pro velké série výroby odlitků;
- b) je nutný správný návrh a výroba kovové formy pro gravitační lití (možnosti odvzdušnění a ohřevu formy na pracovní teplotu). [7]

2.2.2 Technologie kování pístů ze slitin hliníku

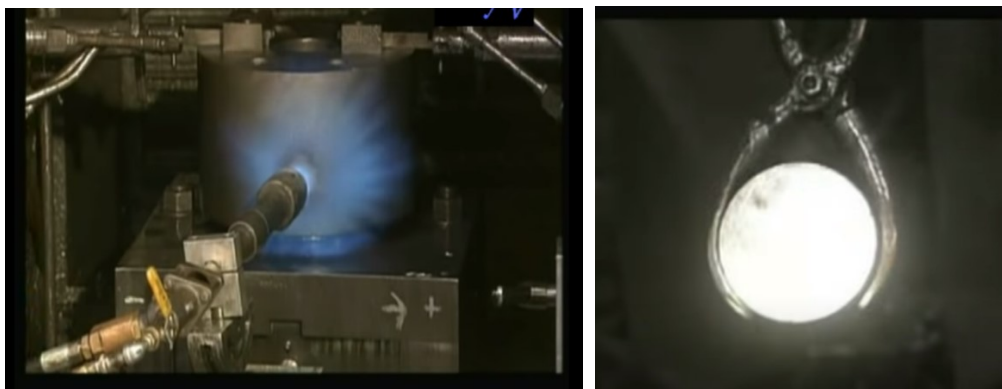
Současně se také písty spalovacích motorů zpracovávají tvářením (tj. kováním) nebo lisováním. Výroba pístů spalovacích motorů kováním a lisováním je úplnou zárukou zajištění jejich potřebné kompaktnosti a dostatečné hutnosti. Tyto technologie se uplatňují nejčastěji pro výrobu pístů vznětových motorů. Pro výrobu jsou použity obdobné slitiny jako pro lití, s tím rozdílem, že je zde ještě ve větším množství zastoupen Ni. Kované písty jsou na vnitřním povrchu velice hrubé, to má za následek zvýšenou hmotnost a rozměrovou nestálost výkovku. Aby se tyto negativa alespoň částečně odstranila, je nutná další úprava pomocí obrábění, což ovšem značně prodražuje výrobu. Samotné kování pístů náročné není, dokonce lze říct, že je narozdíl od lití jednodušší a rychlejší. Kování je také variabilnější, co se týče tvarů. Kované písty jsou pevnější, a dokonce i méně křehké než písty odlité. Díky tvářením je kovaný píst homogennější a díky tomu snáší podmínky spalování lépe, ale z důvodu jeho celkově vyšší ceny se tyto písty používají pouze pro speciální aplikace.

Kování a lisování se provádí na hydraulických lisech. Pro kování se používá zápustka, opatřená specifickou výronkovou drážkou. K lisování se používá nástroj podobný kovové formě, který je vyroben též z nástrojové oceli nikl-křemík-chrom-vanadové. Nástroj je temperovaný na pracovní teplotu cca 250 až 300 °C a je ošetřen separačním prostředkem. Pro výrobu pístů kováním a lisováním se používají dva typy slitin hliníku, 4032 a 2618. Slitina 4032 obsahuje 10 až 11 % Si a slitina 2618 obsahuje 1-2 % Si. Obě slitiny jsou dodávány ve formě válcových polotovárů, viz obr. 2-11 (vlevo). Tyto polotovary jsou rozřezány na menší díly, viz obr. 2-11 (vpravo). Na obr. 2-12 je ohřev nástroje pro lisování pístů spalovacích motorů (vlevo) a ohřev hliníkového polotovaru před jeho tvářením (vpravo).

Na obr. 2-13 je pohled na tvářením pístů a na obr. 2-14 jsou uvedeny polotovary těchto pístů.



Obr. 2-11 Válcové polotovary slitin hliníku (vlevo) a nařezané polotovary hliníkové slitiny připravené k ohřevu (vpravo) [14]



Obr. 2-12 Ohřev nástroje pro lisování pístů spalovacích motorů (vlevo) a ohřev hliníkového polotovaru před jeho tvářením (vpravo) [14]



Obr. 2-13 Tváření pístů spalovacích motorů [14]



Obr. 2-14 Pohled na tvářené polotovary pístů spalovacích motorů [14]

Výhody výroby pístů spalovacích motorů kováním nebo protlačováním

- a)* operace kování vede k vysoké kvalitě zpracovaného materiálu bez vnitřních vad;
- b)* kovaný materiál se vyznačuje vysokou pevností a houževnatostí;
- c)* technologie kování je nenáročná, je důležité dbát na správnou teplotu kování;
- d)* nenáročné (samotné kování).

Nevýhody kování hliníkových pístů

- a)* musí být k dispozici tvářecí stroj a nástroj;
- b)* je nutné provádět další doprovodné operace (vyšší cena);
- c)* je nutné obrábění i z vnitřní strany pístu [2].

Na obr. 2-15 je ukázka tvářených polotovarů hliníkových pístů a pístů po obrábění.



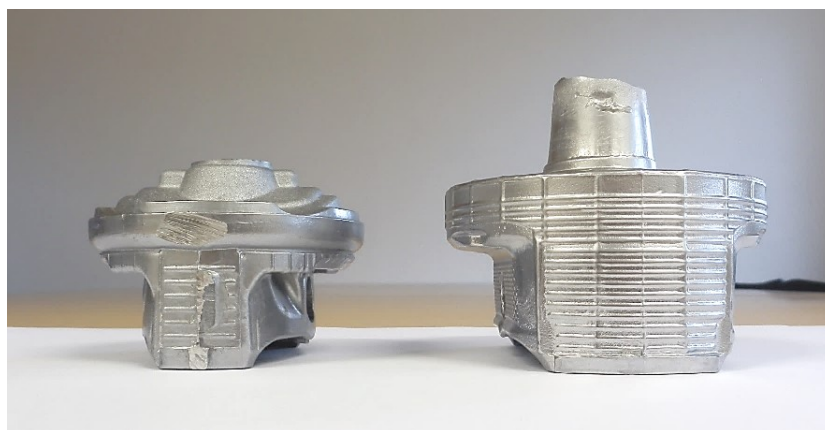
Obr. 2-15 Tvářené polotovary pro výrobu hliníkových pístů (vlevo) a pístů po obrábění (vpravo) [9]

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Experimentální část bakalářské práce byla zaměřena na sledování struktury a kompaktnosti dvou odlitků pístů spalovacího motoru. Úkolem experimentální práce bylo ověřit, zda zvolená technologie výroby pístů (gravitační lití do kovových forem) vede k výrobě kompaktních odlitků bez vnitřních vad (pórovitosti a bublin). Během spalovacího procesu mohou vnitřní vady odlitků pístů (pórovitost a bubliny) způsobit destrukci pístů spalovacích motorů. Vlivem ohřevu pístu na teploty až 300 °C dochází ke zvyšování objemu plynů ve vnitřních dutinách pístu, čímž může dojít ke snížení nosného průřezu pístu a k jeho následnému porušení. Přítomnost bublin v odlitku je způsobena špatným odplyněním taveniny slitiny hliníku před jejím odléváním. Odplynováním slitin hliníku snižujeme především obsah vodíku, popř. jiných plynů v jejich tavenině.

3.1 Charakteristika a výroba pístů spalovacích motorů

Písty určené pro analýzu jejich struktury, porezity a kompaktnosti byly vyrobeny gravitačním litím do kovových forem. K následnému sledování odlišnosti struktur s ohledem na jejich chemické složení byl jeden píst vyroben ze slitiny KS 1295 (AlSi12Cu4Ni2Mg) a druhý ze slitiny KS 1275 (AlSi12NiMg). Tyto písty jsou uvedeny na obr. 3-1 a obr. 3-2. Písty byly sledovány ve stavu po odlití.



Obr. 3-1 Pohled na odlitky pístů spalovacích motorů, vlevo je píst ze slitiny KS 1295; vpravo je píst ze slitiny KS 1275, určené pro sledování jejich struktury a kompaktnosti



Obr. 3-2 Půdorysný pohled na odlitky pístů spalovacích motorů, vlevo je píst ze slitiny KS 1295; vpravo je píst ze slitiny KS 1275, určené pro sledování jejich struktury a kompaktnosti

3.1.1 Charakteristika slitiny hliníku a její metalurgická příprava

Pro výrobu pístů, jak je výše již uvedeno, byly použity dvě slitiny typu KS 1275 a KS 1295. Slitiny hliníku se vyrábí ve formě housek, viz obr. 3-3.



