



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**OPTIMALIZACE SLÉVÁRENSKÉ TECHNOLOGIE
VÝROBY ODLITKU PÍSTU ZE SLITINY AL**

OPTIMIZATION OF FOUNDRY TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION OF PISTON FROM AL
ALLOY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adam Poláček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Adam Poláček
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.
Akademický rok:	2023/24

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

Optimalizace slévárenské technologie výroby odlitku pístu ze slitiny Al

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Píst motoru patří mezi nejvíce zatížené součásti spalovacích motorů. V dnešní době se standardně vyrábí slévárenskou technologií gravitačního odlévání do kovových forem. Existuje celá řada konstrukčních provedení, pro které je nutné slévárenskou technologií optimalizovat za účelem volby správných gradientů tuhnutí, minimalizaci vzniku vnitřních dutin a získání optimální mikrostruktury odlitků. V této oblasti hraje nezastupitelnou roli numerická simulace, díky které lze provést porovnání několika variant před výrobou kovové formy.

Cíle bakalářské práce:

- zpracování literární rešerše související s výrobou pístů spalovacích motorů a kompresorů,
- provedení rozboru výroby odlitků pístu z Al slitin,
- provedení numerické simulace plnění a tuhnutí pro zvolený píst,
- vyhodnocení simulací a stanovení závěrů.

Seznam doporučené literatury:

MICHNA, Š., VOJTĚCH, D., MAJRICH, P. Problematika odlévání automobilových pístů gravitačním litím. Slévárenství vol. 11-12, LVII, 2009, ISSN 0037-6825.

MORÁVEK, J. Sledování vlastností slitin hliníku používaných pro výrobu pístů spalovacích motorů. Doktorská disertační práce. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, 2011.

BONOLLO, F., ODORIZZI, S. Numerical Simulation of Foundry Processes, Servizi Grafici Editoriali, Padova, 2001. ISBN 88-86281-63-3.

CAMPBELL, J. Castings. 1st ed. Oxford: Butterworth-Heinemann Ltd., 1991. ISBN 0-7506-1072.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem práce je optimalizace technologie tuhnutí odlitku za účelem snížení či úplného odstranění vznikajících vad. Literární část práce se zabývá materiály, technologií výroby a vad na pístech spalovacích motorů a kompresorů. V návrhové části práce je provedena analýza vznikajících vad. Provede se rentgenové prozáření a řez pístu, kde se zkoumá příčina jejich vzniku. Následně je provedena simulace současné technologie výroby a navržení technologických úprav chlazení. Úpravy jsou ověřeny simulací a v závěru porovnány z hlediska účinnosti na snížení vznikajících vad.

Klíčová slova

Píst, vady, slitina hliníku, řediny, tuhnutí, simulace, pomezita.

ABSTRACT

The aim of work is to optimize the casting solidification technology to reduce or completely eliminate defects. The literary part of the work deals with materials, production technology and defects in the pistons of internal combustion engines and compressors. In the design part of the work, an analysis of the occurring defects is performed. X-ray examination and the cut of the piston are conducted to investigate the causes of their formation. Subsequently, the simulation of the current production technology is carried out and technological modifications to the cooling process are proposed. These modifications are verified through simulation and in the conclusion are compared in terms of their effectiveness in reducing the occurrence of defects.

Keywords

Piston, defects, aluminium alloy, shrinkage, solidification, simulation, posity.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

POLÁČEK, Adam. *Optimalizace slévárenské technologie výroby odlitku pístu ze slitiny Al* [online]. Brno, 2023. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149256>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Vladimír Krutiš.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Optimalizace slévárenské technologie výroby pístu ze slitiny Al vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

místo, datum

Adam Poláček

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu práce panu doktorovi Vladimíru Krutišovi za pomoc, cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval společnosti Almet s.r.o. za možnost vyhotovení této práce, zejména panu řediteli Ing. Satranskému a panu Landsmanovi a dalším zaměstnancům za ochotu a spolupráci. V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu ve studiu.

OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 Rozbor zadání	10
2 materiály pro výrobu pístů.....	14
2.1 Písty vyrobené ze slitin hliníku	14
2.1.1 Struktury slitin	15
2.1.2 Vláknové zpevnění	17
2.1.3 Precipitační vytvrzení	18
2.2 Ocelové písty	18
2.3 Litinové písty.....	21
2.3.1 Zalité Ni-resistové nosiče	21
2.3.2 Těla pístů z litin	22
3 Technologie výroby pístů	23
3.1 Gravitační lití pístů	23
3.2 Technologie kování pístů	24
3.2.1 Materiály pro kování pístů.....	25
4 Vady pístů a jejich odhalení	26
4.1 Metody zjišťování vad.....	26
4.1.1 Defektoskopie	27
4.1.2 Chemické a strukturní rozbory	28
4.2 Vady pístů.....	28
5 Návrh řešení problematiky tuhnutí	31
5.1 Simulace technologie odlévání.....	31
5.1.1 Varianta 1	37
5.1.2 Varianta 2	38
ZÁVĚR.....	39

Seznam použitých zdrojů

Seznam příloh

ÚVOD

Není pochyby, že slévárství je z jedním z nosných odvětví strojírenství. Využití odlitků lze nalézt nejen průmyslu, ale i v běžném životě. Dominantní postavení si slévárství drží hlavně v energetickém a automobilovém průmyslu, ale to neznamená, že nenachází uplatnění na ostatních trzích. Nicméně automobilový průmysl patří v České republice ke stěžejním odvětvím a to hlavně pro odlitky ze slitin hliníku. Jedním z typických představitelů těchto odlitků jsou písty ve spalovacích motorech.

Historie samotných pístů a jejich využití sahá do 18. století, kde byly použity v atmosférických, později v parních strojích. Písty ve spalovacích motorech se objevily později, a to v 19. století. Od té doby uplynulo mnoho let a trend výroby se posunul nejen kvalitou, ale i škálou použití.

Nyní existuje krom automobilového průmyslu celá řada využití – od leteckého, přes lodní, až po průmysl zabývající se kompresory. Trend elektromobility, který aktuálně panuje ve světě, zatím nemůže plnohodnotně nahradit pístové motory, tak jak je známe, a na dohledné době ani nenahradí, proto je stále aktuální se zabývat touto problematikou.

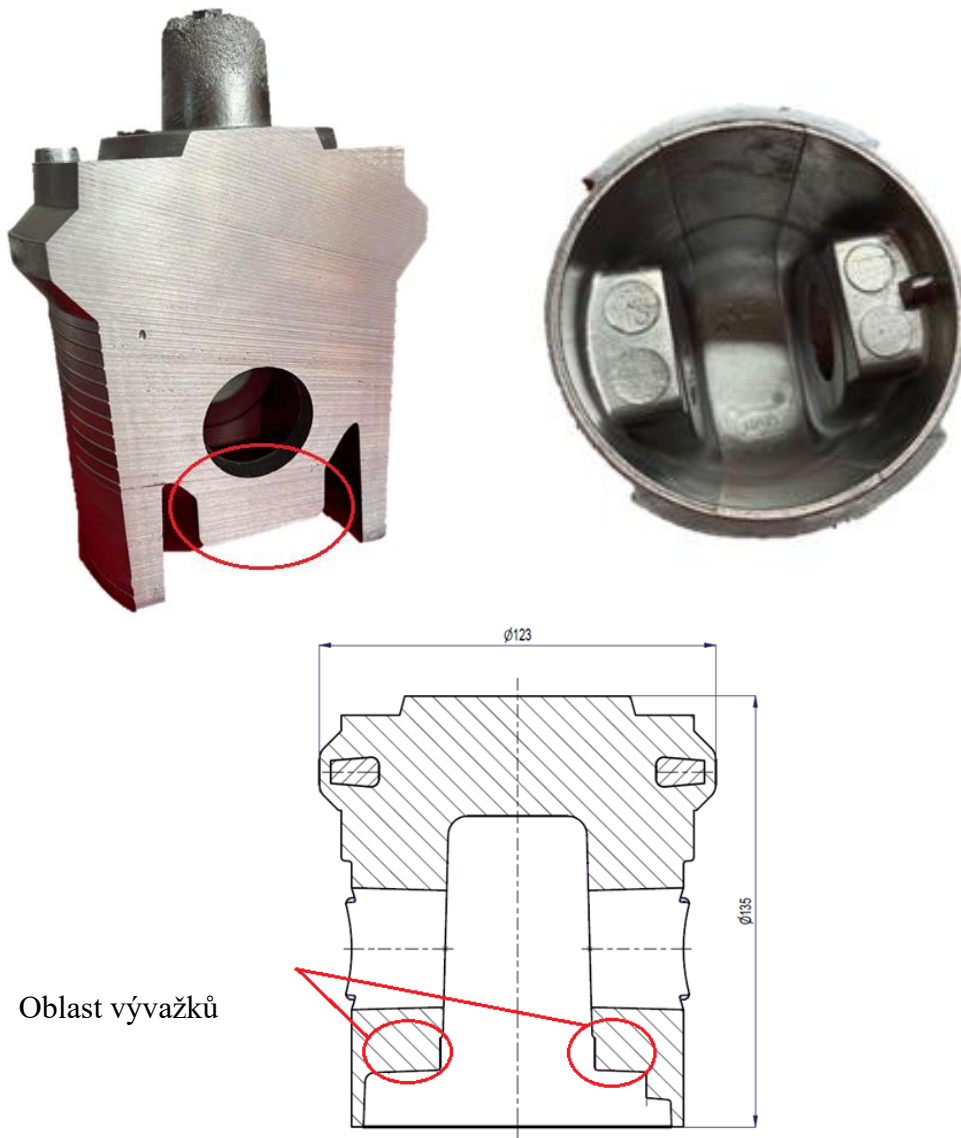


Obr.1 Ukázky pístů. [1; 2]

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Zadání práce je zaměřeno na optimalizaci procesu tuhnutí za účelem snížení vzniku vad s pomocí simulací. Jednou z hlavních problematik slévárenství je právě tuhnutí odlitků. Vzniká zde mnoho změn, problémů a nehomogenit. Pro kvalitní a přesnou výrobu je cílem podniků a jejich technologií proces tuhnutí usměrnit, predikovat a nastavit tak, aby se těmto problémům předcházelo. Práce byla vypracována ve spolupráci se společností ALMET a.s. Od založení v roce 1951 se společnost zabývá litím pístů ze slitin hliníku technologií gravitačního lití do kovových forem a je jedním z předních výrobců nejen v Čechách, ale i v Evropě.

Pro účely práce byl použit vzorek odlitku pístu ZETOR 10515 do traktorů. Píst je vyroben ze slitiny ČSN 42 4336 (AlSi12CuNiMg), viz tab. 2. Jedná se o jednu z běžných slitin hliníku používanou pro výrobu pístů. Někdy lze tyto slitiny najít pod zkratkou LOW-EX. Píst je odléván gravitačním litím do kokily a má v oblasti pístních kroužků Ni-resistový nosič pro zvýšení odolnosti proti opotřebení pístních kroužků. Při výrobě tohoto odlitku se objevují vady v oblasti vývažků, které slouží k vyvážení hmotnosti a setrvačných sil v pístu, viz obr. 2. Zde vznikají řediny – shluk drobných dutin. Objem vad je zhruba 4 % celkové produkce. Roční produkce činí 10 000 kusů.

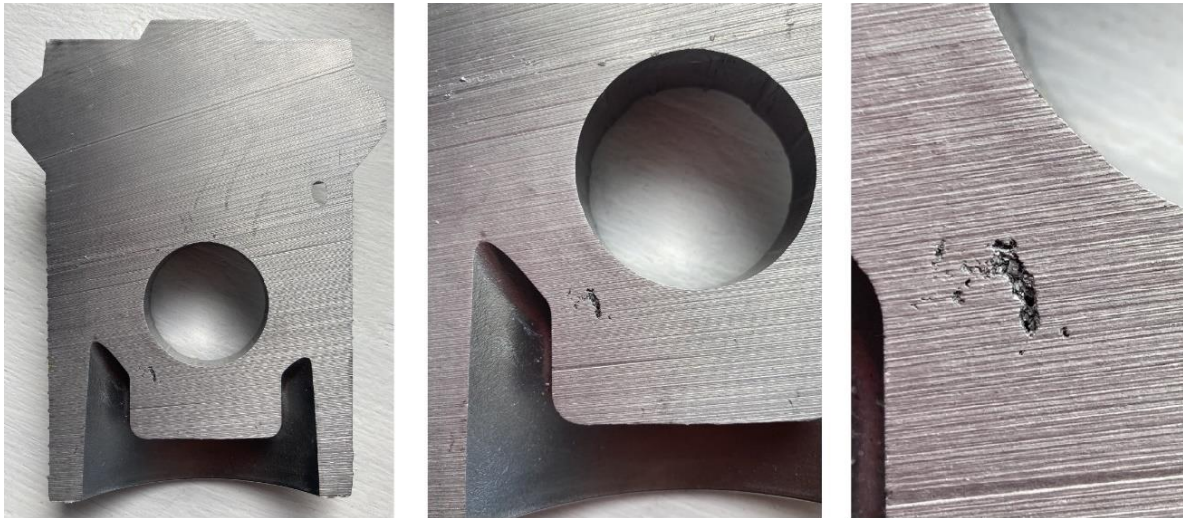


Oblast vývažků

Obr. 2 Vyobrazení polohy vývažků.

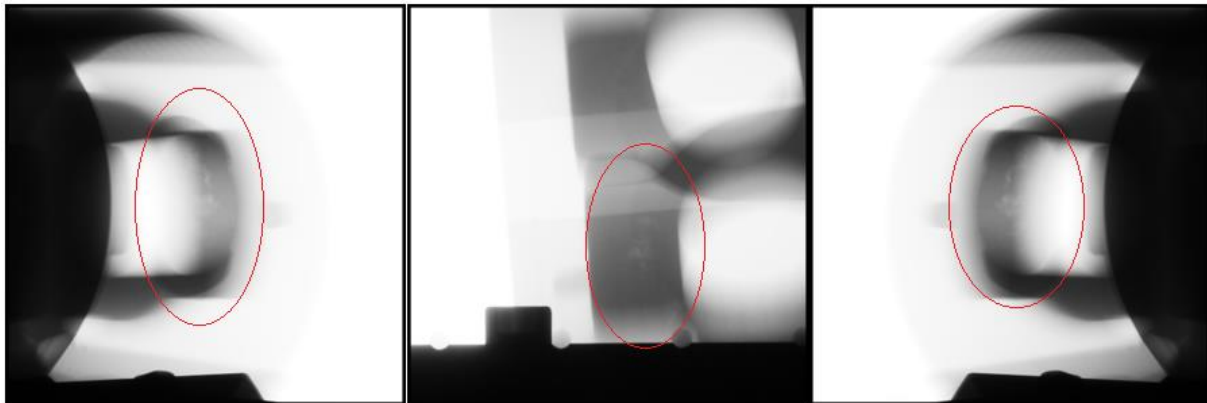
Vady zde vznikají během tuhnutí. Cílem usměrněného tuhnutí je, aby poslední místo, které ztuhne bylo mimo výsledný produkt – tedy čistý odlitek. Při současné konstrukci kokily je to v nálitku. Právě tam je protežováno soustředit vznik vad a tepelných uzlů, které budou následně s nálitkem odříznuty. Tyto uzly ale bohužel vznikají právě i ve vývažcích, kde kvůli nim vznikají i řediny. Řediny se při obrábění čepního otvoru a při obrábění vývažku se často dostávají na povrch.

Povrchové vady v oblasti čepního otvoru jsou neakceptovatelné. Takový odlitek se poté přetavuje a odlévá znovu. Obrázek 3 vyobrazuje detailně vadu na reálném pístu a na obrázku 4 lze vidět rentgenové snímky těchto vad.