Obr. 3-3 Housky slitin KS 1275 a KS 1295 pro výrobu pístů spalovacích

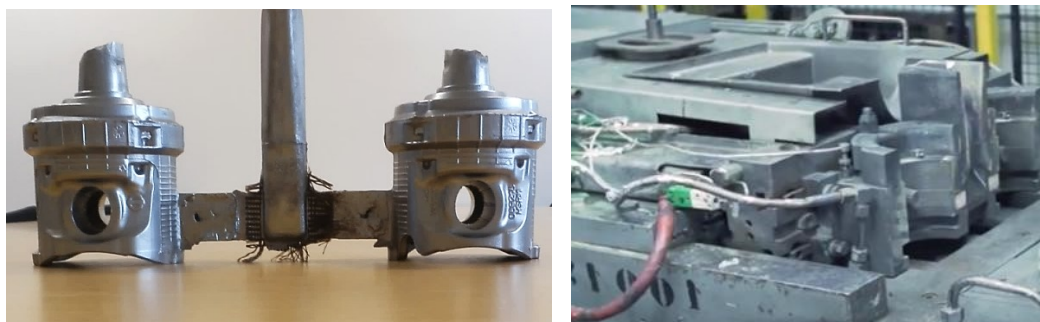
Chemické složení této slitiny dle normy EN AC je uvedeno v tabulce 3.1. Skutečné chemické složení materiálu vyrobených pístů bylo sledováno pomocí spektrometru Q4 Tasman. Chemické složení obou slitin je uvedeno v tabulce 3.1 Chemické složení slitin použitých pro výrobu sledovaných pístů.

Slitina	Chemické složení slitin pro výrobu pístů [hmot. %]										
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	V	Zr
KS 1275	11,9	0,63	0,2	0,23	0,94	-	1,45	0,14	0,2	-	-
KS 1295	12,3	0,68	4,6	0,29	1,10	0,04	2,30	0,30	0,2	0,14	0,18

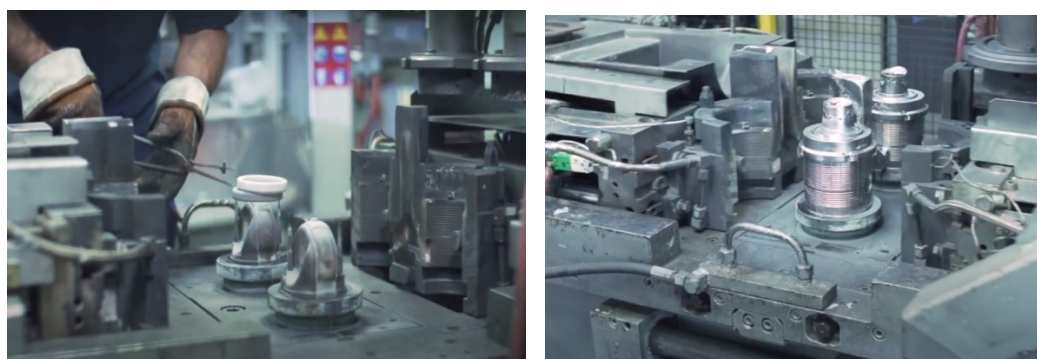
Tabulka 3.1 Chemické složení slitin použitých pro výrobu pístů

3.2 Použité slévárenské formy

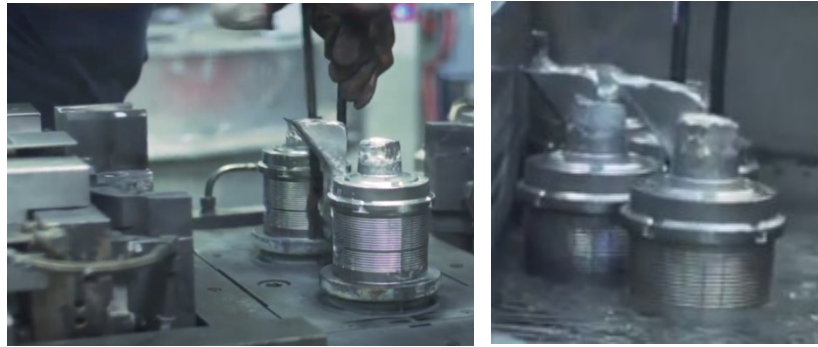
Pro gravitační lití pístů spalovacích motorů ze slitin hliníku byla použita dvojice kovových forem tvaru tlustostěnné trubky s vnitřní dutinou pro výrobu pístu. Příslušné formy jsou vyrobeny z nástrojové oceli ČSN EN 1.1343 (ocel ČSN 19552). Obě formy jsou propojeny vtokovou soustavou, která má jeden svislý kanál se vstupní nálevkou pro odlévání taveniny. Do tohoto svislého kanálu je v dolní části připojen vodorovný kanál, který je na svých koncích propojen s dutinami obou forem. Tuto situaci je možno sledovat na dvojici surových odlitků, viz obr. 3-4, vlevo. Formy byly temperovány na teplotu cca 250 °C a jejich povrch líce byl ošetřen nástřikem Molybkombin UMF T4. Formy byly uloženy na stroji pro gravitační lití do kovových forem, viz obr. 3-5, vpravo.



Obr. 3-4 Pohled na poloviny kovových slévárenských forem pro gravitační lití pístů, mezi uvedenými půlkami forem se tyčí vtoková soustava



Obr. 3-5 Pohled na otevřenou slévárenskou formu s jádrem (vlevo), na otevřenou formu s odlitky (vpravo)



Obr. 3-6 Vyjímání odlitků z jader otevřené formy (vlevo), namáčení odlitků do vody za účelem stabilizace rozměrů odlitků (vpravo)

3.3 Metalurgická příprava taveniny a výroba odlitků

3.3.1 Metalurgická příprava taveniny

Metalurgická příprava taveniny i výroba pístů byla provedena ve firmě KS Czech Republic, a. s. V metalurgickém provozu této společnosti byla příprava taveniny provedena následovně. Housky dané hliníkové slitiny o určité kvalitě a chemickém složení byly taveny v plynových nebo elektrických pecích, viz obr. 3-7.



Obr. 3-7 Tavicí pece plynové a elektrické pro přípravu taveniny na výrobu pístů

Teplota přehřátí odlévaných tavenin (KS 1275 a KS 1295) byla 720 až 740 °C. Před odléváním byla tavenina modifikována stronciem a byla rafinována a odplyněna chlorem. Pak následovalo odlití taveniny do připravených forem pro gravitační lití.

3.3.2 Výroba odlitků pístů spalovacích motorů

Pro výrobu pístů spalovacích motorů, jak je patrné z obr. 3-5, se používají kovové slévárenské formy. Tyto formy byly temperovány na pracovní teplotu cca 220 °C. Příslušná tavenina slitiny hliníku se do těchto forem odlévá gravitačně. Tím sloupec taveniny hliníkové slitiny ve formě a příznivé tepelné vlastnosti formy i taveniny přispívají

k výrobě hutných odlitků (tj. odlitků bez vnitřních vad a perezity). To je výhodná technologie pro výrobu pístů, které jsou při jejich provozu vystaveny teplotám cca nad 250 °C. Kompaktnost pístů spalovacích motorů je důležitá proto, že perezita představuje místa, kde je soustředěný vzduch v odlitku. Také plynové bubliny zvyšují svůj objem při zvýšené teplotě a při provozu pístu vzniká nebezpečí jejich porušení.

Na obr. 3-1 a 3-2 jsou uvedeny písty spalovacích motorů, které byly vyrobeny výše zmíněnou technologií ve firmě KS Kolbenschmidt Czech Republic, a. s. v Ústí nad Labem. Tyto písty byly analyzovány tak, jak je uvedeno v následující části práce.

3.4 Sledování kompaktnosti a makrostruktury stěn vyrobených pístů

Vyrobené písty byly rozřezány strojní hydraulickou rámovou pilou (Ergonomic 275.230 DG BOMAR, TÜV – SÜD), tak aby byly patrné svislé stěny obou odlitků, viz obr. 3-8 a obr 3-9.



Obr. 3-8 Půlky pístu ze slitiny KS 1295 (AlSi12CuNi2 Mg)



Obr. 3-9 Půlky pístu ze slitiny KS 1275 (AlSi12Ni Mg)

Jak je z obr. 3-8 a obr. 3-9 patrné, stěny pístu jsou velmi kompaktní, bez známek porezity nebo jiných vad.

Makroskopické pozorování stěn pístu bylo provedeno za účelem posouzení krystalické struktury a charakteru stěn odlitků. K tomuto účelu byly obě půlky pístů metalograficky připraveny. Nejprve byly broušeny na metalografických papírech o velikosti 120, 240, 600 a 800 od firmy Buehler typ Carbimet™, tvořených karbidem křemíku (SiC). Broušení bylo provedeno ručně a při přechodu z hrubšího papíru na jemnější bylo vždy odstraněno zbylé hrubší brusivo, aby nedocházelo ke znehodnocování povrchu těmito zrny. Následně bylo přistoupeno k leptání, kde byl použit 0,5% roztok kyseliny fluorovodíkové v destilované vodě. Na obr. 3-10 je naleptaná struktura obou polovin pístů.



Obr. 3-10 Naleptaná struktura obou polovin pístů spalovacích motorů

3.5 Sledování mikrostruktury odlitků pístů

Sledování mikrostruktury odlitků pístů spalovacích motorů bylo provedeno na Katedře strojírenské technologie, Fakulty strojní, TU v Liberci. K tomuto účelu byl použit světelný mikroskop.