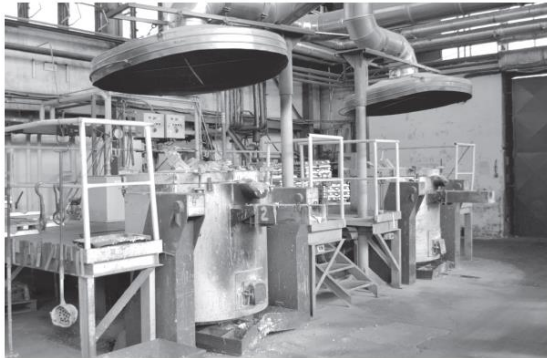
Obr. 3 Reálné vyobrazení vady v řezu.

V červeně vyznačených oblastech na obrázku 4 lze vidět světlá místa. Dalo by se je přirovnat k neuspořádaným shlukům pórů – řediny. Na středovém snímku (obr. 4) lze vidět, jak se řediny tvoří blízko čepního otvoru. Právě zde vzniká riziko, že při obrobení otvoru vystoupí na povrch.

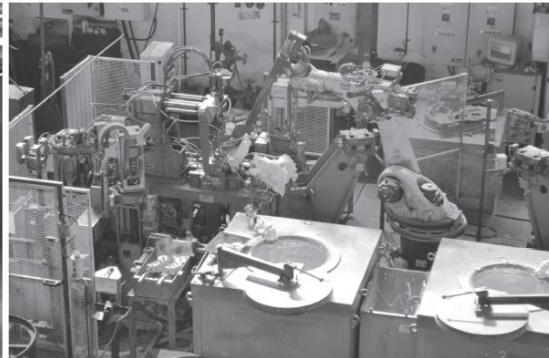


Obr. 4 Rentgenové snímky ředin ve vývažcích.

Materiál se taví v plynových pecích typu MORGAN BT500 či BT 1300 (obr. 5). V těchto pecích se dá roztavit až 530 kg za 80 minut. Více informací lze nalézt v příloze 3. Po roztavení se kov přemísť do udržovacích pecí FATA MF12, kde se již po částech odebrává a odlévá kov. Lije se na plně automatizovaných linkách (obr. 6) a poté se odlitek žihá. [27]



Obr. 5 Plynové pece MORGAN. [27]



Obr. 6 Automatizovaná linka. [27]

Aby bylo možné zabývat problémem hlouběji, je nutné stanovit základní podmínky lití, při kterých je píst odléván. Právě tyto hodnoty jsou zcela zásadní a mají největší vliv na proces lití a tuhnutí.

Tab. 1 Základní podmínky lití

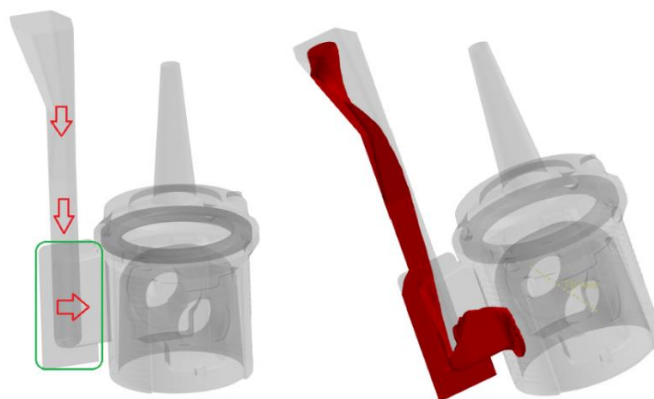
Popis	Licí teplota	Náklon kokily	Předehřátí kokily
Hodnoty	(745 – 755) °C	20°	min. 200 °C

Teplota tavení čistého hliníku je 660°C. Přidáním legur je tato hodnota nižší, avšak hodnoty licí teploty musí být vyšší, protože vzniká riziko příliš brzkého počátku tuhnutí, a to ještě před kompletním zatečením do formy. Zároveň však nesmí být teplota příliš vysoká, neboť hrozí vznik vad spojených s vyšším naplyněním taveniny a větším stahováním, proto je tato teplota mezi 745 – 755°C.

Náklon kokily byl zvolen experimentálně společností Almet. Při přibližně 20° náklonu tavenina proudí do kokily nejvýhodněji. To znamená klidné a rovnoměrné proudění, které kladně ovlivňuje proces plnění.

Pro správně vyhotovený odlitek je nutné předehřátí kokily. Teplota má zcela zásadní vliv na vznik některých vad, odstraní riziko prasknutí kokily vlivem náhlé a prudké změny teplot a prodlužuje životnost formy. Řízení teploty umožňuje technologům zajištění usměrnění tuhnutí.

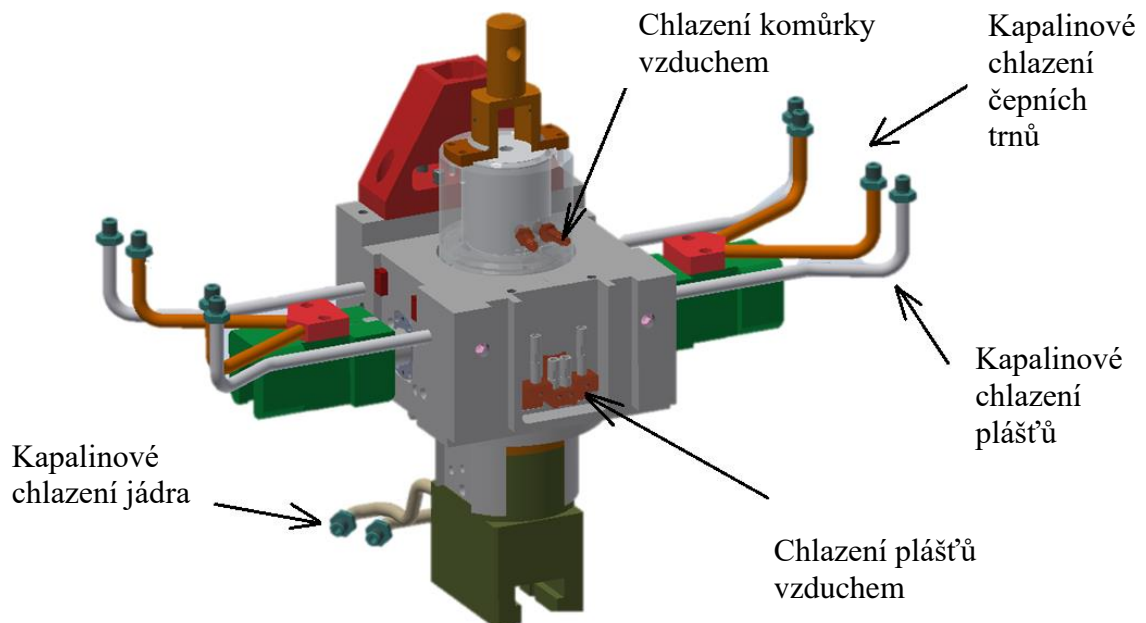
Tavenina proudí do kokily spodem – to je výhodné pro plynulé a klidné plnění. Protéká skrz plošný filtr ve vtokové soustavě, která zpomalí taveninu, profiltruje nejhrubší nečistoty a usměrní tok, viz obr. 7, kde zelený rámeček vyobrazuje umístění filtru, červené šipky směr toku taveniny a rudá barva ve vtokové soustavě simuluje reálný průtok taveniny do formy.



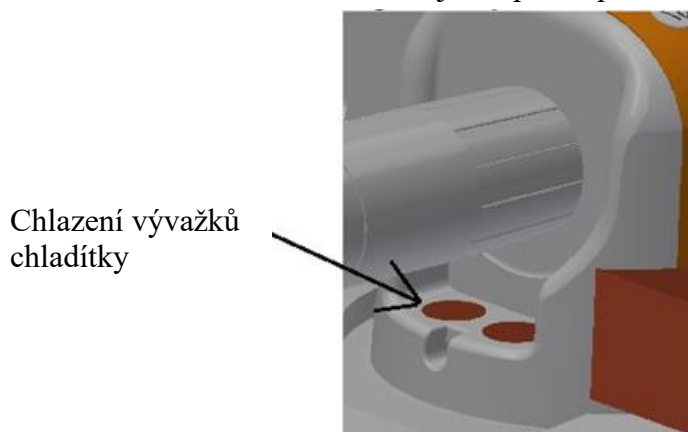
Obr. 7 Zobrazení vtokové soustavy.

Konstrukce kokily – kovová forma pro odlévání, je dělena vertikálně na 2 hlavní poloviny, takzvané pláště. Dutinu odlitku tvoří třídlíné skládané jádro a shora uzavírá kokilu komůrka, do které se vkládá nálitková vložka, sloužící k vytvoření nálitku. Všechny 4 hlavní části (2 pláště, jádro, komůrka) jsou chlazeny.

Zdroj chlazení je u hlavních částí kapalinový, vzduchový nebo se dále v kokile nachází několik chlazení měděnými chladítky, která se využívají kvůli vyšší tepelné vodivosti než má ocel, a odvádí tak intenzivněji teplo z odlitku a z kokily. V případě kapalinového chlazení je médium voda pokojové teploty a u vzduchového chlazení se používá stlačený vzduch. Na obrázku 8 lze vidět rozmístění chlazení.



Pohled na jádro pod čepními trny



Obr. 8 Schéma chlazení.

Použité materiály jsou převážně ocel a slitiny mědi. Z ocelí se používá buď konstrukční obvyklé jakosti nebo nástrojová. Nejnáročnější díly, náchylné na rozměrovou stálost a přesnost jsou z oceli nástrojové (jádro) a jiné díly např. pláště jsou z konstrukčních ocelí. Některé části z chladicí soustavy jsou z mědi či jejích slitin.

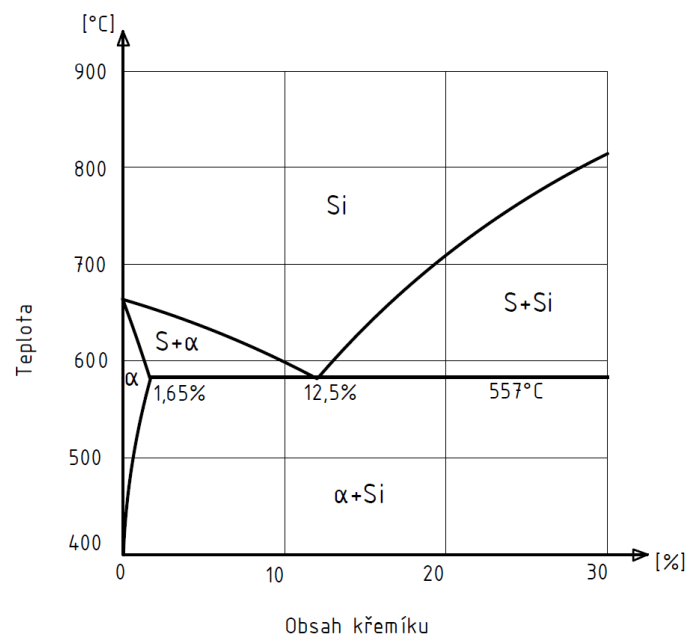
2 MATERIÁLY PRO VÝROBU PÍSTŮ

Píst, ať už v automobilovém či jiném průmyslu, je velmi namáhaná součást vyžadující specifické vlastnosti a metalurgické zpracování. Je zde vyžadována hlavně dostatečná pevnost, ale také nízká hmotnost, která hraje v konstrukci pístu velkou roli (s rostoucí hmotností, roste i namáhání součásti). Písty pracují při vysokých teplotách, tlacích a jejich významných rozdílech, častokrát i hodiny v kuse. Musí splňovat nízkou tepelnou roztažnost i vysoký odvod tepla. Proto je nutné při jejich výrobě, materiálu, zpracování a chemickému složení dbát vyšší pozornosti, než u některých jiných součástí. Existují dva základní materiály pro výrobu pístů a to primárně slitiny hliníku a oceli. V závislosti na motoru může být píst vyroben pouze ze slitiny hliníku nebo může být vyroben z více materiálů, například může mít hliníkový plášť a ocelové dno. [4]

2.1 Písty vyrobené ze slitin hliníku

Hliník, jakožto lehká slitina s vysokou tepelnou vodivostí, má predispozice k použití v pístech. V nelegovaném stavu je jeho pevnost a odolnost vůči opotřebení malá, ale po objevení precipitačního vytvrzení Alfredem Wilmem v roce 1906, se hliníkové slitiny staly užitečnými a vhodnými pro technické účely. [1]

Nejčastěji zastoupenou skupinou jsou písty ze slitin hliníku. Pro specifické aplikace, jako jsou písty spalovacích motorů nebo kompresorů, se používají zejména siluminy s vyšším obsahem křemíku (10 – 25 %), viz obr. 9 a s obsahem doplňkových legur, které významně zlepšují nejen mechanické, ale i fyzikální a užité vlastnosti. [3]



Obr. 9 Fázový diagram AlSi. [1]

Mezi tyto vlastnosti lze zařadit obecně vyšší mez kluzu a pevnosti, a to za i zvýšených teplot, vyšší tvrdost, nižší součinitele tepelné roztažnosti, vyšší součinitele tepelné vodivosti a například lepší kluzné vlastnosti či odolnost proti opotřebení, a to při zachování dobrých slévárenských vlastností. [3]

Typické jsou slitiny eutektického až nadeutektického složení (obr. 9), ale obecně lze říci, že obsah křemíku se pohybuje zhruba v rozmezí od 10 do 25 %. Slitiny jsou oproti jiným slévárenským siluminům legovány zejména mědí, hořčíkem a niklem. Obsah těchto legur ve slitinách se však pohybuje kolem 0,5 – 2,5 % v různých variacích a poměrech. Kombinace niklu

a mědi způsobuje nižší součinitel tepelné roztažnosti a zlepšení mechanických vlastností za vyšších teplot. Jeho obsah však zhoršuje slévárenské vlastnosti (zabíhavost). Legování mědí zase zvyšuje pevnost, obrobitelnost a tvrdost na úkor slévateľnosti a odolnosti proti korozi a zvětšuje sklon k tvorbě trhlin za tepla. Hořčík v těchto slitinách vždy v kombinaci s niklem nebo s niklem a mědí zvyšuje pevnost a tvrdost po tepelném zpracování vlivem precipitačního vytvrzení. Písty s obsahem do 13 % křemíku (minimálně 11 %) se používají v zážehových motorech, nad 13 % křemíku (maximálně 18 %) se používají ve vznětových motorech. V tabulce č.2 jsou uvedeny běžné slitiny hliníku pro výrobu pístů spalovacích pístů a kompresorů. [3; 4]

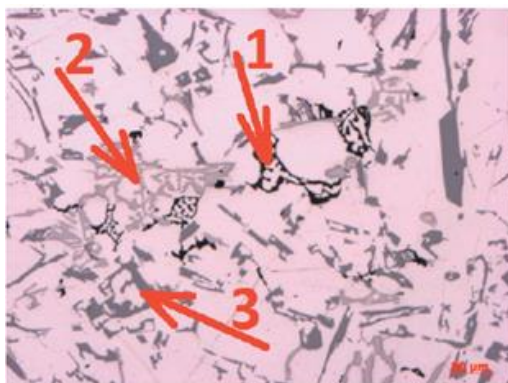
Tab.2 Označení a chemické složení slitin hliníku používaných pro výrobu pístů spalovacích motorů a kompresorů. [3]

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

Výjimkou ve skupině výše zmíněných slitin, viz tab. 2, je slitina AlCu4Ni2Mg2, kde na rozdíl od ostatních slitin je hlavní přísadou měď. Ten zaručuje vyšší pevnost a tvrdost slitiny včetně použití za vyšších teplot za předpokladu tepelného zpracování, kde se vytvrzovacím prvkem stává fáze mědi. Ze slévárenského pohledu však tato slitina nemá dobré vlastnosti a má výrazně zhoršenou obrobitelnost. Vliv ostatních prvků je obdobný jako u slitin popsaných výše. Tato slitina také není zanesena v ČSN EN 1706. [3]

2.1.1 Struktury slitin

Přestože se jedná o eutektické až nadeutektické slitiny, vlivem dalších obsažených prvků bývá struktura slitin tvořena dendrity primárního tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$. V mezidendritických prostorech se nachází eutektikum β , krystaly primárního křemíku a intermetalické fáze, viz obr. (10, 11, 12). Množství, typ a tvar intermetalických fází jsou dány obsahem a poměrem legujících prvků. [2]

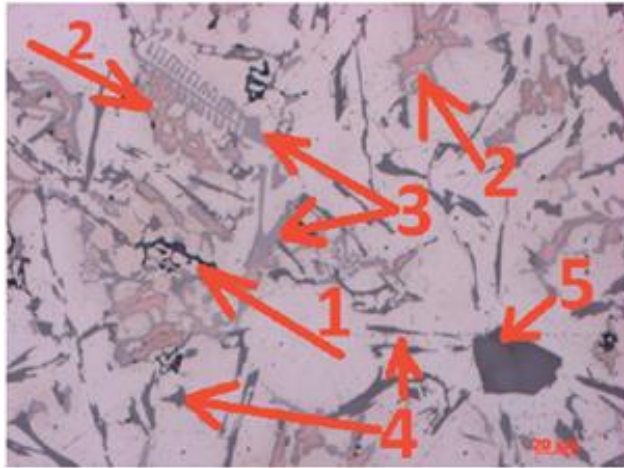


1. Fáze hořčíku
2. Fáze mědi a niklu
3. Eutektický křemík

Zvětšeno 200x

Obr. 10 Eutektikum a charakteristické intermetalické fáze slitině AlSi12CuNi. [3]

Ve slitinách hliníku se tvoří intermetalické fáze, z nichž nejcharakterističtější jsou Mg_2Si . Rozpustnost těchto fází klesá s klesající teplotou a jejich výskyt je ovlivněn i obsahem dalších přísadových prvků. Výsledkem je eutektikum $AlSiMg_2Si$, které tvoří drobné kostrovité útvary ve struktuře slitiny. Hořčík také tvoří fáze s mědí a reaguje s železem, což vede k vzniku komplexního eutektika s dalšími prvky. [3]

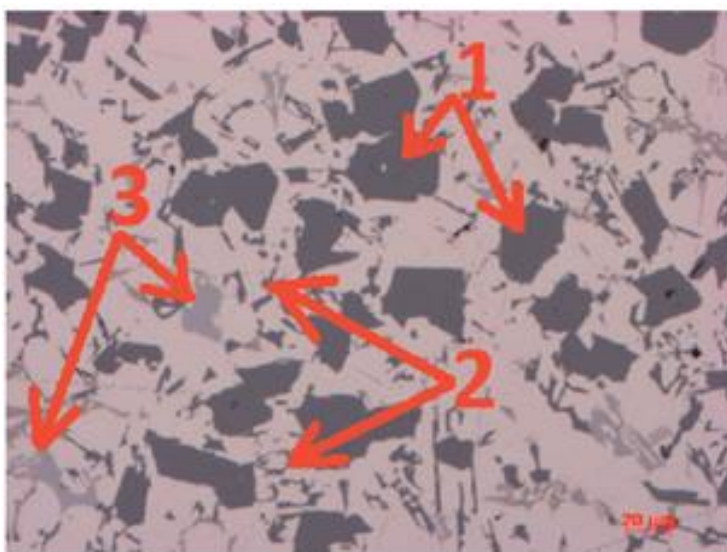


1. Intermetalické fáze hořčíku
2. Intermetalické fáze mědi a niklu
3. Zrnitý eutektický křemík
4. Zrnitý eutektický křemík s primárním krystalem

Zvětšeno 200x

Obr. 11 Fáze slitiny $AlSi_{12}CuNi$. [3]

Fáze $CuAl_2$ je charakteristická pro slitiny hliníku obsahující měď a často se vyskytuje spolu s fázemi $AlMg$ nebo $AlMgSi$ v intermetalických slotech. Tyto fáze se objevují jako kostrovité útvary hnědé až narůžovělé barvy, které mohou být prorostlé fází Mg_2Si . Měď má v hliníku omezenou rozpustnost a pokud je v obsahu slitiny překročena, začínají se tvořit fáze mědi Al_2Cu jako součást potrojného eutektika $AlSiCuAl_2$ s rovnovážnou teplotou tuhnutí $524\text{ }^\circ C$. Tyto fáze jsou v slitinách přítomné vždy, je-li obsah mědi alespoň 1 %. Tato vícesložková eutektika však tuhne až při teplotě kolem $480\text{ }^\circ C$. Vliv fází mědi Al_2Cu na mechanické vlastnosti slitin hliníku je vesměs pozitivní. Tyto fáze zvyšují pevnost, odolnost proti únavě a tvrdost slitiny. Nicméně při vysokém obsahu těchto fází může dojít ke zhoršení plasticity a náchylnosti k lámavosti. [3]



1. Primární křemík
2. Eutektický křemík
3. Intermetalické fáze

Zvětšeno 200x

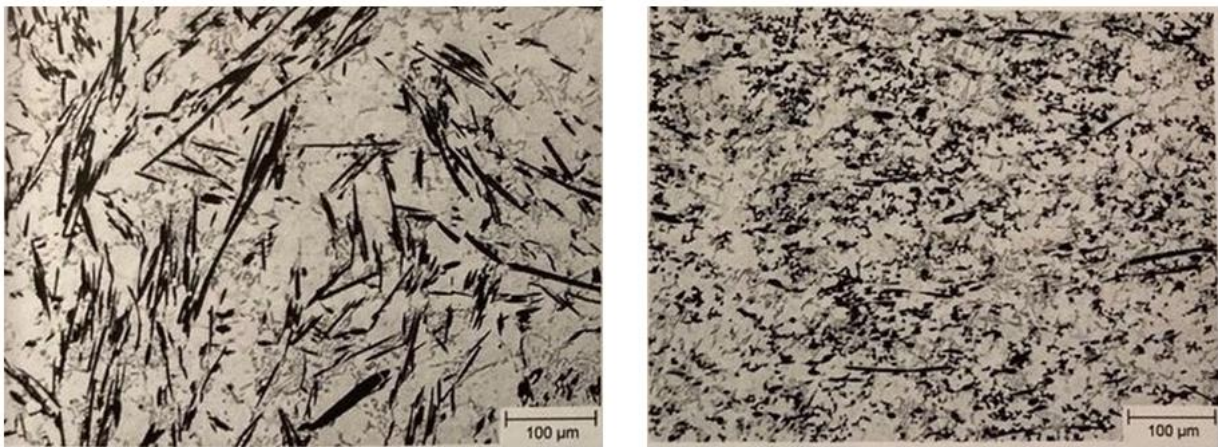
Obr. 12 Charakteristická struktura slitiny $AlSi_{25}CuNiMg$. [3]

Nikl je třetí nejvýznamnější leguroou těchto slitin. Fáze Al_3Ni (NiAl_3) tvoří tmavě šedé částice. Rozpustnost niklu v hliníku je velmi malá a omezená. Fáze Al_3Ni má teplotu tuhnutí 640°C . Za přítomnosti mědi a železa vznikají s niklem vícesložkové fáze, např. $(\text{Ni,Cu})_2\text{FeAl}_7$. Tyto fáze mají dobrou tepelnou stabilitu, proto si slitiny s obsahem 1–2 % Ni zachovávají dobré mechanické vlastnosti i za zvýšených teplot. V pístových slitinách jsou nejčastěji přítomny světle šedé spojitě až kostrovité útvary fáze Cu_3NiAl_6 , které jsou viditelné na výbrusu pomocí světelného mikroskopu. [3]

U nadeutektických slitin je ve struktuře přítomný také primární křemík. Přirozeně by při dané rychlosti ochlazování a tuhnutí krystalizoval ve formě masivních plošných podlouhlých útvarů, vzhledem k očkování fosforem je formován do drobnějších homogenně rozptýlených útvarů (obr. 12). Velikost těchto útvarů se často upravuje na požadavek zákazníka, kdy např. průměrná hodnota na sebe kolmých rozměrů částice křemíku a největší rozměr částice nesmí překročit stanovenou velikost v μm . Za tímto účelem se provádí metalografické měření těchto částic a jejich statistické vyhodnocení. Ve struktuře se vyskytují také nežádoucí intermetalika, zejména fáze železa, ve kterých je většinou přítomen i mangan. Na výbrusech se jeví jako šedé útvary, jejichž morfologie se různí od jehlicovitého tvaru, který je nežádoucí, až po kostrovité útvary, což je odvislé od typu intermetalika, resp. jeho chemického složení. [3]

2.1.2 Vláknové zpevnění

Keramická vlákna výrazně zvyšují tepelné a mechanické zatížení pístů ze slitin hliníku. Použitím tlakového lití, se vlákna Al_2O_3 formují do průměru cca 3 - 4 μm a délky 50 - 200 μm . Tato vlákna pronikají do taveniny. Na obrázku 13 je vidět rozdíl mezi vláknové zpevněnou strukturou a nezpevněnou strukturou



a) Struktura bez vláknového zpevnění.

b) Struktura s vláknovým zpevněním.

Obr. 13 Struktury slitiny M124. [1]

Nepatrnými nevýhodami této formy zpevnění je poněkud vyšší hustota a nižší tepelná vodivost, avšak tyto nevýhody jsou kompenzovány mnoha výhodami vláknově vytvrzených kompozitních materiálů, – například vyšším modulem pružnosti v tahu a nižším koeficientem tepelné roztažnosti. Odolnost vůči mechanické a tepelné únavě stoupá. [1]

Kvůli tomuto důvodu jsou kompozitní materiály obzvláště vhodné pro místní zpevnění zejména vysoce namáhaných zón, jako je spalovací komora v pístech diesellových motorů. V komerčních vozidlech prokazují písty s lokálně vláknově vytvrzenou spalovací komorou funkčnost a spolehlivost dlouhá léta. [1]

2.1.3 Precipitační vytvrzení

Další významnou technologií pro zvyšování pevnosti materiálů je precipitační vytvrzení. Pro precipitační proces je základním předpokladem výrazná změna rozpustnosti. Princip spočívá v ohřátí slitiny na nižší teplotu než teplota solidu a následném rozpadu přesyceného tuhého roztoku.

Z přesyceného roztoku se začne vylučovat ta fáze, která bude bohatší na prvek, kterým je ta původní fáze přesycena. Podoba této fáze se nevytvoří přímo, ale přes několik mezistupňů, jejichž struktura se postupně přibližuje struktuře konečné rovnovážné fáze. [4]

Precipitace se uplatňuje u slitin hliníku, některých slitin mědi a také u slitin železa. Vytvrzování se skládá z několika technologických úkonů, které na sebe navazují a vzájemně souvisí do té míry, že jejich dílčí provedení ovlivňuje často rozhodujícím způsobem konečný výsledek.

Vytvrzování se skládá na: [4; 7]

- rozpouštěcí žíhání,
- ochlazení,
- stárnutí.

Rozpouštěcí žíhání je přípravná operace před následným ochlazením. Slitina, která je v rovnovážném stavu za normální teploty heterogenní, se mění při žíhání na homogenní. Horní hranice teplot pro žíhání je zhruba 10 °C pod teplotou solidu. Překročením této hodnoty je slitina znehodnocena, hranice zrn se nataví a zrno hrubne. Naopak při nižší teplotě je riziko nedokonalého rozpuštění segregátů a nedostaví se očekávané zlepšení mechanických vlastností. Snahou během žíhání je zkrátit dobu co nejvíce, zbytečným prodlužováním procesu zrno hrubne. U slitin, které byly před procesem tvářeny za studena, probíhá následně ještě rekrystalizační žíhání. [4; 7]

Ochlazování – účelem je zabránit segregaci fází, tedy získat přesycený tuhý roztok. Je-li slitina ochlazována menší rychlostí nebo není-li slitina po vyjmutí z pece ochlazena ihned, může dojít k částečné segregaci na hranicích zrn. Slitina má pak menší korozivzdornost, nižší pevnost i tažnost. [4; 7]

Stárnutí – rozpad přesyceného tuhého roztoku označujeme souborně jako stárnutí, přičemž výrazným dílčím pochodem je právě precipitace. V místech koncentračních rozdílů probíhá nukleace nové fáze, která je bohatší na přísadu než základní tuhý roztok. Stárnutí u některých slitin probíhá již při normální teplotě a je označováno jako přirozené, na rozdíl od stárnutí při zvýšené teplotě, které je označováno jako umělé. Při umělém stárnutí probíhá precipitace daleko rychleji než při přirozeném stárnutí. [4; 7]

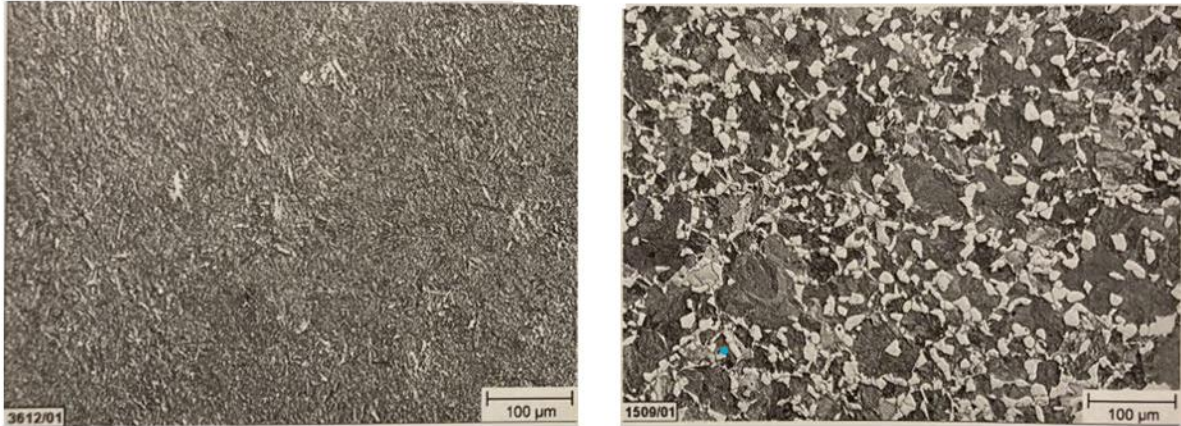
2.2 Ocelové písty

Další velkou skupinou jsou písty z oceli. Jedním z prvních podniků, které otevřely cestu ocelovým pístům je firma Mahle. Nejčastěji lze ocelové písty nalézt ve vznětových motorech těžkých užitkových automobilů, ale také v některých komerčních automobilech. Ocel je slitina železa a uhlíkem a dalších prvků s méně jak 2,14 % uhlíku. [5; 6]

Díky nižší tepelné vodivosti oceli, lze ve spalovací komoře dosáhnout větší teploty hoření. Spalování je rovnoměrnější a trvá kratší dobu. Výsledkem je nižší spotřeba paliva a nižší emise CO₂. [6]