Z odlitých pístů spalovacích motorů byly připraveny vzorky pro metalografické pozorování struktury. Vzorky pro metalografické pozorování byly odděleny mechanickou pilou, tak aby nedošlo k tepelnému ovlivnění vzorku. Současně bylo podle doporučení dbáno na dodržení běžné velikosti půdorysné plochy zalévaného vzorku cca 1 cm². Takto oddělené vzorky byly dále připraveny, viz obr. 3-13, klasickým metalografickým způsobem. Byly zalaty do dentakrylové pryskyřice, broušeny na brusných metalografických papírech o zrnitosti 200, 400, 600 a 800. Na obr. 3-12 je použité zařízení, které sloužilo pro broušení a leštění vzorků. Následně byly metalografické vzorky leštěny. Pro účel leštění byl použit plstěný kotouč a diamantová suspenze MetaDi Monocrystalline Diamond Suspension (40-6531) od firmy Buehler. Na obr. 3-11 jsou uvedeny brusné

metalografické kotouče, plstěný kotouč a suspenze na bázi diamantu s velikostí částic 3 μ m. Pro leptání bylo použito leptadlo na bázi kyseliny fluorovodíkové (50 cm³ kyselina fluorovodíková-HF 40% roztok; 950 cm³ destilovaná voda). Po naleptání byl proveden oplach vzorků v destilované vodě a lihu a následně byly vzorky vysušeny. Tím byly vzorky pístů spalovacích motorů připraveny k pozorování jejich mikrostruktury na světelném mikroskopu NEOPHOT 21 (výrobce Carl Zeiss Jena – SRN), který disponuje vestavěnou kamerou a její obraz je hodnocen softwarem NIS Elementas AR. Dále je obraz znázorněn na displeji počítače. Na obr. 3-14 je znázorněn uvedený světelný mikroskop.



Obr. 3-11 Brusné metalografické kotouče a plstěný kotouč včetně diamantového roztoku



Obr. 3-12 Příprava vzorku pro metalografické pozorování z pístu spalovacího motoru

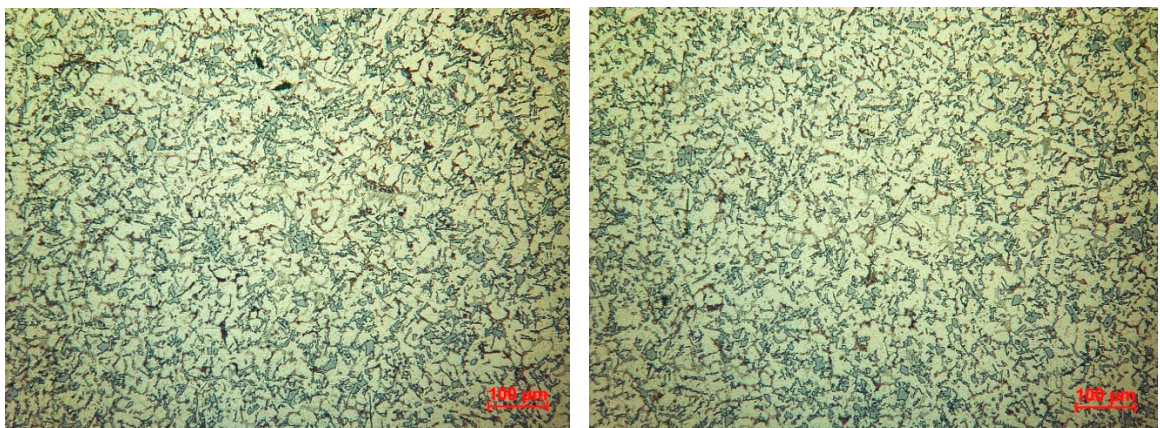


Obr. 3-13 Metalografické vzorky pro pozorování na světelném mikroskopu

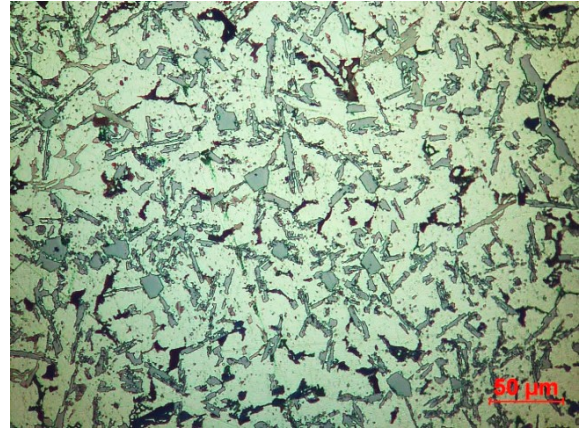
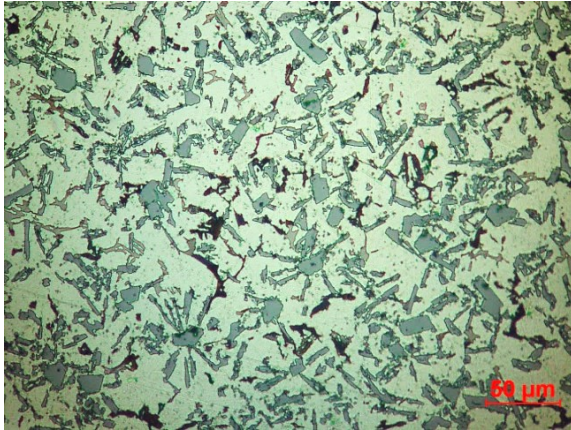


Obr. 3-14 Světelný mikroskop NEOPHOT 21 s kamerou a softwarem NIS Elementas AR

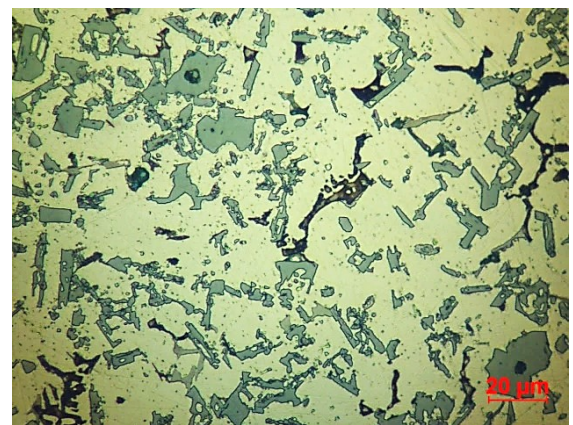
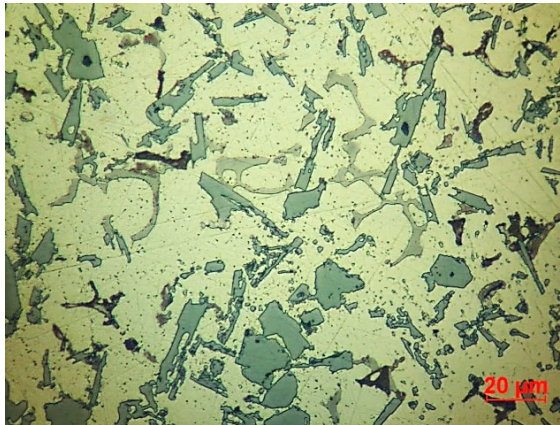
Na obr. 3-15 až 3-18 jsou uvedeny mikrostruktury vzorku pístu spalovacího motoru ze slitiny KS 1275 (AlSi12NiMg).



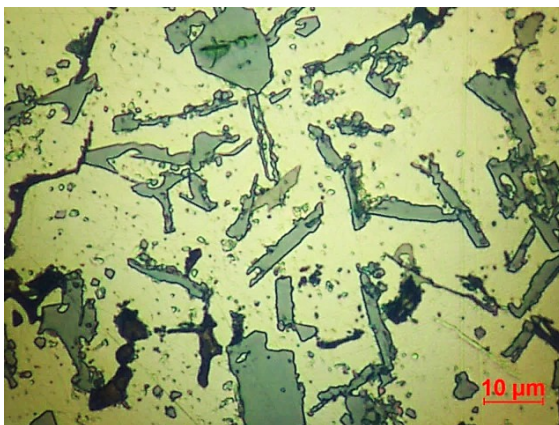
Obr. 3-15 Mikrostruktura hliníkové slitiny KS 1275 (AlSi12NiMg) pístu spalovacího motoru, zvětšení 100 násobné, leptadlo kyselina fluorovodíková + voda



Obr. 3-16 Mikrostruktura hliníkové slitiny KS 1275 (AlSi12NiMg) pístu spalovacího motoru, zvětšení 250 násobné, leptadlo kyselina fluorovodíková + voda