Další výhodou je nízká roztažnost ocelového pístu – zhruba poloviční oproti hliníkovému. Připomeňme, že písty/pouzdra válců způsobují 40 – 50 % tření v motoru. Testy ukázaly, že při použití ocelového pístu se hliníková pouzdra válců více roztahují, čímž rostou tolerance a snižuje se tření. [6]

Po zahřátí se transformují do tvárného austenitu (vhodné pro tváření). Oceli pro komponenty mají obecně uhlíku méně než 0,8 %. Pokud jsou chlazeny pomalu po odlévání, či tváření za tepla, vytvoří feriticko-perlitická struktura, viz obrázek 14b. V tomto stádiu mají oceli obvykle nedostatečnou pevnost a tvrdost. Tvrdost materiálu je pak zvýšena různými metodami. [1]

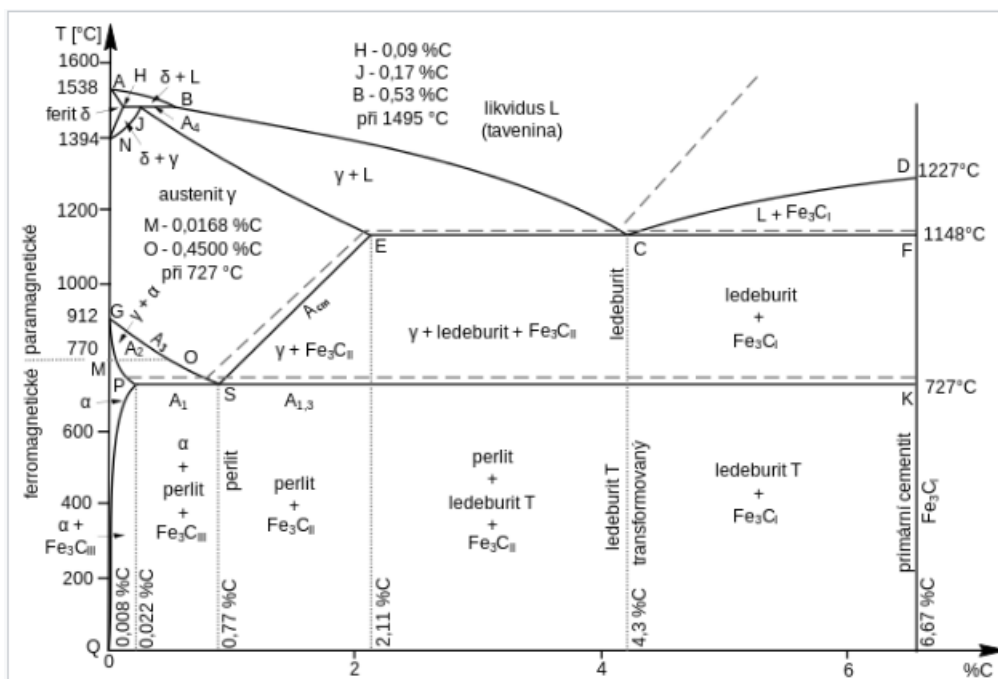


a) Zušlechtěná struktura oceli 42CrMo4.

b) Feriticko-perlitická struktura oceli 38MnVS6.

Obr. 14 Struktury ocelí pro písty. [1]

Jeden z významných procesů je zušlechtění, kde je ocel prudce ochlazen z vysoké teploty (nad 850 °C) a následně popuštěna. Přeměna austenitu na perlit a ferit, jak je poukázáno v Fe-3C diagramu na obrázku 15, nenastává kvůli náhlé omezené pohyblivosti atomů uhlíku v matici železa. Uhlík zůstává nuceně rozpuštěn v krystalové mřížce, ačkoli to nemá efektivní rozpustnost pod rovnovážnými podmínkami. To vede k velkému zkreslení mřížky, které je vyjádřeno makroskopicky stejnou tvrdostí, pevností, ale také křehkostí. Tato vytvrzená struktura s typicky jehlicovitého vzhledu je nazývána martenzit. Následující ohřev materiálu nebo zušlechtění, poněkud zmírní toto napětí a tvoří zušlechtěnou strukturu (obr 14a). Tvrdost a pevnost je poměrně snížena, ale houževnatost stoupá. [1; 8]



Obr. 15 Fe-3C diagram. [8]

Rychlost kalení klesá od okraje k jádru součásti a nakonec je menší, než je kritická rychlost ochlazování u ocelí. To znamená, že austenit v tomto místě již není kompletně přetvořen na martenzit. Materiál zcela neztvrdne. Prvky jako mangan, chrom, nikl nebo molybden zvyšují prokalitelnost slitiny redukováním její kritické rychlosti ochlazování. Toto je důležité zejména pro komponenty s velkými tepelně zpracovanými průřezy, protože to může omezit ztrátu pevnosti směrem k jádru. [1]

Pro velmi namáhané písty a jeho součásti se používá tepelně zpracovaná ocel 42CrMo4. Kromě zlepšené prokalitelnosti, podporují oba prvky slitiny tvorbu karbidů, molybden navíc zvyšuje pevnost ve zvýšených teplotách. Avšak i pro tuto ocel je předpoklad degradace pevnosti směrem k jádru vlivem tepelnému zpracování v průřezu a změnách v něm. Další vlastnosti ocelí pro písty, viz příloha 1. [1]

Tab. 3 Složení ocelí pro výrobu pístů. [1]

Popis		42CrMo4	38MnVS6
Stav tepelného zpracování		Tepelně zpracované	Řízené chlazení z deformačního tepla
Obsah prvků [%]	C	0,38 - 0,45	0,34 - 0,41
	Si	max. 0,4	0,15 - 0,8
	Mn	0,6 - 0,9	1,2 - 1,6
	Cr	0,9 - 1,2	max. 0,3
	Mo	0,15 - 0,3	max. 0,08
	P	max. 0,035	max. 0,025
	S	max. 0,035	0,02 - 0,06
	V		0,08 - 0,02
	N		0,01 - 0,02

Precipitační vytvrzení u ocelí probíhá obdobně jako u slitin hliníku. Vytvrzené feriticko-perlitické oceli (zkráceně AFP oceli), vykazují malé množství vanadu nebo niobu (kolem 0,1 % hmotnosti). Tyto slitiny jsou proto označovány jako mikroslitinové oceli. Když je materiál zahřátý na tvářenou teplotu, rozpustí se mikroslitinové přísady kompletně do tuhého roztoku γ . Tvářené části je povoleno chlazení na vzduchu řízenou rychlostí okamžitě po tváření za tepla. Jakmile se austenit přemění na ferit a perlit, karbidy a karbonitridy těchto mikroslitinových přísad precipitují do velmi jemné mřížky feritu a zvýší se pevnost, zejména pak mez kluzu, která zabrání dislokační pohyblivosti. [3]

Obrázek 14b ukazuje typickou AFP strukturu na oceli 38MnVS6. Tento materiál je upřednostněn ve výrobě ocelových pístů pro běžné komerční motory vozidel a pro tvářené ocelové pláště v pístech z kompozitů. Výhodou skupiny těchto materiálů, v porovnání s tepelně zpracovanými oceli, je lepší obrobitelnost feriticko-perlitické struktury a eliminace nákladného tepelného zpracování. [1]

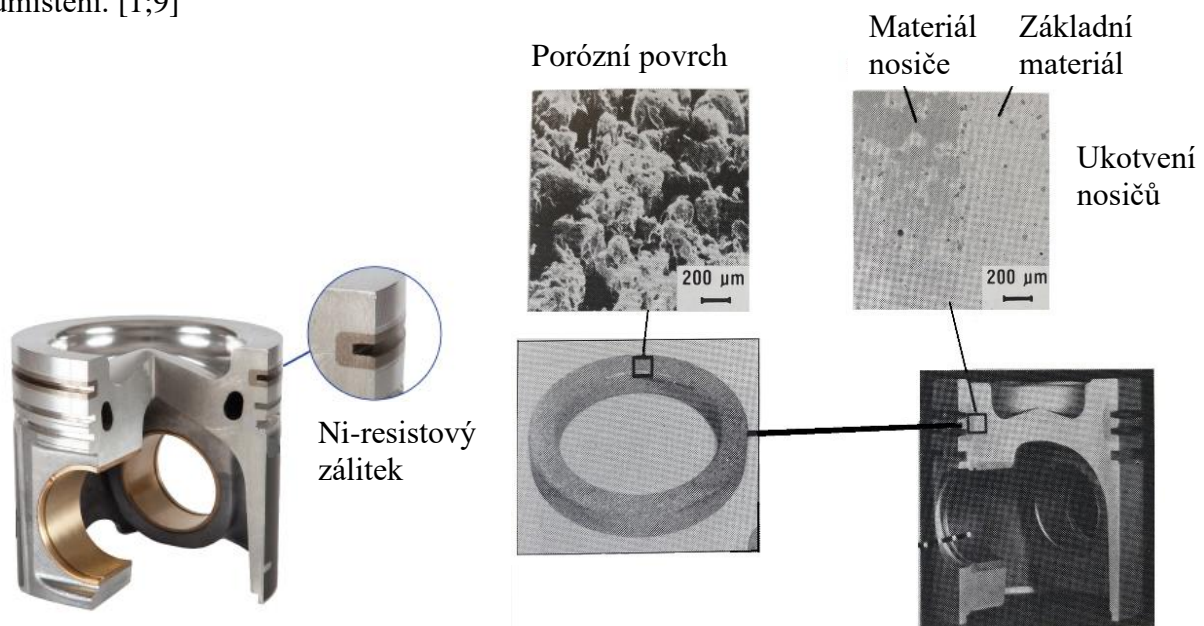
Jak 42CrMo4 zušlechťená ocel, tak 38MnVS6 AFP ocel jsou vhodné pro použití do teplot 450 °C, pokud jde o pevnost za zvýšených teplot a korozivzdornost. [1]

2.3 Litinové píсты

Vzácně lze pro výrobu těla pístu použít i litinu. Litina je směs železa s více jak 2,14 % uhlíku a dalších prvků. Uhlík je vyloučen ve formě grafitu. (kuličkový, lupínkový, vločkový, červíkovitý). Pro píсты se používá zejména tvárná litina (s kuličkovým grafitem). V pístech dále lze najít litinu na zalitých nosičích, které se nachází v oblasti pístních kroužků. Slouží k prodloužení životnosti pístních kroužků. Zde může být krom litiny tvárné i litina šedá (s lupínkovým grafitem). [1; 9]

2.3.1 Zalité Ni-resistové nosiče

Kroužky, zalité v pístu v oblasti pístních kroužků se obecně nazývají Ni-resistové nosiče (austenitická litina). Používají se výhradně v pístech ze slitin hliníku a slouží k prodloužení životnosti pístních kroužků. Obecně lze říci, že se používají v dieslových motorech. Zvýšený obsah niklu v prstenci umožňuje roztahování a smršťování kroužku stejnou rychlostí jako píst, což vede k prodloužení pracovního života pístu. Na obrázcích 16 a 17 je vyobrazen tvar a umístění. [1;9]



Obr. 16 Umístění Ni-resistivých nosičů. [10] Obr. 17 Umístění a struktura Ni-resistivých nosičů. [11]

V porovnání s litinami s perlitickou nebo feritickou strukturou, mají austenitické litiny z důvodu relativně vysoké tepelné expanze velký význam v produkci těchto nosičů. Například slitina M-H má koeficient tepelné roztažnosti $\alpha \approx 17,5 \cdot 10^{-6}$ m/mK, což je v porovnání se standardní litinou $\alpha \approx 10 \cdot 10^{-6}$ m/mK, téměř srovnatelné s slitinou hliníku M124 ($\alpha \approx 21 \cdot 10^{-6}$ m/mK). To znamená, že po zalití slitinou hliníku a následném ztuhnutí, je kritické napětí mezi tělem pístu a nosičem je výrazně nižší, než při použití běžné litiny. Většina nosičů je vyrobena z austenitické litiny s lamelárním grafitem. Ve speciálních případech je použita vysokopevnostní austenitická litina s kuličkovým grafitem. Nosiče se vyrábí jako odstředivě lité trubky, které mají rovnoměrnou strukturu. Více podrobností o složení a vlastnostech lze nalézt v tabulce 4 a v příloze 2. [1;9]

Tab. 4 Složení litin pro výrobu pístů a nosičů. [1]

Popis		Austenitické litiny pro nosiče		Litiny pro těla a pláště pístů
Austenitické litiny pro nosiče		M-H (lamelární)	M-K (kuličkový)	M-S70
Obsah prvků [%]	C	2,4 - 2,8	2,4 - 2,8	3,5 - 4,1
	Si	1,8 - 2,4	2,9 - 3,1	2 - 2,4
	Mn	1 - 1,4	0,6 - 0,8	0,3 - 0,5
	Ni	13,5 - 17	19,5 - 20,5	0,6 - 0,8
	Cr	1 - 1,6	0,9 - 1,1	< 0,1
	Cu	4 - 7		
	Mo			
	Mg		0,03 - 0,05	0,04 - 0,06

Důležitým faktorem při používání těchto kroužků je proces takzvané „alfinace“. Metoda spočívá v ponoření kroužku do taveniny ze slitiny Al-Si, označované též jako alfinální lázeň, před vložením pístního kroužku do kovové licí formy. Čas ponoření je od 3 do 4 minut při teplotě 720 až 730 °C. Účelem je nanesení vrstvy slitiny Al-Si na Ni-resistové nosiče a tím zajištění lepšího propojení s hliníkovou slitinou pístu po odlití do formy. Opakované ponoření nosičů v alfinální lázni způsobuje trvalé zvýšení obsahu železa během difuze do taveniny. Zvyšování obsahu železa v lázni snižuje její životnost. Kritérium pro výměnu konečné lázně je obsah železa ve slitině odpovídající 6 hmotnostním procentům. Překročení tohoto obsahu železa vede k devalvaci alfinální koupele a je nutná následná obměna. [12]

2.3.2 Těla pístů z litin

Materiály používané pro lití těl pístů jsou převážně perlitické, a to z důvodu dobré pevnosti, nízkého koeficientu lineární roztažnosti a nízkému opotřebení. Najdou uplatnění ve vysoce namáhaných dieslových motorech. Nedostatky pístů ze slitin hliníku, jako je nízká tepelná pevnost a velký koeficient lineární roztažnosti litina eliminuje. Hustota litin je přibližně 3x větší než u slitin hliníku.

Litinové písty jsou převážně vyrobeny z materiálu M-S70, viz tabulka 4. Litina je například používána v jednoduchých pístech a na pláště složených pístů. Má vyšší obsah uhlíku než M-K slitiny, který zvyšuje křehkost, ale zároveň tvrdost. Na rozdíl od M-K či M-H litin má velmi nízký podíl niklu, který pozbývá v této litině významu. Celolitinové písty nemívají nosiče, do kterých však nikl patří z důvodu potřeby tepelné roztažnosti.

3 TECHNOLOGIE VÝROBY PÍSTŮ

Písty lze vyrábět mnoha způsoby. Volbou správné technologie se lze vyvarovat problémům spojených se strukturou i mechanickými vlastnostmi. Většina nynějších pístů je vyrobena gravitačním odléváním do kokil (trvalá forma na odlévání), a to kvůli jednoduchosti a relativně levné výrobě. Pouze některé, obvykle písty do dieslových motorů, jsou vyrobeny kováním. Výroba pístů je obvykle velkosériová nebo hromadná, avšak ve vývoji nebo v závodních strojích lze narazit i na kusové písty, vyrobené obráběním z plného tyčového materiálu.

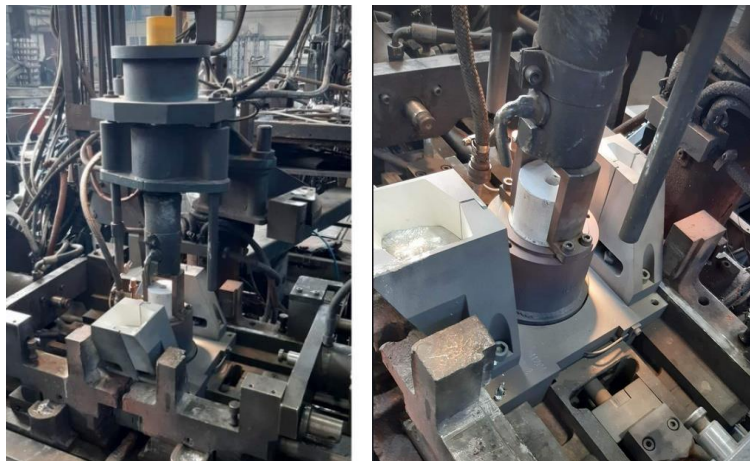
3.1 Gravitační lití pístů

Nejběžnější technologií pro výrobu pístů je právě gravitační lití. Svoji relativní jednoduchostí stojí gravitační lití jak v Čechách, tak v zahraničí mezi upřednostněnou metodou. Mezi hlavní výhody patří vysoká přesnost a kvalita odlitků. Principem metody je nalití určitého množství roztaveného kovu do předem připravené formy vtokovou soustavou. Tíhovou silou se forma zaplní, tuhne a vzniká odlitek [14]

Rozlišujeme 3 základní metody lití pístů [14]:

- Lití do pískových forem,
- lití do kombinovaných forem,
- lití do kokil.

Z těchto metod je nejvýznamnější lití do kokil, které je nejproduktivnější, nejuniverzálnější a nejlevnější. Mezi rozhodující faktory patří rychlost ochlazení. S vyšší rychlostí vzniká jemnější struktura materiálu a s ní spojené lepší mechanické vlastnosti. Proto kokily bývají intenzivně chlazeny. Metoda je vhodná pro velké série a hromadnou výrobu, kde se vysoké pořizovací náklady ve vysokém množství vyráběných kusů ztratí. Příklad kokily usazené v licím stroji lze vidět na obrázku 18. [14]



Obr. 18 Ukázka kokily v licím stroji.

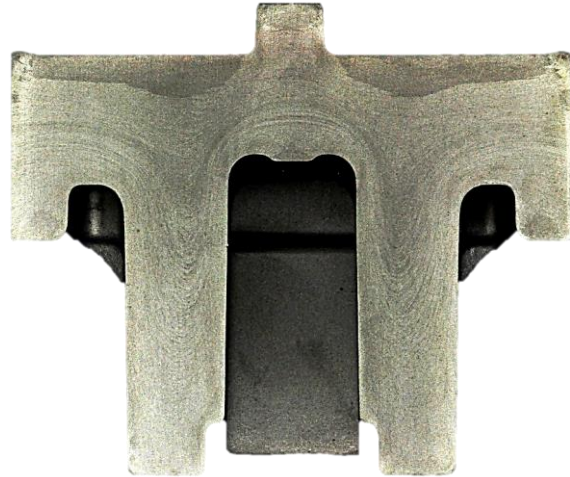
Chlazení je obvykle řízeno za účelem přemístění posledního místa tuhnutí (tepelného uzlu) do nálitku. Ten slouží jako zásobník tekutého kovu. Po zchladnutí se společně se vtokovou soustavou odřezává. Forma se opatřuje ochrannými žárovzdornými nátěry, které chrání formu od přímého kontaktu s kovem. Nátěry chladí kov a zajišťují schopnost vyndání odlitku z formy a významně se podílí na kvalitě povrchu. Tloušťka nátěru bývá obvykle kolem 0,1 mm. Je třeba ji po čase anebo v případě potřeby nanášet znovu. Materiály zpracované touto technologií jsou výhradně ze slitin hliníku. Nejčastěji využívané materiály jsou popsány v tabulce 2. [14]

3.2 Technologie kování pístů

V současnosti jsou písty vyráběny i tvářením (kováním, lisováním), viz obrázek 19. Kované písty jsou vždy považovány za vylepšení litých pístů. Důvodem je to, že místo tavení a lití do formy se polotovary pro kované písty vyrábějí z bloku válcované hliníkové slitiny. To znamená, že tato zrna již byla zpracována do delší a tenčí formy, která pomáhá předcházet šíření trhlin. Tento předvalek je vystaven velmi extrémnímu tlaku, protože slitina je stlačena do těžkých kovacíh zápustek, které vytvářejí hrubý tvar pístu – polotovar pístu. V případě ocelí, vznikají vlákna, která mají příznivý vliv na mechanické vlastnosti (obr. 20). [14; 24; 28]



Obr. 19 Ukázka výkovku pístu ze slitiny Al. [15]



Obr. 20 Ukázka struktury kovaného pístu z oceli. [16]

Výsledkem tohoto procesu kování je hustší a tažnější píst. Protože je však zápustka vyrobena ze dvou zrcadlových polovin, eliminuje to možnost navrhování vnitřní plochy v surovém výkovku. Vnitřní povrch pak bývá hrubý, což má na svědomí rozměrovou nestálost a vyšší hmotnost. Z tohoto důvodu potřebuje kovaný polotovar pístu mnohem více obrábění, aby vytvořil skutečný píst. Tento hustší a tažnější materiál způsobuje, že kovaný píst je ze své podstaty shovívavější, ikdyž jsou překročeny jeho limity. [14; 17]



Obr. 21 Polotovary pro kování pístů. [17]

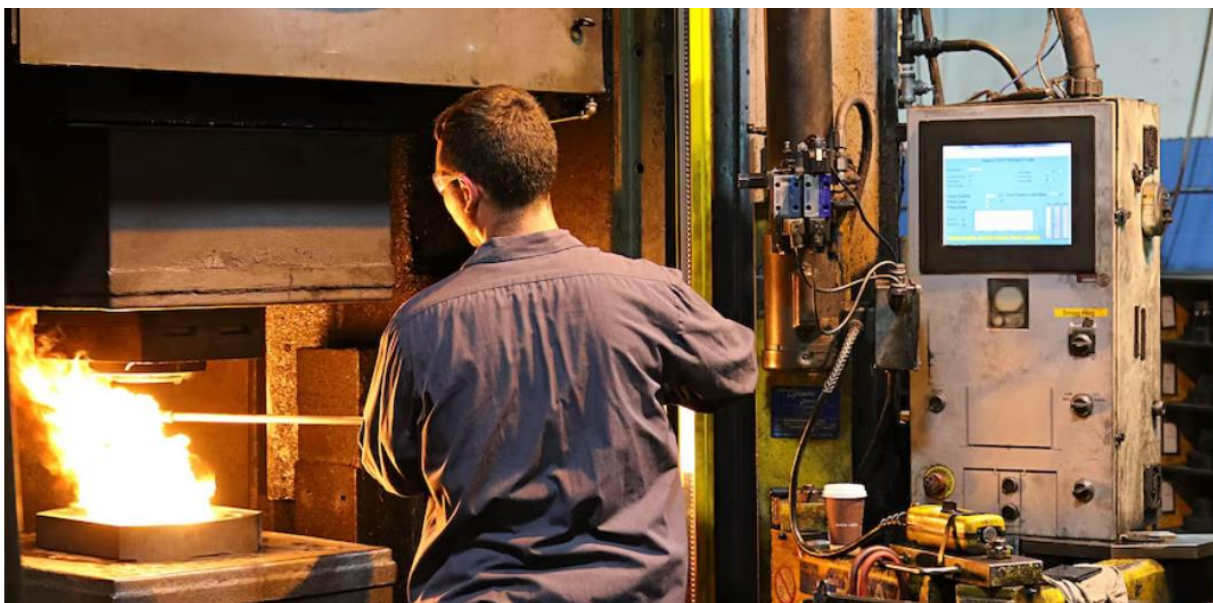
3.2.1 Materiály pro kování pístů

Zástupci ze slitin hliníku jsou zejména materiály 2618 a 4032. Slitina 4032 je silumin s velmi podobnými vlastnostmi jako písty odlévané. S vyšším podílem křemíku v této slitině se snižuje teplotní roztažnost hliníku, z čehož plyne možnost užších spekter tolerancí a zvýšení životnosti. V tabulce 4 je popsáno chemické složení těchto slitin. [13; 18]

Tab. 5 Složení materiálů 2618 a 4032 [13]

Popis		4032	2618
Obsah prvků [%]	Si	11 - 13,5	0,25 max
	Cu	0,5 - 1,3	1,8 - 2,7
	Fe	1 max	0,9 - 1,4
	Mg	0,8 - 1,3	1,2 - 1,8
	Ni	0,5 - 1,3	0,8 - ,1,4
	Zn	0,25 max	0,1
	Cr	0,1 max	0
	Mn	0	0,2 max
	Ti+Zr	0	0,2 max
	Pb+Sn	0	0,05 max
	Ti	0	0,2 max

Jako stroje jsou používány výhradně lisy (obrázek 22), buchary jsou vhodné spíše pro větší výkovky a pevnější materiály. Po nařezání polotovaru na špalíky (obrázek 21) se zahřejí na kovací teplotu a přesunou se do kovacího lisu, kde jsou zápustky rovněž ohřáté. Existují 2 základní typy lisů a to hydraulické a mechanické. Každý z nich má své specifické přednosti. Mechanické lisy jsou vhodné pro vysoké kovací rychlosti, což pomáhá udržovat kvalitní kované součásti cenově dostupné. Hydraulické lisy mají regulovatelnou rychlost a sílu v průběhu celého procesu, což umožňuje větší kontrolu toku materiálu. To vede k výrobě součástí s přísnými požadavky na mechanické a fyzikální vlastnosti. [17]



Obr. 22 Lis na kování pístů. [17]

4 VADY PÍSTŮ A JEJICH ODHALENÍ

Každá technologie si s sebou nese jistá rizika a téměř nikdy se při výrobě v kterémkoliv odvětví průmyslu nedaří vyrábět zcela bezchybně. Platí to i ve výrobě pístů. Vady jsou jako u každého jiného odvětví nežádoucí jev. V některých případech tvoří odpad i více než 15 % výrobků. Mnoho podniků tak vynaloží 20 – 30 % nákladů na opravu chyb a nedostatků. [20]

Jako vada se dá považovat jakákoliv odchylka od rozměrů, struktury, tvaru, vzhledu, mechanických vlastností i chemického složení od příslušných norem, technických výkresů či podmínek. Vady mohou být povrchové i podpovrchové a existuje řada metod, které vedou k jejich odhalení. [19; 20; 21]

Základní dělení vad:[19;20;21]:

- vady zjevné – zjistitelné pouhým okem či jednoduchými měřidly,
- vady skryté – skryté pod povrchem. Zjistitelné obrobením kovu či laboratorními zkouškami (např. ultrazvukem).

Při vzniku vad během výroby je důležité jejich včasné určení. Vady mají svoje charakteristické vlastnosti a podmínky vzniku. Dá se tedy již dle jejich druhu predikovat příčinu. Ve výrobě pístů jsou nejčastěji vady technologické či konstrukční. Chyba bývá málokdy na straně dělníka, protože nyní je výroba pístů z velké části automatizovaná a činnostmi dělníka jsou jednodušší úkony, nevyžadující zvláštní zacházení. Pravděpodobnost lidského selhání během výroby je velmi nízká. Proto je třeba všem nedostatkům předcházet již při konstrukci kokily nebo technologickém postupu. Cenným pomocníkem mohou být simulační procesy. [19]

Dále se obvykle v podniku rozlišují vady přípustné, nepřípustné a opravitelné nebo neopravitelné. Přípustné vady odběratel toleruje, častokrát právě proto, že jejich výskyt nemá významný vliv na kvalitu odlitku a jejich odstranění by bylo finančně náročné. Nepřípustné vady jsou naopak neakceptovatelné a následuje buď oprava (v případě opravitelných) nebo vyřazení odlitků (v případě neopravitelných). Pro identifikaci vad byla založena norma ČSN 42 1240. V příloze 4 se nachází rozdělení slévárenských vad. [19; 23; 24]

4.1 Metody zjišťování vad

Existuje nespočet specifických metod a způsobů, které vedou k odhalení vad široké škály druhů. Počínaje jednoduchými metodami, pro které není třeba žádného zvláštního vybavení či zkušeností, až po drahé metody, s drahými stroji, vyžadující značnou dávku zkušeností a zvláštní proškolení. V této kapitole jsou vybrány a rozebrány ty nejelementárnější metody, které se v praxi běžně používají:

- Vizuální kontrola (VK) - je nejjednodušší defektoskopickou metodou a dá se s ní poměrně spolehlivě odhalit většinu povrchových vad (až 78 %). Rozdělit ji lze na přímou a nepřímou. Přímá metoda spočívá v odhalení vad pouhým okem či lupou. Nepřímá kontrola využívá speciální zařízení (např. endoskop, periskop). Pro tuto metodu je předpokladem vhodné osvětlení, dobrý zrak a častokrát i úprava povrchu. [20; 25]



Obr. 23 Povrchové vady odhalené vizuální kontrolou. [25]

- Rozměrová kontrola (RK) - patří k nejběžnějším metodám přejímky odlitků. Porovnávají se rozměry odlitku s jeho výkresem. Stále je běžnou praxí ruční přeměření běžně dostupnými měřidly jako jsou kalibry, posuvná měřítka, mikrometry. Lze ale také narazit na moderní přístroje typu CMM spojené s digitalizací (obr. 24). [11; 20]



Obr. 24 Kontrola rozměrů pístu. [2]

- Stanovení hmotnosti odlitku (SHM) – provádí se vážením na běžných váhách, které by měly být kalibrované či certifikované. V pístech je velmi přísná kontrola hmotnosti a tato metoda je proto velmi využívána [20]

4.1.1 Defektoskopie

Nedestruktivní testování, jinak řečeno defektoskopie, je soubor metod, které nám pomáhají odhalit vady. Hlavní výhodou je nepoškození výrobku. Vyhodnocení zkoušek a metod je obvykle empirické, a tedy je třeba zkušeného a proškoleného člověka. Na něm závisí, zda výrobek bude vyhodnocen jako zmetek či nikoli. [20]

- Zkouška ultrazvukem (UZD) – dělí se na několik kategorií, a to podle způsobu a oblasti využití. Z těchto metod je nejvyužívanější metoda odrazová. Spočívá ve vysílání krátkých ultrazvukových impulsů. Impulzy se odrážejí od stěn, povrchu a vnitřních vad a na obrazovce je zobrazen průběh těchto impulsů. Z těchto impulsů lze nejen odhalit vady, ale i změřit vzdálenost této vady od povrchu. V pístech se využívá například ke kontrole vzdálenosti drážek pro písní kroužky či odhalení staženin a ředin. [20; 22]
- Radiologická zkouška (RTG) – pravděpodobně nejvyužívanější zkouška. Metoda spočívá ve prozařování materiálu zářením, nejčastěji rentgenovým či gama. Snižováním či zvyšováním intenzity prozáření se lze „podívat“ do každého místa ve vzorku. V pístech lze takto odhalit hlavně staženiny a řediny a na rozdíl od ultrazvukové zkoušky zjistit jejich velikost a rozmístění. [20; 22]
- Kapilární penetrační zkouška (KPZ) – používá se ke zjišťování povrchových vad a vad vnitřních vystupujících na povrch. Princip spočívá v nanesení kapilárně aktivní kapaliny na povrch. Kapalina zateče do nečelivosti a po jejím setření, vzlíná zpět a tím vadu a její tvar odhalí. Pro snadnější rozpoznání se používá takzvaná vývojka, která se nanáší na povrch po nanesení a setření kapaliny. Kapalina vzlíná do této vývojky, která má nejčastěji bílou barvu a kapalina, která mívá barvu červenou je tak snadněji vidět. [15; 16] To platí v případě barevné varianty. Existuje ještě fluorescenční metoda, kapalina v tomto případě svítí ve tmě při posvícení ultrafialovým světlem a není nutná vývojka. Je potřeba temná komora. [20; 22]

4.1.2 Chemické a strukturní rozborů

Ještě před odlitím pístu je třeba zkontrolovat chemické složení materiálu, v případě neshody s normou, či příslušným požadavkem, je nutné upravit složení dodatečně, např. legováním.