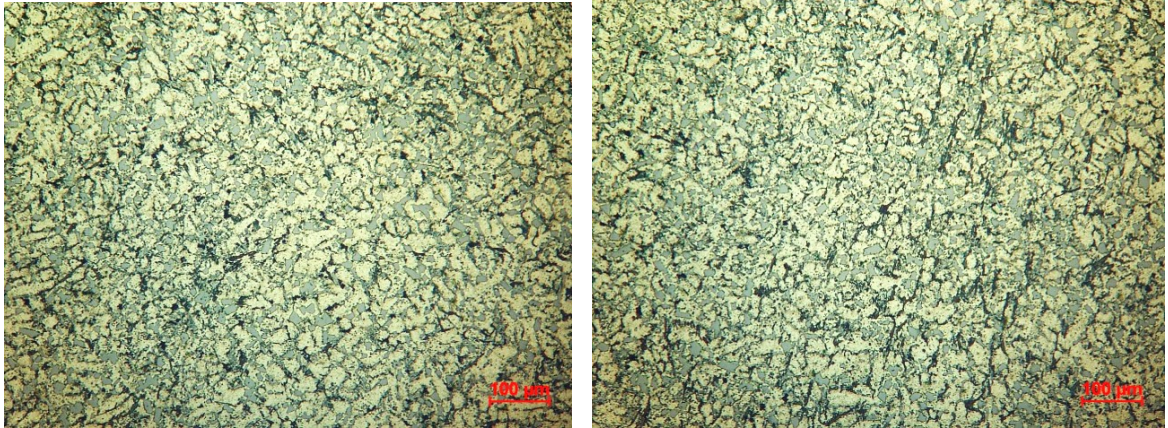


Obr. 3-17 Mikrostruktura hliníkové slitiny KS 1275 (AlSi12NiMg) pístu spalovacího motoru, zvětšení 500 násobné, leptadlo kyselina fluorovodíková + voda

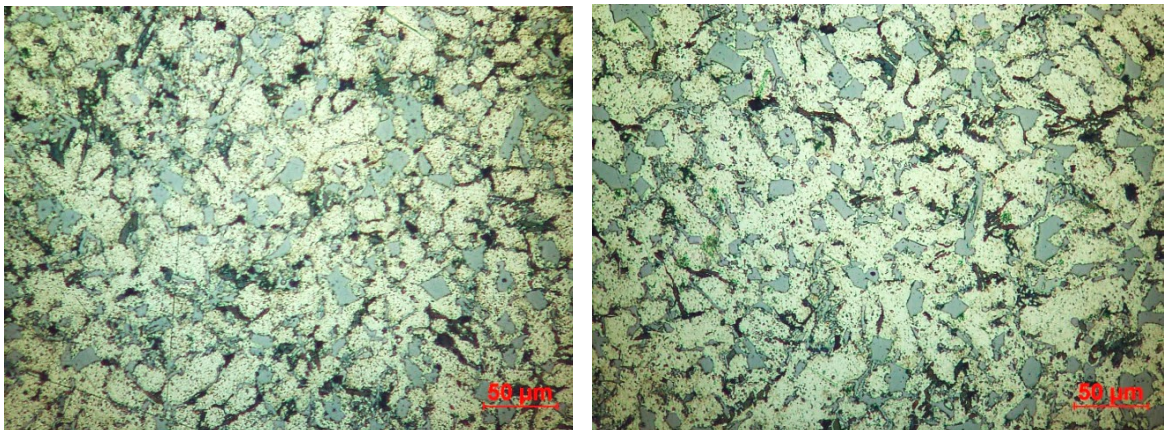


Obr. 3-18 Mikrostruktura hliníkové slitiny KS 1275 (AlSi12NiMg) pístu spalovacího motoru, zvětšení 1000 násobné, leptadlo kyselina fluorovodíková + voda

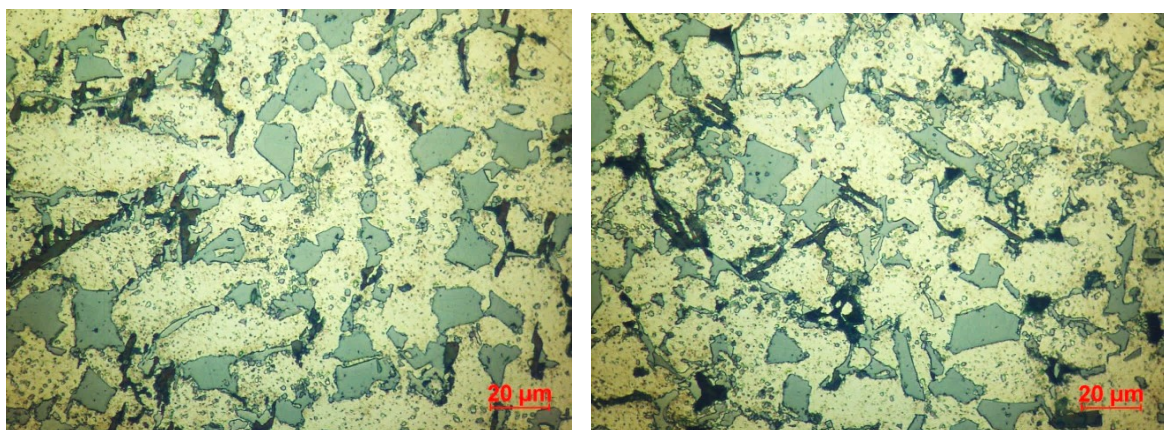
Na obr. 3-19 až 3-22 jsou uvedeny mikrostruktury vzorku pístu spalovacího motoru ze slitiny KS 1295 (AlSi12Cu4Ni2Mg).



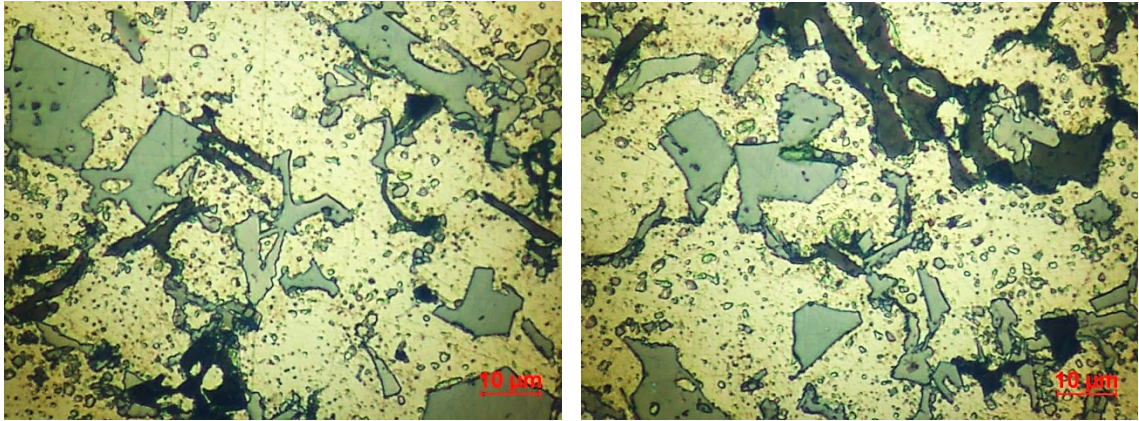
Obr. 3-19 Mikrostruktura hliníkové slitiny KS 1295 ($AlSi12Cu4Ni2Mg$) pístu spalovacího motoru, zvětšení 100 násobné, leptadlo kyselina fluorovodíková + voda



Obr. 3-20 Mikrostruktura hliníkové slitiny KS 1295 ($AlSi12Cu4Ni2Mg$) pístu spalovacího motoru, zvětšení 250 násobné, leptadlo kyselina fluorovodíková + voda

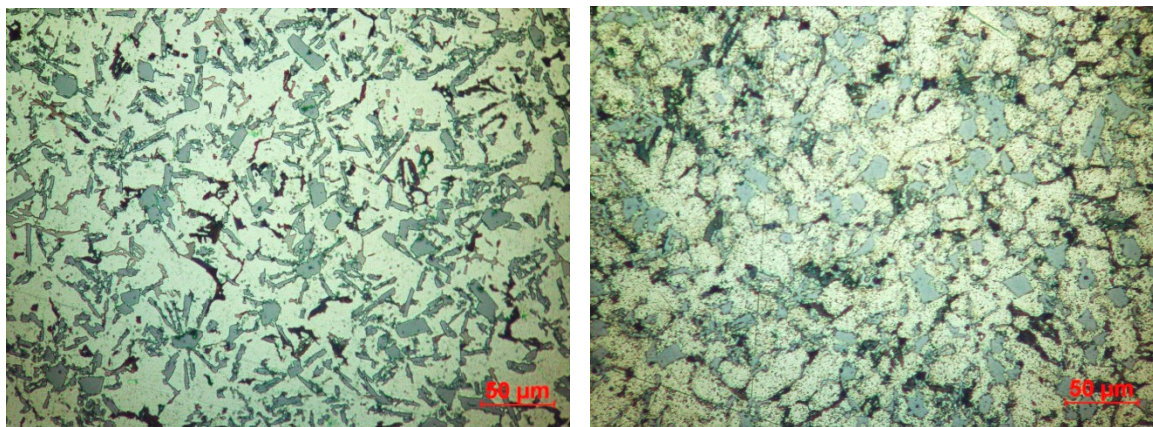


Obr. 3-21 Mikrostruktura hliníkové slitiny KS 1295 ($AlSi12Cu4Ni2Mg$) pístu spalovacího motoru, zvětšení 500 násobné, leptadlo kyselina fluorovodíková + voda

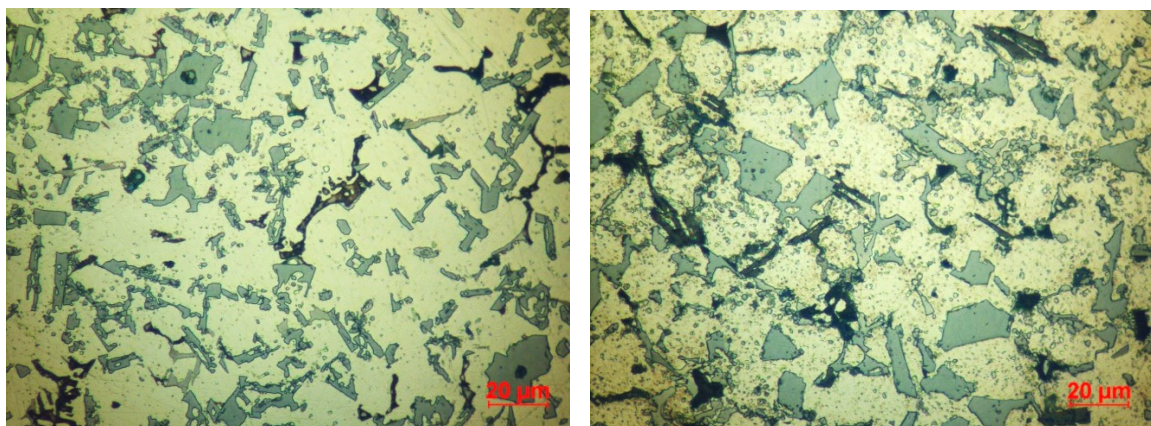


Obr. 3-22 Mikrostruktura hliníkové slitiny KS 1295 ($AlSi12Cu4Ni2Mg$) pístu spalovacího motoru, zvětšení 1000 násobné, leptadlo kyselina fluorovodíková + voda

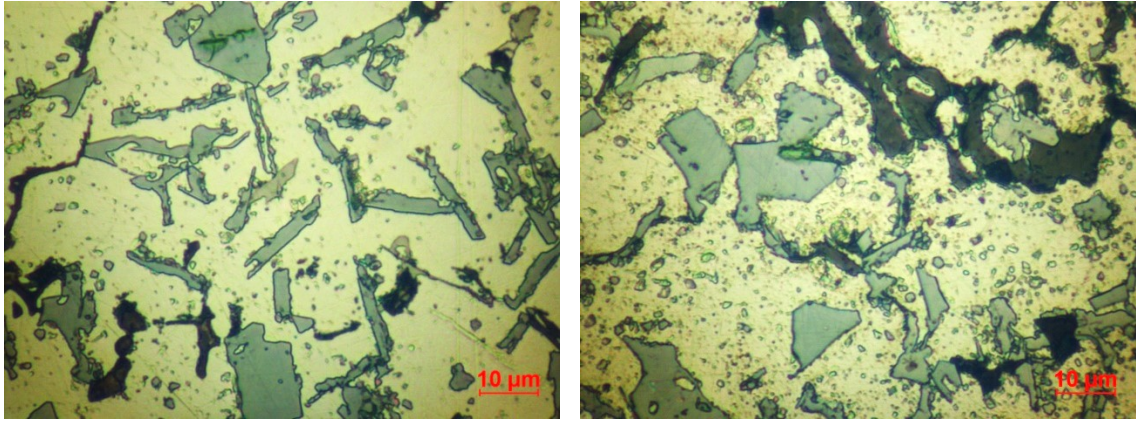
Pro jednodušší porovnání obou typů slitin (KS 1275 a KS 1295) jsou na obr. 3-23, na obr. 3-24 a na obr. 3-25 uvedeny vždy obě mikrostruktury vedle sebe.



Obr. 3-23 Mikrostruktury obou typů hliníkových slitin KS 1275 (vlevo) a KS 1295 (vpravo) pístů spalovacích motorů, zvětšení 250 násobné, leptadlo kyselina fluorovodíková + voda



Obr. 3-24 Mikrostruktury obou typů hliníkových slitin KS 1275 (vlevo) a KS 1295 (vpravo) pístů spalovacích motorů, zvětšení 500 násobné, leptadlo kyselina fluorovodíková + voda



Obr. 3-25 Mikrostruktury obou typů hliníkových slitin KS 1275 (vlevo) a KS 1295 (vpravo) pístů spalovacích motorů, zvětšení 1000 násobné, leptadlo kyselina fluorovodíková + voda

3.5.1 Vyhodnocení mikrostruktury sledovaných pístů spalovacích motorů

Mikrostruktura pístu z hliníkové slitiny KS 1275 ($AlSi12NiMg$) je zřejmá z obr. 3-15 až 3-18. Jde v podstatě o slitinu eutektického siluminu, která obsahuje nikl a hořčík. Eutektikum tvoří tuhý roztok $\alpha(Al)$ a tuhý roztok $\beta(Si)$. Dále z výše uvedených struktur jsou zřejmá světlá místa mikrostruktury, tvořena tuhým roztokem $\alpha(Al)$. Tyto oblasti tuhého roztoku $\alpha(Al)$ odpovídají velikosti až 50 μm . Současně se v mikrostruktuře vyskytují tmavší, až deskovité útvary, což je tuhý roztok $\beta(Si)$, který se také nazývá eutektický křemík. Velikost částic tohoto tuhého roztoku se pohybuje od 10 μm do 35 μm . Dále se v mikrostruktuře vyskytují černé útvary protáhlého tvaru, což je intermetalická fáze Mg_2Si . Tato intermetalická fáze je velmi dobře patrná z obr. 3-18. Intermetalická fáze Mg_2Si vykazuje velikost 10 μm do 30 μm . Současně se v mikrostruktuře vyskytují jen ojediněle (v menší míře než předchozí) intermetalické fáze niklu (např. Al_3Ni , Al_3Ni_2 , atd.). Jejich přítomnost je nutno identifikovat jinou metodou, např. EDX analýzou.

Mikrostruktura pístu z hliníkové slitiny KS 1295 ($AlSi12Cu4Ni2Mg$) je patrná z obr. 3-19 až 3-22. Též v tomto případě jde v podstatě o slitinu eutektického siluminu, která obsahuje měď, nikl a hořčík. Proti výše uvedené slitině (KS 1275) tato slitina obsahuje 4 hmot. % mědi a 2 hmot. % niklu. V tomto případě lze očekávat v mikrostruktuře slitiny přítomnost dalších intermetalických fází legujících prvků. Tak jako v předchozím případě, eutektikum tvoří tuhý roztok $\alpha(Al)$ a tuhý roztok $\beta(Si)$. Světlá místa mikrostruktury jsou tuhý roztok $\alpha(Al)$, odpovídající velikosti 40 až 45 μm . Také se zde vyskytují tmavší

útvary, které znázorňují tuhý roztok $\beta(\text{Si})$, eutektický křemík. Tvar eutektického křemíku není protáhlý (jako v předchozím případě), naopak vykazuje spíše tvar nepravidelných čtyřúhelníků. Velikost částic tohoto tuhého roztoku se pohybuje od 10 μm do 20 μm . I zde se v této mikrostruktuře vyskytují černé útvary protáhlého tvaru, což je intermetalická fáze Mg_2Si . Tato intermetalická fáze je velmi dobře patrná z obr. 3-22. Intermetalická fáze Mg_2Si vykazuje velikost 10 μm do 40 μm . Současně se v mikrostruktuře vyskytují jen ojediněle (opět méně než předchozí zmíněné) intermetalické fáze na bázi hliníku-mědi-niklu, tj. Cu_3NiAl_6 . Podobně je to s fází Al_2Cu , která se vylučuje v drobných útvarech a má význam při tepelném zpracování pístů spalovacích motorů (tzv. precipitačním vytvrzování).

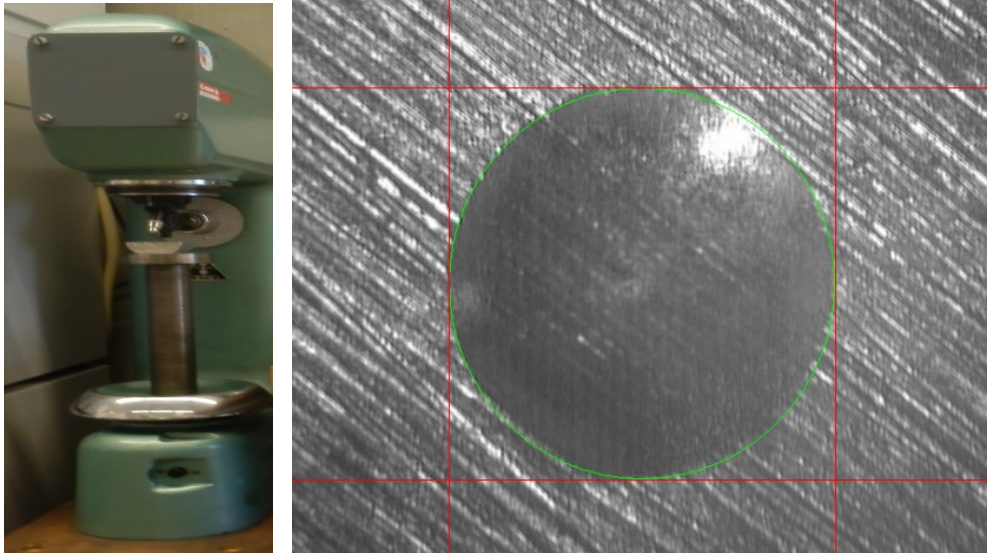
3.6 Měření tvrdosti pístů spalovacích motorů