Rozdělení chemických a strukturních rozborů [20; 22; 27]:

- Stanovení chemického složení (CHEM) – nejčastěji spektrální analýza. Využívá fyzikálních metod využívající elektrické vyhodnocení intenzity vybrané spektrální čáry vyhodnocovaného prvku. Přístroje se nazývají spektrometry (obr.25). Ty se dělí na optické a rentgenové. [20; 22; 27]



Obr. 25 Rentgenový spektrometr. [27]

- Fraktografie (FRA) – fraktografická analýza funguje na principu vyhodnocené z morfologie lomových ploch. Pro zhotovení snímků se využívá buď světelná nebo elektronová mikroskopie. Tato metoda pomáhá odhalit příčiny vad a porušování materiálů. [20]
- Stanovení makrostruktury (SMA) – patří do skupiny světelné mikroskopie. Zkoumá při malém zvětším makrostrukturu materiálu. Lze nalézt vady jako mikroskopické dutiny a řediny. [20]

4.2 Vady pístů

Kapitola se zabývá typy vad u pístů a jejich odlitků, příčinami jejich vzniku a odstranění. Se zvyšujícími se požadavky na kvalitu odlitků se vyžaduje vady sledovat více než dříve. K tomu se váže studování jejich vzniku, tvoření dokumentací a statistik, které pomáhají sledovat trend výskytu. V Čechách byla, jednou z prvních publikací dokumentující vady norma ČSN 42 1240 z roku 1955 a její následná vylepšená verze z roku 1964. Studium vad patří k jednomu ze stěžejních odvětví slévárenství nejen na akademické půdě, ale i v praxi. V odlitcích pístu existuje celé řada vad, ať už drobných, které nemají velký vliv na kvalitu pístu, až na zcela neakceptovatelné, kvůli kterým podniky přichází o nemalé finanční částky. [19; 23; 26]

Vybrané běžně vyskytující se vady: [19; 26; 28; 29]

- Bubliny způsobené vodíkem – patří mezi typické vady, ačkoli při správném technologickém postupu je lze snadno odstranit. Vznik těchto pórů je způsoben překročením rozpustnosti vodíku v tavenině. Příčinami zvýšeného obsahu bývá vlhká či studená vsázka, špatně předeřtá forma či studené nářadí používané při výrobě. Častým důvodem ke vzniku bublin bývá i špatně odplyněná tavenina nebo příliš vysoká lící teplota. Jejich velikost může být různá od pár μm , až po milimetry.

Zabránit jejich vzniku lze správným odplyněním, používáním suché a čisté vsázky a dodržování správné lící teploty. Jejich tolerovanou přípustnost či nepřípustnost určuje norma nebo zákazník. Vady lze odhalit vizuální zkoušku po obrobení, makrovýbrusem, viz obr. 26, nebo penetrační zkouškou po obrobení. [19; 26]



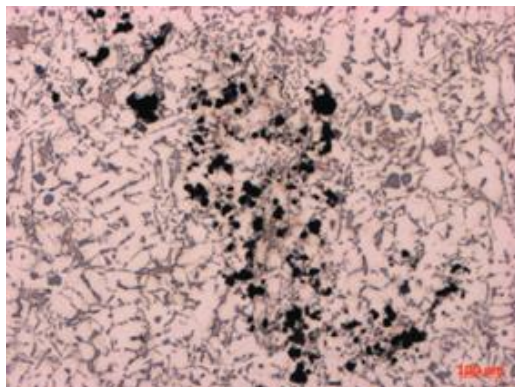
Obr. 26 Vodíkový pór ve struktuře pístu AlSi25CuNiMg. [26]

- Staženiny – rozdělují se na otevřené a uzavřené. V odlitcích pístů najdeme spíše uzavřené. Otevřené se vytváří pouze při velmi špatně navržené technologii a konstrukci kokily. Staženina by se dala popsat jako uzavřená dutina nepravidelného tvaru, která vzniká objemovými změnami v odlitku – tuhnutím, viz obrázek 28. Vyskytují se zpravidla v takzvaných tepelných uzlech. Místa, kde tavenina tuhne jako poslední. Cílem dobře konstruované kokily je tyto uzly přemístit do nálitků či vtoků, které budou po odlití odstraněny. [19; 26]

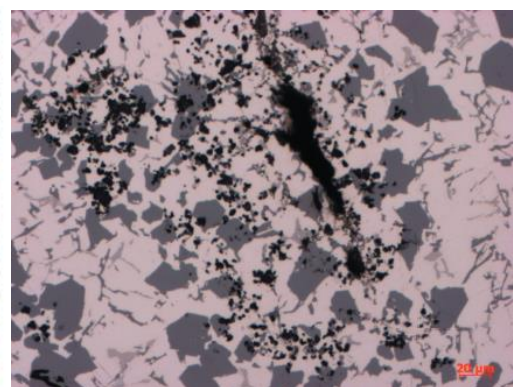
Z toho plyne, že nejlepší prevencí je správně konstruovaná kokila. Vliv však může mít vysoká lící teplota. Odhalit je lze vizuální kontrolou po obrobení, rentgenem nebo ultrazvukem. [19; 26]

- Řediny – shluk drobných nepravidelných dutin způsobený objemovými změnami v odlitku (obr. 27). Jedna z nejčastěji vyskytujících se vad. Příčiny vzniku jsou obdobné jako u staženin. Je třeba upravit nálitkování, tloušťky stěn, konstrukci kokily nebo vhodně usměrnit ochlazování. [19; 26]

Způsoby odhalení vad jsou stejné jako u staženin. Častokrát jsou tyto nedokonalosti, pokud jsou dostatečně malé a nevystupují po obrobení na povrch, tolerovány. Například u pístů do letadel jsou však jakékoli obdobné vady nepřípustné. [19; 26]

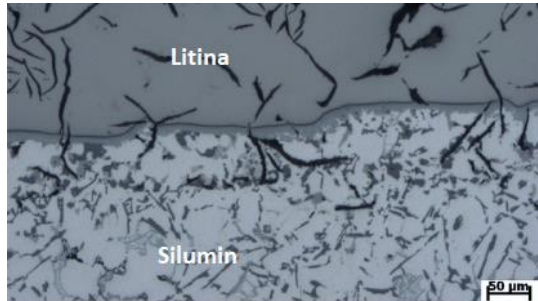


Obr. 27 Řediny ve slitině AlSi12CuNiMg. [26]



Obr. 28 Shluk pórů a vměstků v okolí staženiny. [26]

- Nepropojení litinových nosičů – pokud je v pístu umístěn Ni-resistový kroužek, pak může nastat situace, kdy při zalévání tekutým kovem a následným ztuhnutí se oba kovy propojí nedostatečně (nedojde k řádné difuzi). Tento jev je velmi častý a velmi obtížně se mu předchází. Na obrázku 29 lze vidět správně spojenou vrstvu a na obrázku 30 vrstvu nesprávně propojenou. [26; 28]



Obr. 29 Správně spojená vrstva. [25]

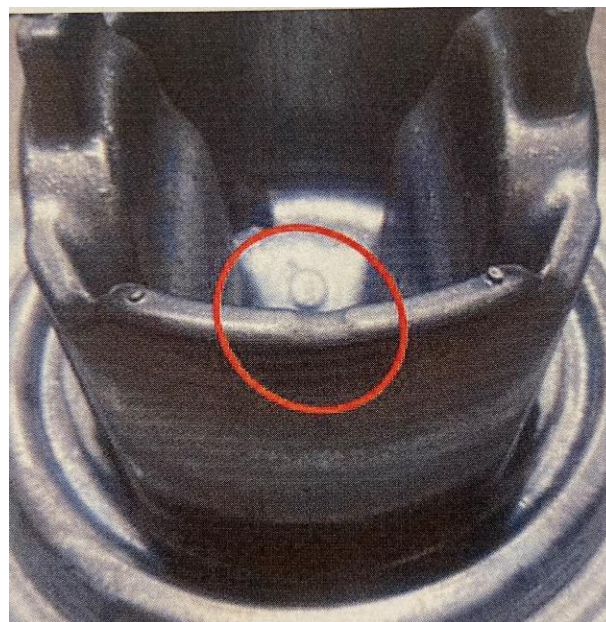


Obr. 30 Nesprávně spojená vrstva. [25]

Na obrázku 29 lze patrně vidět difuzní vrstvu, kde se částice litiny plynule a rovnoměrně prolínají do pístu – zde je tvořena poměrně kvalitní přechodová vrstva. Na rozdíl od obrázku 30, kde je postup částic nerovnoměrný a nepravidelný. Přechodová část je výrazně širší a je tvořena ostrými jehlicemi a studenými spoji, častokrát s vyskytujícími se dutinami. Nejčastější příčinou jsou korozní zplodiny a oxidy železa s doprovodnými prvky Ni, Cu, Cr, pocházející z litinového kroužku. [25; 28]

Předcházet tomuto problému lze nejlépe řádným očištěním Ni-resistových kroužků před zalitím slitinou hliníku. Nejsnáze lze odhalit tuto vadu ultrazvukem, makrovýbrusem či elektronovým mikroskopem. [28]

- Nedokonalé vyplnění zápustky – vzniká pouze u kování. Ve výrobním procesu se někdy plášť pístu obtížně plní. U výrobků s efektivní výškou pláště větší než 90 mm je komplikovanější vyplnit zápustku, protože dutina pláště je hluboká a úzká. Řešením problému je zvětšení odvětrávacího otvoru. Příznivý vliv úpravy je ověřeno výrobním procesem. [29]



Obr. 31 Příklad nedokonale vykovaného pístu. [29]

5 NÁVRH ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY TUHNUTÍ

Tuhnutí odlitků je bezpochyby komplikovaný proces, který pokud není správně řešený, může produkci odlitků velmi zkomplikovat. Vzniká zde mnoho změn, problémů a nehomogenit. Pro kvalitní a přesnou výrobu je cílem podniků a jejich technologů proces tuhnutí usměrnit, předpovědět a nastavit tak, aby se těmto problémům předcházelo. Experimentální část byla vypracována ve spolupráci se společností Almet a.s. Od založení v roce 1951 se zabývá litím pístů ze slitin hliníku technologií gravitačního lití do kovových forem a je jedním z předních výrobců nejen v Čechách, ale i v Evropě.

5.1 Simulace technologie odlévání

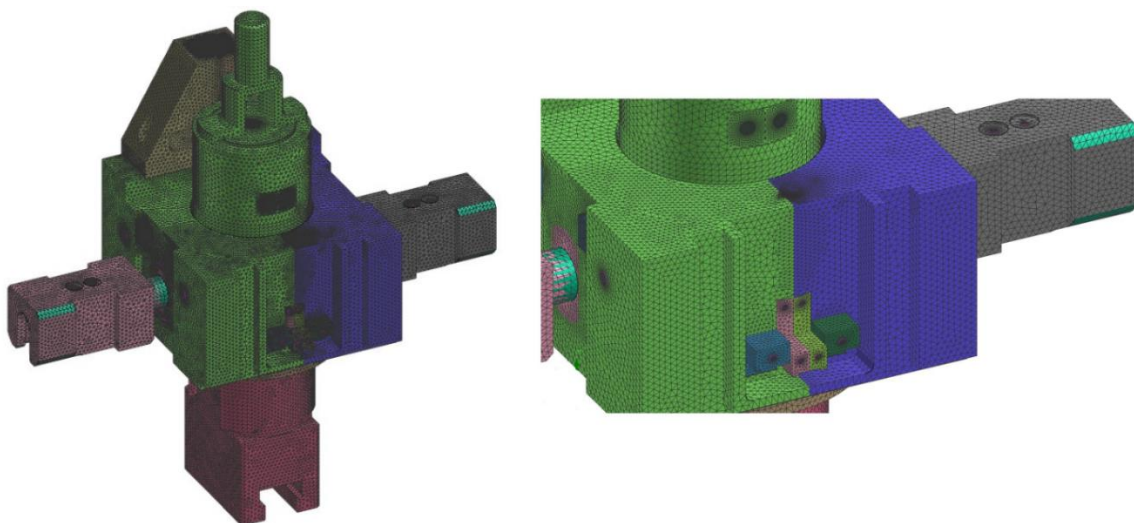
Simulační procesy v moderním slévárenství zastupují velmi cennou pomůcku technologa. Ačkoli zkušenosti technologa jsou neocenitelné, s pomocí simulačních programů lze optimalizovat výrobní proces či odhalit problém, k jehož vyřešení současné zkušenosti a znalosti nemusí stačit. Dochází ke zvýšení produktivity, kvality a například snížení počtu vadných kusů, tím se lze vyhnout vysokým nákladům při testování ověřovacích sérií. Ačkoli technologie jdou dopředu, stále existují výrobky, které vykazují značné komplikace při výrobě. Simulace nám pomáhají tyto problémy nejen řešit, ale i předvídat. [16;17]

Simulace je prováděna v programu ProCAST, který patří mezi špičku v simulačních programech pro slévárenství. Využívá metodu konečných prvků, díky které lze předpovídat mnoho aspektů slévárenských procesů, od toku taveniny až po vyhodnocení vad po ztuhnutí.

Prvně je třeba vyhotovit simulaci současné technologie lití – pro tento účel společnost Almet poskytla materiály, které obsahovaly 3D modely celé sestavy a odlitku, jednotlivé díly, výkresy a technologický proces. K zahájení práce je nutné stanovit počáteční podmínky. Stanovila se tabulka pro data potřebná ke správnému provedení simulace, viz tab. 6.

Postup vyhotovení simulace:

- Základní nastavení programu – po importování 3D sestavy do programu je nutné vytvořit pro všechny součásti výpočtovou síť (obr. 32). Hustota sítě má vliv na přesnost a dobu výpočtu. Proto je vhodné zvolit pro každou dílčí součást kokily vlastní síť. Tam, kde je třeba detailnějších a přesnějších výsledků, je jemnější síť, a v místech s nižší prioritou síť hrubší.

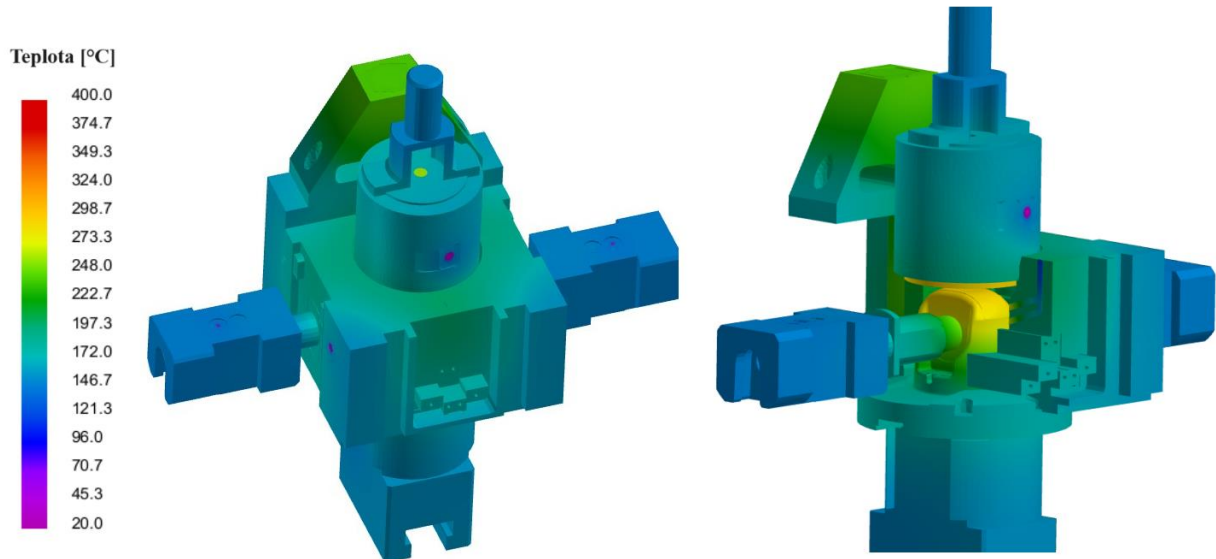


Obr. 32 Ukázka výpočtové povrchové sítě na kokile.