Měření tvrdosti odlitků pístů spalovacích motorů bylo provedeno dle ČSN EN ISO 6506-1. Pro tento účel byla vybrána zkouška tvrdosti podle Brinella. Indentorem byla kulička ze slinutého karbidu o průměru 2,5 mm. Zátěžná síla je předepsána dle vztahu:

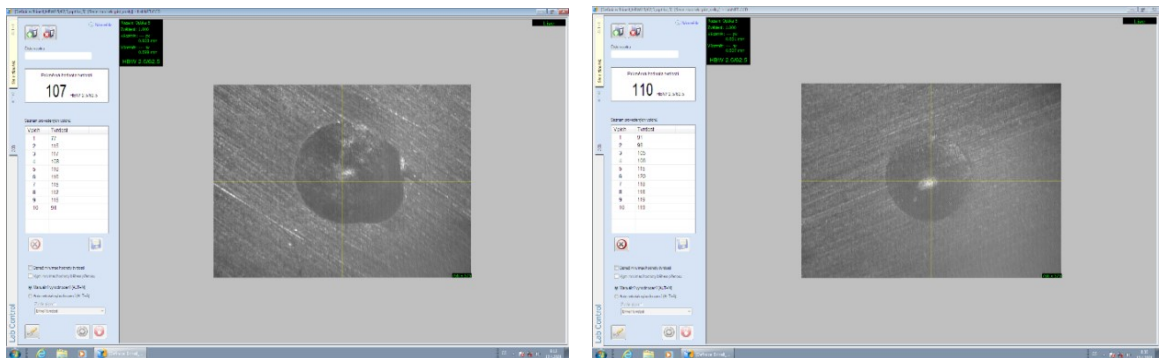
$$F = k \cdot D^2 \quad (1)$$

kde značí: **k**-materiálový koeficient, **D**-průměr kuličky.

Pro neželezné kovy $k = 10$, tudíž zatěžovací síla F byla 613 N. Před měřením tvrdosti byl povrch měřených ploch odlitků obroušen, aby došlo k odstranění nerovností jejich povrchu. Pro měření tvrdosti byl použit tvrdoměr VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig viz obr. 3-26, vlevo. Indentor následně vytvořil vtisky do příslušných odlitků v několika různých místech. Získané vtisky byly vyhodnoceny pomocí kamery a softwaru LabNET.CCD. Pomocí kamery byl obraz vtisku přenesen na monitor počítače a pomocí výše zmíněného softwaru byly zjištěny jeho průměry (obr. 3-26, vpravo) a určená konečná hodnota HBW. Jelikož se jednalo o indentor ze slinutého karbidu, je tato hodnota označena HBW (indentor ze zakaleného ocelového materiálu používá označení HBS). Vtisky po indentoru jsou patrné z obr. 3-27.



Obr. 3-26 Tvrdoměr VEB Werkstoffprüfmaschinen Liepzig (vlevo), pohled na plochu vtisku, která je vyhodnocována softwarem LabNET.CCD (vpravo)



Obr. 3-27 Pohled na vtisky při zkoušce tvrdosti podle Brinella – HBW, hliníková slitina KS 1295, po zobrazení pomocí vyhodnocovacího softwaru tvrdosti

Naměřené hodnoty tvrdostí obou odlitků pístů z příslušných hliníkových slitin jsou v tabulce 3.2. U většího z pístů (slitina KS 1275) bylo naměřeno celkem 15 hodnot tvrdostí a postupovalo se směrem z pravého dolního rohu nahoru a do rohu dolního levého. Stejný postup byl použit u menšího pístu (slitina KS 1295), jen bylo naměřeno pouze 10 hodnot.

Číslo měření	Odlitky pístů spalovacích motorů					
	KS 1275			KS 1295		
Místo měření (stěna)	pravá	levá	Dno	pravá	Levá	Dno
1	77	120	116	91	118	105
2	115	112	115	98	119	106
3	117	106	112	-	119	115
4	108	103	115	-	-	120
5	110	92	94	-	-	118
Aritmetický průměr tvrdosti \bar{x} [HBW]	105,4	106,6	110,4	94,5	118,7	112,8
Směrodatná odchylka s [HBW]	16,3	10,4	9,3	4,9	0,6	6,9
Variační koeficient v [%]	15 %	10 %	8 %	5 %	0,5 %	6 %

Tabulka 3.2 Naměřené hodnoty tvrdostí podle Brinella obou pístů

Na obr. 3-28 a na obr. 3-29 jsou uvedeny poloviny pístů na kterých bylo provedeno měření jejich tvrdosti.

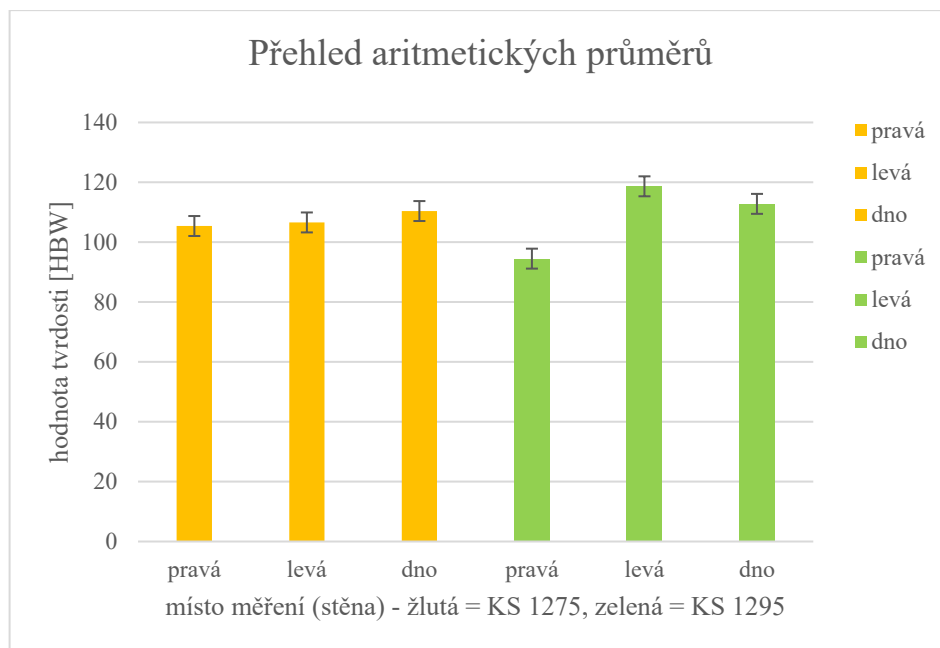


Obr. 3-28 Pohled na polovinu hliníkového pístu s místy, vtisky, po měření tvrdosti podle Brinella, slitina KS 1275



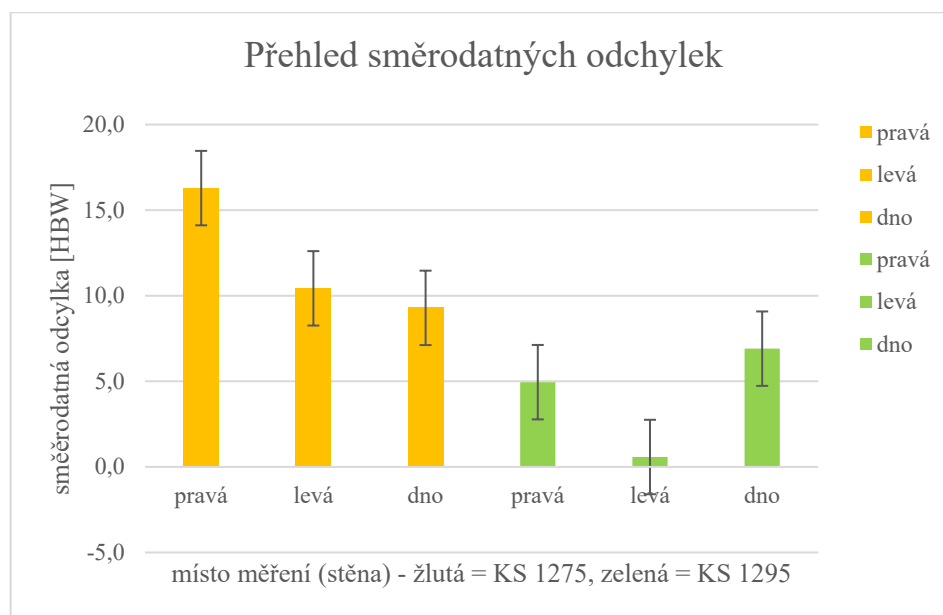
Obr. 3-29 Pohled na polovinu hliníkového pístu s místy, vtisky, po měření tvrdosti podle Brinella, slitina KS 1295

Byly hodnoceny tvrdosti naměřené na jednotlivých stěnách pístů, včetně jejich dna. V tabulce 3.2 jsou také uvedeny hodnoty aritmetického průměru tvrdosti \bar{x} [HBW], směrodatné odchyly s [HBW] a variačního koeficientu v [%]. Tyto hodnoty byly určeny podle standardně známých statistických vztahů. Současně byly hodnoty těchto veličin graficky znázorněny, jak je patrné z obr. 3-30 až 3-32. Na těchto obrázcích jsou uvedeny přehledy aritmetických průměrů, směrodatných odchylek a variačních koeficientů tvrdostí pístů ze slitiny KS 1275 a KS 1295 (pro levou stranu, pravou stranu a dno pístu). Grafické znázornění ve sloupcích je pro přehlednost odděleno dvěma barvami, kde žlutá (až naoranžovělá) barva patří pístu ze slitiny KS1275 a zelená barva vizualizuje píst ze slitiny KS 1295. Z obr. 3-30 je patrné, že hodnoty aritmetického průměru jsou pro píst vyrobený ze slitiny KS-1275 téměř totožné jako pro píst ze slitiny KS-1295. Co se týká obr. 3-31 a obr. 3-32, zde je již zřejmý rozdíl tvrdostí mezi sledovanými slitinami. Píst ze slitiny KS 1295 ($AlSi12Cu4Ni2Mg$) vykazuje při zkoušce tvrdosti nižší hodnoty směrodatné odchyly a variačního koeficientu.



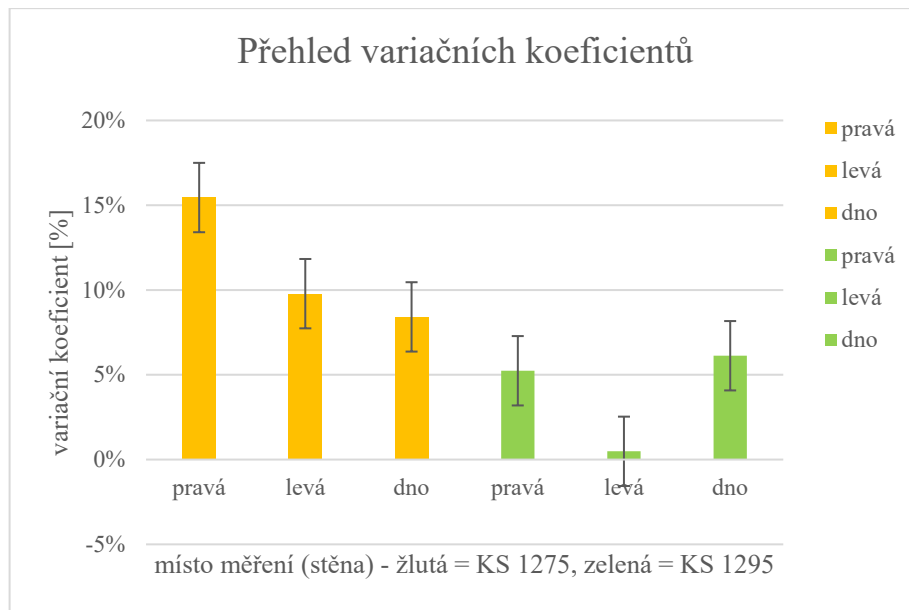
Obr. 3-30 Přehled aritmetických průměrů ze zkoušky tvrdosti pístů ze slitiny

KS 1275 a KS 1295



Obr. 3-31 Přehled směrodatných odchylek ze zkoušky tvrdosti pístů ze slitiny

KS 1275 a KS 1295 (zelená)



Obr. 3-32 Přehled variačních koeficientů ze zkoušky tvrdosti pístů ze slitiny

KS 1275 a KS 1295

4. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Výsledky této bakalářské práce přináší dílčí informace o materiálu pístu, o výrobní technologii, dále o struktuře jeho materiálu a vlastnostech. Struktura pístů spalovacích motorů je závislá na použité slitině hliníku. Především se jedná o eutektické nebo nadeutektické slitiny. Tyto slitiny jsou složité polykomponentní soustavy nejčastěji s pěti základními prvky (Al, Si, Cu, Ni, Mg) a dalšími nečistotami, hlavně Fe, Mn, Ti a Zn. Tyto prvky mohou mít vliv na tvorbu různých intermetalických fází (intermetalických sloučenin). Ve struktuře pístů se nachází tuhý roztok α (Al), se značným podílem hliníku. Tento tuhý roztok α (Al), díky krystalizačním poměrům slitiny hliníku v kovové formě, vykazuje dendritickou strukturu (morfologii). V mezidendritických prostorech se nachází zrnité krystaly eutektika a primární krystaly tuhého roztoku β (Si), kde rozpustnost hliníku je tak nepatrná, že se jedná o krystaly primárního křemíku. Vliv dalších prvků v těchto specifických slitinách hliníku může vytvářet intermetalické fáze. Množství, typ a morfologie intermetalických fází jsou dány obsahem a poměrem legujících prvků. Při řešení této bakalářské práce byly použity písty ze dvou typů hliníkových slitin, KS 1275 (AlSi12NiMg) a KS 1295 (AlSi12Cu4Ni2Mg). Na základě jednotlivých prvků je možno charakterizovat vliv jednotlivých prvků:

Nikl vykazuje rozpustnost v tuhém stavu hliníku méně než 0,04 hmotnostních procent. Ve slitinách hliníku má význam legury za účelem zvýšení pevnostních vlastností při vyšších teplotách. Zvyšuje teplotní odolnost, pevnost, houževnatost i odolnost proti korozi, jeho koncentrace ve slitinách je cca 2 % obsahu. Současně snižuje koeficient teplotní roztažnosti.

Hořčík zvyšuje pevnostní vlastnosti u slitin typu Al – Mg – Si a typu Al – Cu – Mg. Nastává u něj však nebezpečí vzniku precipitátů Mg_5Al_3 nebo Mg_5Al_8 , které se mohou vyloučit po hranicích zrn. Jejich vyloučení může zapříčinit vznik interkrystalického porušení hliníkového materiálu nebo jeho interkrystalická koroze.

Měď přispívá ke vzniku chemické sloučeniny Al_2Cu , na které je založeno tepelné zpracování slitin hliníku, dále měď zvyšuje tvrdost i pevnost, ale nepříznivě ovlivňuje tvárnost a snižuje odolnost proti korozi.

Křemík je hlavním prvkem v slévárenských slitinách, jeho obsah může být až do 25 % obsahu. Křemík u slitin hliníku zvyšuje odolnost proti korozi a pevnost.

Jak uvádí Briksí Stunová a Henzl [6], v mikrostruktuře hliníkových slitin pro výrobu pístů spalovacích motorů se objevuje vždy intermetalická fáze hořčíku Mg_2Si , která je součástí

ternárního eutektika Al-Si-Mg₂Si, s teplotou tuhnutí 555 °C. Toto eutektikum tvoří ve struktuře slitiny hliníku drobné tmavé kostrovité útvary. Dále pokud je ve slitině hliníku přítomna i měď, tak tvoří křemík přednostně fáze s mědí. Jak dále uvádí Briksí Stunová a Henzl [6], intermetalická fáze, která se vyskytuje ve slitinách hliníku je fáze s mědí Al₂Cu. Lze konstatovat, že tato fáze je součástí soustavy Al-Si-Cu, resp. ternárního eutektika Al-Si-Al₂Cu. Jeho teplota tuhnutí je 524 °C, [6]. Pro zmíněnou fázi platí, že se vyskytuje vždy, je-li obsah mědi ve slitině hliníku alespoň 1 hmotnostní procento. Jak uvádí Briksí Stunová a Henzl [6] v mikrostruktuře slitiny hliníku tvoří kostrovité útvary hnědé až narůžovělé barvy, často prolínající se s fází Mg₂Si. Problematikou mikrostruktury slitin pro výrobu pístů spalovacích motorů se zabýval také Michna společně s Majrichem [17], kteří provedli analýzu různých intermediálních fází a zpřesnili obsah dalších možných intermediálních fází. Tak např. pokud je ve slitině hliníku přítomen hořčík i měď, tvoří se také vícesložková eutektika, především Al-Si-Al₂Cu-Al₅Mg₈Cu₂Si₆, s teplotou tuhnutí 507 °C. Při reálných rychlostech tuhnutí v kovové slévárenské formě tuhne až při teplotě cca 480 °C.

Nikl je možno považovat za důležitou leguru ve slitinách hliníku pro výrobu pístů spalovacích motorů. Pro nikl je typická intermetalická fáze Al₃Ni, která vykazuje teplotu tuhnutí 640 °C, [6]. Jak uvádí Briksí Stunová s Henzlem [6] a Michna s Majrichem [17] rozpustnost niklu v hliníku je velmi malá (při teplotě cca 20 °C je cca 0,01 hmotnostních procent; tato fáze na světelném mikroskopu vykazuje vzhled tmavě šedých částic).

V daných souvislostech je nutno konstatovat, že při popisu mikrostruktury hliníkových slitin pro výrobu pístů spalovacích motorů pomocí světelné mikroskopie je třeba mít určité znalosti z oblasti praktické metalografie. Pro přesný popis je třeba využít např. EDX analýzu.