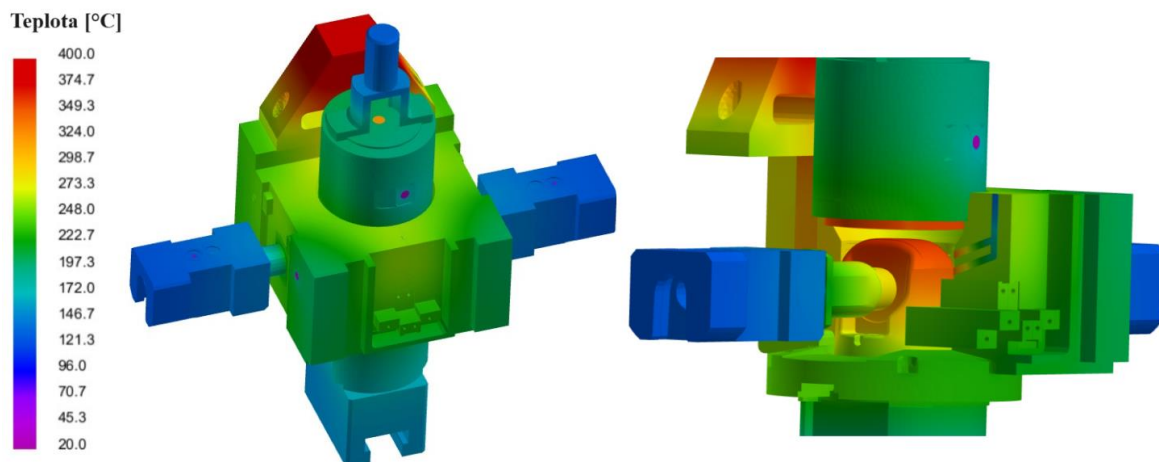
Tab. 6 Počáteční podmínky

Podmínka	Údaj
Počet 2D elementů	762355
Počet 3D FEM elementů	3710848
Materiál odlitku	AlSi12CuNiMg (termo-fyzikální parametry převzaty z databáze softwaru ProCAST)
Teplota lití	745-755 °C
Rychlost lití	0,49 m/s
Celková doba lití	7 s
Úhel naklopení	20°
Filtr	Plošný látkový Pyrotek – definice hydraulického odporu
Materiál formy	Konstrukční ocel- (termo-fyzikální parametry převzaty z databáze softwaru ProCAST)
Počáteční teplota formy	min 200 °C
Celková délka cyklu	209 s
Popis časování cyklu	Interní údaj ALMET
Teplota vody:	23 °C
Chladicí kanály	Automatická definice chladících kanálů (ProCast)
Koeficient přestupu tepla (kov-forma)	2000-3000 W/m ² K
Koeficient přestupu tepla (izolace nálitek)	80 W/m ² K
Koeficient přestupu tepla (kov-stlačený vzduch ve chlazení)	300 W/m ² K
Koeficient přestupu tepla (kov-vzduch)	10 W/m ² K
Koeficient přestupu tepla (voda – kov)	1250 W/m ² K
Podmínka HEAT - radiace a konvekce	10 W/m ² K

- Cyklování – pro zjištění ustálených teplot v průběhu lití, je nutné nastavit počet cyklů. Jeden průběh lití = jeden cyklus. Počet cyklů je nutné nastavit tak, aby se v posledním cyklu dosáhlo již ustálené teploty kokily, díky které lze obdržet přesný výsledek simulace. V tomto případě byl zvolen počet cyklů 5. Pro zdůraznění důležitosti tohoto kroku je na obrázku 33 vidět teplota kokily po 1. cyklu a na obrázku 34 po 5. cyklu. Teploty jsou významně odlišné.



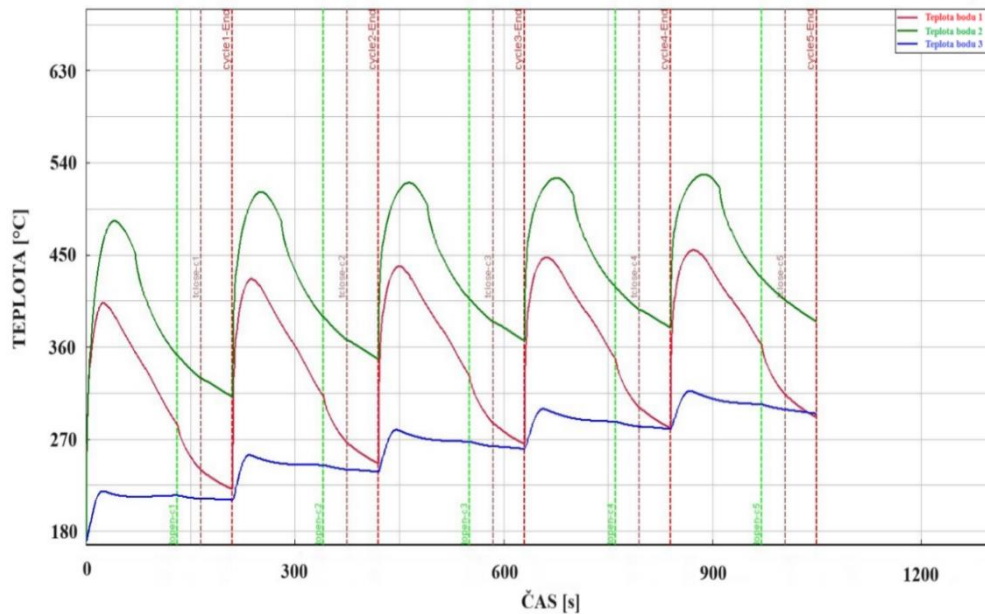
Obr. 33 Teplotní pole kokily po 1. cyklu.



Obr. 34 Teplotní pole po 5. cyklu.

Tento efekt lze pozorovat i na grafu závislosti teploty na čase, kde se v průběhu pěti cyklů změní teplota v řádu stovek stupňů. Z křivek je patrné stoupání teplot až k jejich ustálení zhruba po 4. cyklu. Barevné křivky znázorňují změny teplot ve zvolených bodech.

Konkrétní umístění bodů je znázorněno na obrázku 36 a byly zvoleny tak, aby bylo patrné v jakých místech kokily jsou změny teplot největší a kde naopak je rozdíl teplot méně patrný či významný.

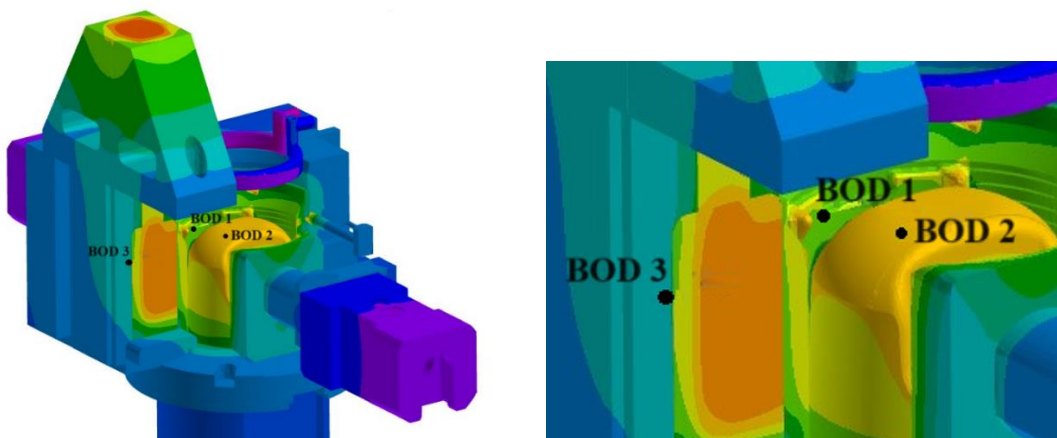


Obr. 35 Graf závislosti teploty na čase během 5 cyklů.

V bodě 3 (v grafu – modře), nacházejícím se na hranici vtokové soustavy teplota kolísá nejméně, zároveň však mírně stoupá i po 5. cyklu a pravděpodobně v místě bude ještě nepatrně vyšší teplota v následujících cyklech. Ohřev je způsoben neustálým přívodem taveniny o vysoké teplotě, která postupně prohřívá kokilu, současně nedochází k tak vysokému odvodu tepla chlazením. Teploty tedy mírně stoupají a zároveň je kolísání teplot nízké.

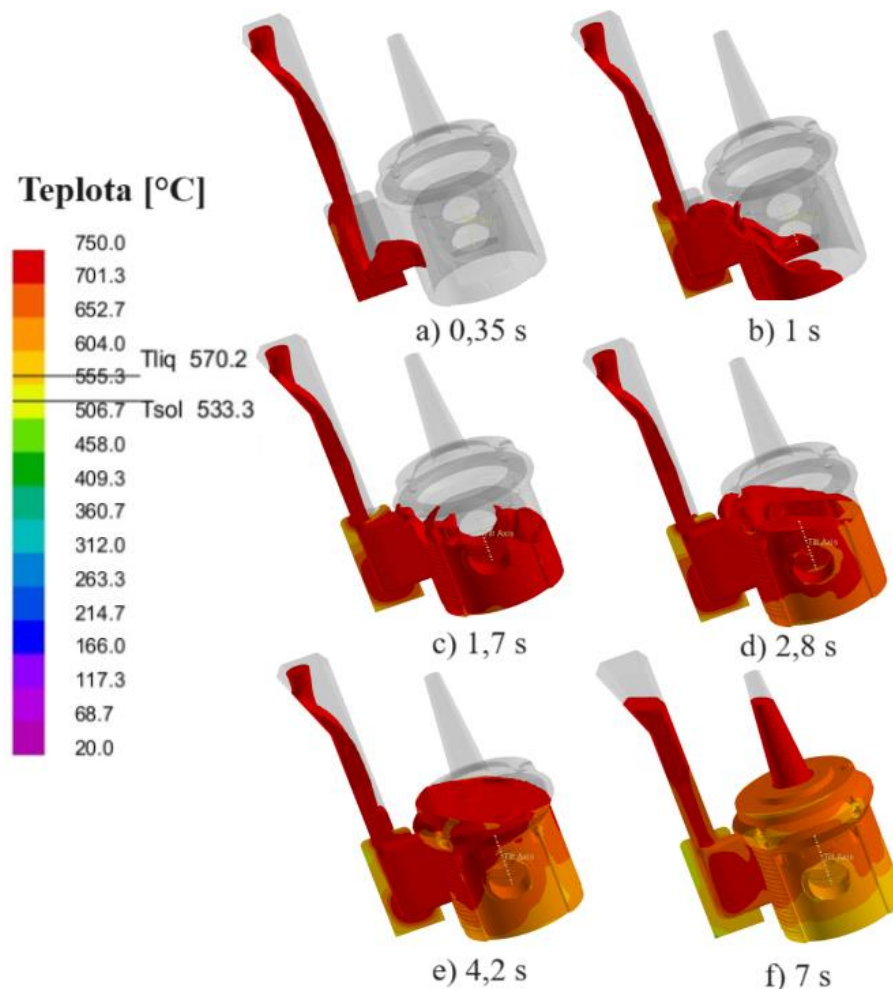
Bod 2 (v grafu – zeleně), se nachází na horní ploše jádra kokily. Zde panují nejvyšší teploty v čistém odlitku. Zjištěno z výsledků teplotního pole. To je způsobeno umístěním dílu, který je obklopen taveninou, předávající svým povrchem nejvíce tepla, které nemá středem kokily tolik prostoru k jeho odvedení v porovnání s jinými částmi kokily.

Bod 1 (v grafu – červeně) se nachází na vnitřním povrchu horní poloviny pláště. Zde dochází k největšímu kolísání teplot během cyklů. Kolísání je způsobené odvodem tepla během rozevření kokily, kde díl díky svému velkému povrchu odvádí teplo do ovzduší nejlépe, zároveň je díl největší v porovnání s ostatními díly, a tak teplo velmi dobře odvádí i samotný plášť. Teplo difunduje do vzdálenějších míst, kde je teplota nižší.



Obr. 36 Umístění virtuálních termočlánků

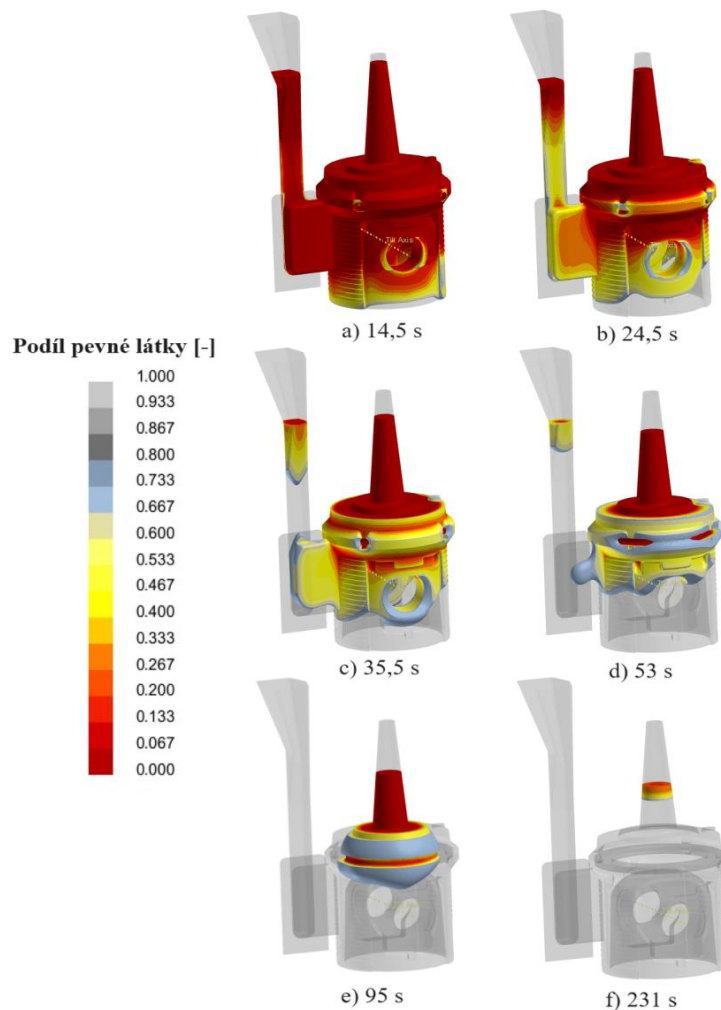
- Plnění kokily – po vyhodnocení dat z cyklování se využijí při simulaci plnění, kde je účelem získat představu o proudění taveniny kokilou. Výsledky (obrázek 37) potvrzují realitu výroby – tedy poslední místo plnění je v nálitku. Doba lití je zhruba 7 sekund. Již po této době začíná kov tuhnout – teploty se dostávají pod hodnoty likvidu. Forma se plní správně. Obrázky 37 a 38 jsou seřazeny chronologicky s uvedenými časy zaznamenání snímku.