Pokud se hodnotí tvrdost pístů spalovacích motorů ze slitin hliníku, pak jejich hodnoty jsou dle Černocho [15] a Píška, Jeníčka a Ryše [16] podle typu slitiny od 95 do 150 HBW. Hodnoty tvrdosti naměřené v této bakalářské práci jsou pro píst z materiálu KS 1275 cca 108 HBW a pro píst z materiálu KS 1295 cca 111 HBW. V pravé stěně pístu ze slitiny KS 1295 byly naměřeny poměrně nízké hodnoty tvrdosti 91 HBW a 98 HBW.

5. ZÁVĚR

Bakalářská práce byla zpracovaná na téma: „Slévárenská technologie pístů pro výrobu spalovacích motorů“ a je rozdělena do dvou základních částí. V první části – rešeršní je proveden funkční rozbor pístu, jeho tepelné namáhání a použité slévárenské slitiny. Dále jsou uvedeny základní technologie výroby pístů, které vedou k náležité a potřebné kompaktnosti zpracovaného materiálu. V druhé části – experimentální byla sledována kompaktnost pístů v řezu vedeném svislou osou pístu. Současně byla sledována mikrostruktura a tvrdost dvou druhů pístů vyrobených ze slitiny KS1275 a Ks1295.

Na základě výsledků této bakalářské práce je možno formulovat tyto dílčí závěry:

1. Výroba pístů spalovacích motorů musí být provedena takovou technologií, která vede ke kompaktnosti stěn pístů spalovacích motorů. V tomto případě je velmi vhodná technologie gravitačního lití do kovových forem s kovovými jádry. Současně je nutno při této technologii dodržet správný metalurgický postup přípravy taveniny, včetně modifikace, očkování a vhodně zvolené teploty taveniny při jejím odlévání.
2. Dále je nutné vyrábět písty spalovacích motorů bez vnitřních vad a porezity tak, aby měly hutnou strukturu. To zabezpečuje volba vhodné technologie, např. gravitační nebo sklopné lití těchto pístů do kovových forem. V tomto konkrétním případě byly písty vyráběny gravitačním litím do kovových forem.
3. Kompaktnost stěn pístů spalovacích motorů je zřejmá i z provedených řezů pístů, jak je patrné z obr. 3-9, obr. 3-10, obr. 3-28 a obr. 3-29. Tím bylo potvrzeno, že byla dobře připravena metalurgie použitých slévárenských slitin i správně zvolena technologie výroby pístů.
4. Též mikrostruktura hliníkových slitin použitých pro výrobu těchto pístů je bez vnitřních vad a porezity. Odléváním do kovových forem byla získána jemnozrná mikrostruktura hliníkových materiálů obou typů pístů. Pro píst ze slitiny KS 1275 (AlSi12NiMg), jde o mikrostrukturu slitiny eutektického siluminu, která obsahuje nikl a hořčík. Eutektikum tvoří tuhý roztok $\alpha(\text{Al})$ a tuhý roztok $\beta(\text{Si})$. Dále z výše uvedených struktur jsou zřejmá světlá místa mikrostruktury, tvořena tuhým roztokem $\alpha(\text{Al})$. Tyto oblasti tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$ odpovídají velikosti až 50 μm . Současně se v mikrostruktuře vyskytují tmavší až deskovité útvary, což je tuhý roztok $\beta(\text{Si})$, který se také nazývá eutektický křemík. Velikost částic tohoto tuhého

roztoku se pohybuje od 10 μm do 35 μm . V mikrostruktuře se také vyskytují černé útvary protáhlého tvaru, což je intermetalická fáze Mg_2Si . Intermetalická fáze Mg_2Si vykazuje velikost 10 μm do 30 μm . Jako poslední se v mikrostruktuře vyskytují (v menší míře) intermetalické fáze niklu Al_3Ni .

Píst ze slitiny a KS 1295 (AlSi12Cu4Ni2Mg) též vykazuje mikrostrukturu slitiny eutektického siluminu, která dále obsahuje měď, nikl a hořčík (4 hmotnostní procenta mědi a 2 hmotnostní procenta niklu). Strukturu této slitiny tvoří tuhý roztok $\alpha(\text{Al})$, což jsou světlá místa mikrostruktury s velikostí 40 až 45 μm a tuhý roztok $\beta(\text{Si})$, neboli eutektický křemík, což jsou tmavší útvary nepravidelných čtyřúhelníků (od 10 μm do 20 μm). Dále mikrostruktura obsahuje černé útvary protáhlého tvaru (intermetalická fáze Mg_2Si , velikosti 10 μm do 40 μm). Součástí mikrostruktury jsou ojedinělé intermetalické fáze na bázi hliníku-mědi-niklu, tj. Cu_3NiAl_6 a fáze Al_2Cu , která se vylučuje v drobných útvarech. Pro přesnější identifikaci fází je nutno použít např. metodu EDX analýzy.

5. Měření tvrdosti obou typů pístů pomocí Brinellovy metody potvrdilo, že tato tvrdost odpovídá předpokládaným hodnotám pro písty ze slitin hliníku (95 až 150 HBW).

Píst ze slitiny hliníku KS 1275 vykazoval průměrnou hodnotu tvrdosti 107, 47 HBW, směrodatnou odchylku 11,28 HBW a variační koeficient 10,5 %. Píst ze slitiny KS 1295 vykazoval průměrnou hodnotu tvrdosti 110, 9 HBW, směrodatnou odchylku 9,76 HBW a variační koeficient 8,8 %.

Protože práce se zabývá materiálovým výzkumem, proto není v bakalářské práci uvedeno ekonomické hodnocení.

6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BEROUN, Stanislav. *Vozidlové motory*. Liberec: Technická univerzita v Liberci. Dostupné také z: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:1733>
- [2] MORÁVEK, Jiří. *Sledování vlastností slitin hliníku používaných pro výrobu pístů spalovacích motorů*, Liberec, 2011. Doktorská disertační práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra strojírenské technologie.
- [3] SVĚTLÍK, Tomáš. *Návrh základních parametrů pístového spalovacího motoru s přímočarým vratným pohybem pístu*. Pardubice, 2014. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravních prostředků a diagnostiky. Dostupné z: <https://dk.upce.cz/handle/10195/57899>
- [4] GSCHEIDLE, Rolf a kol. *Příručka pro automechanika*. Praha: Sobotáles, 2001. ISBN 80-85920-76-X.
- [5] PECHOUT, Martin. *Spalovací motory – základní přehled*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2019. ISBN 978-80-213-2984-3. Dostupné také z: https://katedry.czu.cz/storage/7579_Skripta-Pechout-draft-8.pdf
- [6] BRIKSÍ STUNOVÁ, Barbora a David HENZL. Slitiny hliníku pro písty spalovacích motorů a kompresorů. *Slévárenství*. 2016, **64**(3-4), 82-85. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/301899724_Aluminum_alloys_for_engine_and_compressor_pistons
- [7] HAVEL, Jiří. *Hodnocení porezity u tlakově litych odlitků a slitin*, Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=54554
- [8] NAVRÁTIL, Ladislav. *Termická analýza a velikost zrna primárního křemíku v hliníkové eutektické slitině KS 1275 v závislosti na změně poměru vratného materiálu v tavbě*. Plzeň, 2016. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, Katedra materiálů a strojírenské metalurgie.
- [9] Webová prezentace firmy Vačky Krejbich. [online], <http://www.vackykrejbich.cz/> KREJBICH – KTUNING. *Vačky Krejbich – specializovaná výroba vačkových hřídelí a pístů* [online]. Praha: Krejbich – Ktuning, 2021 [cit. 2021-06-24]. Dostupné z: <http://www.vackykrejbich.cz/>

- [10] RAUSCHER, Jaroslav. *Vozidlové motory: studijní opory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005.
- [11] MAHLE. *Pistons and engine testing*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2012. ISBN 978-3-8348-1590-3.
- [12] PAUER, Václav. *Vývoj konstrukce závodních vozů: vše podstatné z historie techniky formulových vozů*. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3015-8.
- [13] FATA ALUMINUM. FATA Aluminum: Piston Casting. *YouTube* [online]. 18. 10. 2016 [vid. 2020-11-04]. Dostupné z:
https://www.youtube.com/watch?v=hhunngbnaA&feature=emb_logo&ab_channel=FATAAluminum
- [14] ACCESORIOS DESA. Wiseco Performance Products 'How It's Made'. *YouTube* [online]. [Vid. 2020-11-04]. Dostupné z:
https://www.youtube.com/watch?v=29jZc-UgqU&ab_channel=AccesoriosDesa
- [15] ČERNOCH, Svatopluk. *Strojně technická příručka*. 13. Přprac. vyd.. Praha: SNTL, 1977.
- [16] PÍŠEK, F., L. JENÍČEK a P. RYŠ. *Nauka o materiálu. 1. [díl], Nauka o kovech. 3. sv., Neželezné kovy. 2., zcela přeprac. a rozš. vyd.* Praha: Academia, 1973.
- [17] MICHNA, Š. a P. MAJRICH. Nové poznatky o struktuře slitiny AlSi12CuMgNi. *Transactions of the VŠB – Technical Univezity of Ostrava, Metallurgical series*. 2007, (1), 163–173. ISBN 978-80-248-1748-0.