Obr. 37 Průběh plnění odlitku

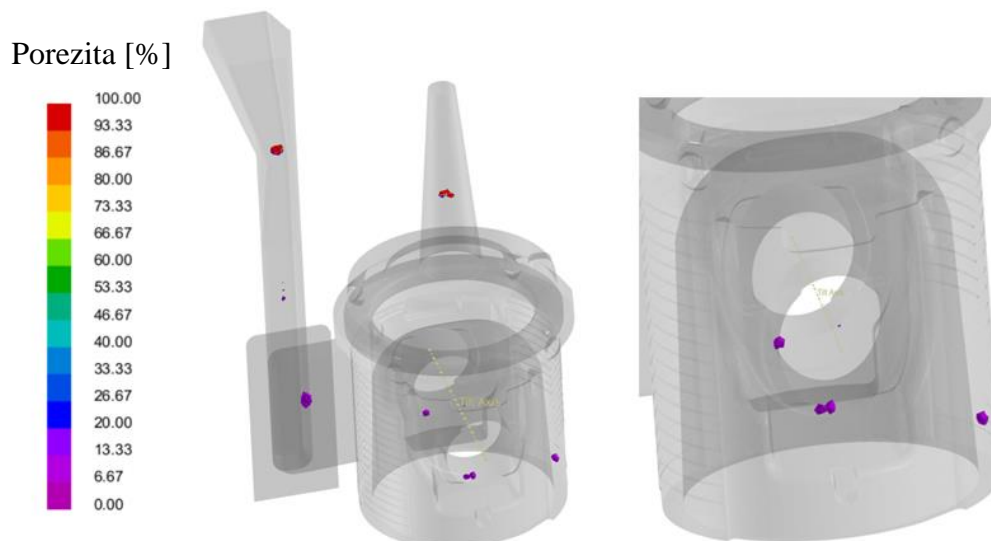
- Tuhnutí formy – je nejdůležitější částí procesu, a je jí proto třeba věnovat více pozornosti. Po dokončení plnění se odlitek vrací zpátky do vertikální polohy a chladne. Odlitek tuhne usměrněně odspodu. Během této doby je intenzivně chlazen. Výsledky chladnutí (obrázek 38) nevykazují na první pohled známky vzniku vad v oblasti vývažků.

Nejdůležitějším momentem je oddělení taveniny v oblasti vývažků (cca 36. sekunda), kde nezůstává v simulaci tepelný uzel, vada zde tedy buď není anebo je velmi malá, což potvrzuje realita a výsledky porezity v programu. Doba do ztuhnutí odlitku je zhruba 231 sekund.



Obr. 38 Průběh tuhnutí

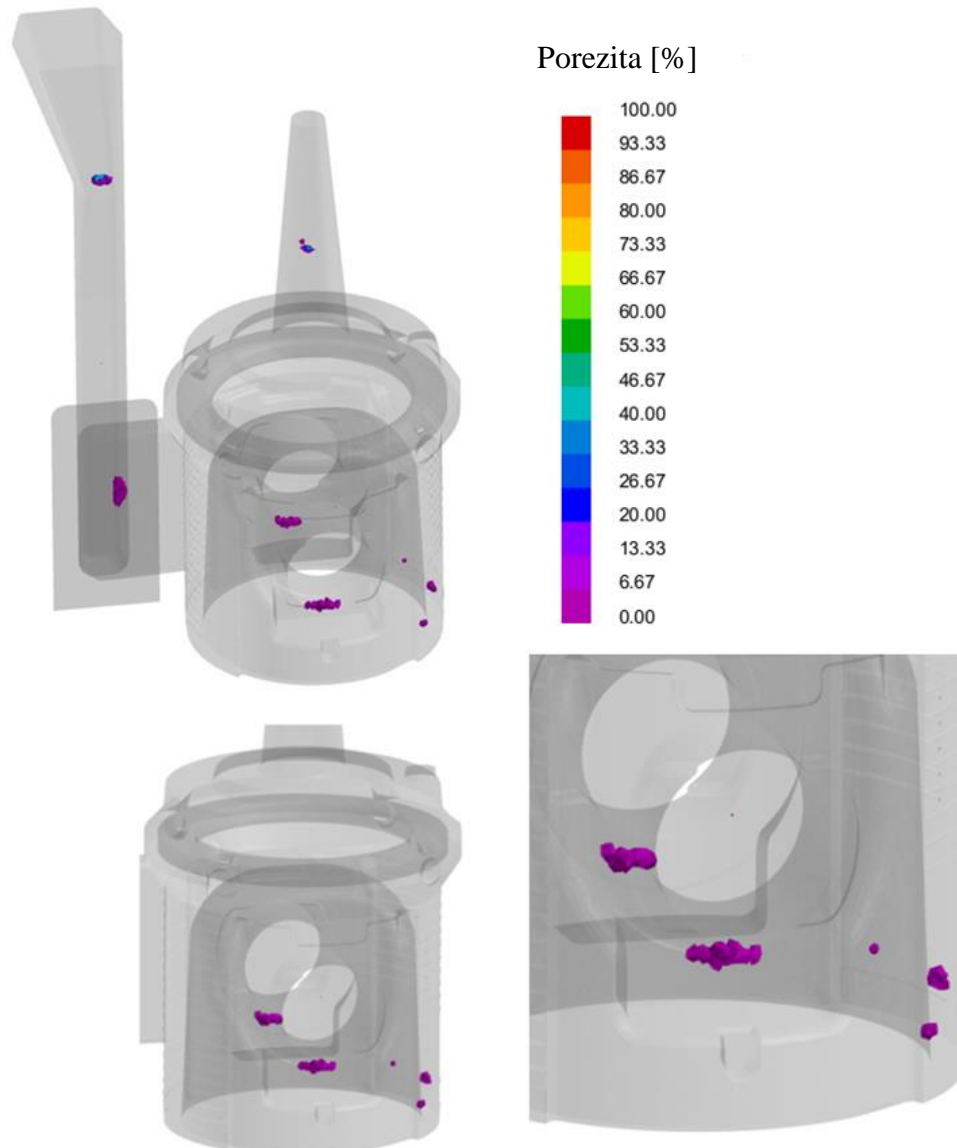
- Porezita – popisuje množství pórů v tělese. Ačkoli simulace tuhnutí nevykazovala známky tepelného uzlu ve vývažcích, vykazují výsledky porézности drobné řediny a póry právě v těchto místech a to v obou vývažcích. Jejich celkový objem program vyhodnotil na $4,34 \text{ mm}^3$. Póry lze zaznamenat i v plášti, kde však nevykazují problémy ve výrobě a mimo čistý odlitek (v nálitku a vtokové soustavě), viz obr. 39.



Obr. 39 Predikce výskytu porezity

5.1.1 Varianta 1

Výsledky simulace současné technologie potvrdily vznik ředin ve vývažcích (obr. 39). Nyní je třeba konfigurovat technologii tak, abychom řediny odstranili anebo alespoň co nejvíce zmenšili jejich objem. Vzhledem ke konstrukci kokily a možnostem společnosti, se jeví nejvýhodněji úpravy ve chlazení. V první variantě úprav se posune spuštění chlazení z původních hodnot na okamžité spuštění chlazení od počátku lití. Je možné, že posunem se kov ochladí rychleji a tepelný uzel se přesune do nálitku a řediny nevzniknou. Plnění zůstává stejné.



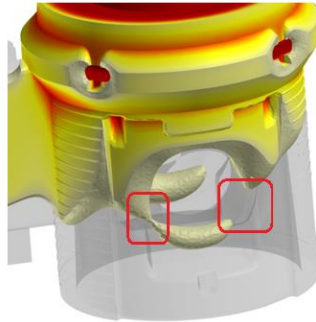
Obr. 40 Výskyt porozity ve variantě 1

Z obrázku 40 plyne výrazné zvýšení porozity ve vývažcích. Velikost vady je $10,1 \text{ mm}^3$. Zhoršení je pravděpodobně způsobeno příliš rychlým zchlazením, kde v krčích vývažků je výrazné zúžení, kde ztuhne kov příliš rychle a vzniká zde výrazný tepelný uzel.

5.1.2 Varianta 2

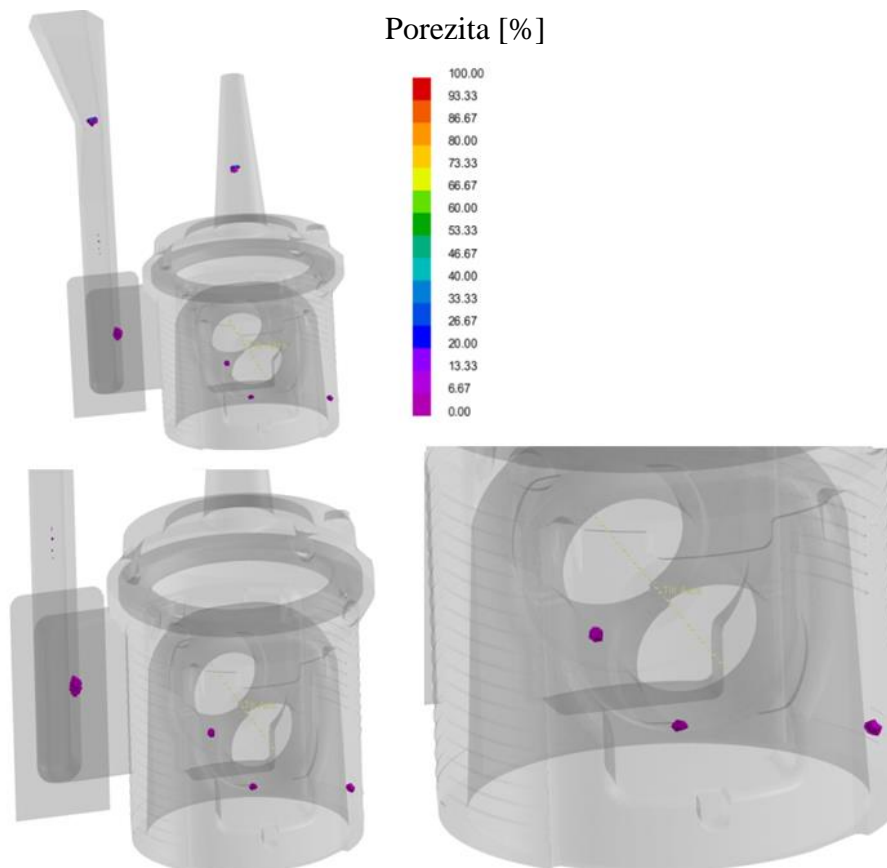
Úpravy dřívějšího sepnutí chlazení výskyt ředin naopak ještě zvýšily, proto ve variantě 2 bude naopak oproti původní technologii spuštění chlazení zpožděno, a to pouze vodní chlazení čepních trnů.

Pravděpodobná příčina vzniku ředin je příliš rychlé ztuhnutí krčků vývažků (obr. 41), kde právě v zúženém místě kov ztuhne rychleji a odřízne nez tuhý kov ve vývažku od zbytku taveniny. Následně vzniká tepelný uzel a vady s ním spojené. Zpoždění i ostatních okruhů chlazení by situaci nezměnilo, pouze by to zpomalilo celkové zchladnutí. Červené ohraničené oblasti na obrázku 41 znázorňují krčky a zmíněné riziko vzniku tepelného uzlu. Ačkoli situace v simulaci nenastala, je pravděpodobné, že ve velmi malém měřítku, podobný stav přesto nastává.



Obr. 41 Vznik tepelného uzlu

Provedením úpravy zpoždění chlazení o 20 sekund se výsledky porozity mění. Výsledná porozita se vyskytuje na stejném místě, ale je menší. Její objem je zhruba $1,96 \text{ mm}^3$ – odpovídá zhruba 45 % velikosti u původní technologie. Vada je téměř poloviční, viz obr. 42.



Obr. 42 Výskyt porozity ve variantě 2

ZÁVĚR

Cílem práce bylo optimalizování technologie lití za účelem snížení zmetkovitosti odlitků pístů pro traktory Zetor ve společnosti Almet a.s. Pro tyto účely byly vyhotoveny simulace lití současné technologie a simulace s provedenými úpravami. U odlitků se vyskytují řediny v oblasti vývažků a při obrábění se řediny dostávají na povrch, což je neakceptovatelná vada. Četnost vyskytnutých vad je přibližně 4 % celkové produkce těchto pístů. Ovšem vzhledem k dlouholeté produkci a sériovosti výroby je protežováno tuto hodnotu snižovat.

Byly provedeny rentgenové snímky a řez vybraného odlitku, které vadu potvrdily. Vada se nachází nejčastěji maximálně několik milimetrů pod čepním otvorem a vzniká vlivem konstrukčního tepelného uzlu.

Simulace současné technologie potvrdily vznik ředin v dané oblasti. Byly vyhodnoceny výsledky plnění, tuhnutí a porezity. Výsledky plnění neukázali žádný problém. Výsledky tuhnutí také nevykazují výrazné nesrovnalosti. Porozita však predikovala vznik ředin o velikosti $4,34 \text{ mm}^3$.

Na základě výsledků existuje vícero způsobů řešení. Vzhledem k nákladnosti a možnostem společnosti se řešení zredukovalo na úpravu časování sepnutí tuhnutí a jejího usměrnění způsobem, který vede k redukci vad.

Z těchto úprav byly vytvořeny simulace s upraveným časovým sepnutím chlazení. V první variantě se veškeré chlazení sepnulo hned na počátku lití. Ovšem varianta 1 situaci ještě zhoršila. Velikosti ředin v této variantě se vyšplhaly až ke $10,1 \text{ mm}^3$. Důvod je pravděpodobně příliš rychlé zchlazení v krčících vývažků.

Ve druhé variantě se nastavilo opoždění sepnutí chlazení oproti původní technologii o 20 sekund, a to pouze u chlazení čepních trnů, které mají v oblasti vývažků největší vliv na ochlazení. Zde výsledky vyšly příznivěji. Velikosti vad se snížily o více jak polovinu, a to na $1,96 \text{ mm}^3$. Příčinou lepších výsledků je pravděpodobně pomalejší ochlazení v krčících vývažků, kde tepelný uzel dostal větší prostor k usměrnění směrem k zbytku taveniny.

Druhá varianta má být otestována společností v provozu. V blízké době však není naplánována výroba. Důsledkem toho není v práci ověření správnosti simulace v praxi. Při zavádění výroby nových odlitků, obzvláště se složitou geometrií a vysokými požadavky na kvalitu, doporučuji společnosti provedení ověřovací simulace ještě před začátkem výroby dílů kokily a počátkem produkce samotných odlitků. V tomto momentě ještě lze upravit konstrukci kokily před její výrobou bez nákladných dodatečných úprav a nastavit okruhy chlazení takovým způsobem, aby v budoucnu nebylo nutné dodatečné změny provádět a bylo možné vyhnout se nadměrné zmetkovitosti a sní spojeným prodražování výroby, kterému se zpětně velmi těžko předchází.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. *Pistons and engine testing*. 2nd ed. 2016. Imprint: Springer Vieweg, 2016. ATZ/MTZ-Fachbuch. ISBN 9783658099411.
 2. Úvodní stránka | ALMET, a.s.. *Úvodní stránka | ALMET, a.s.* [online]. Copyright © ALMET, a.s., vytvořila eBRÁNA s.r.o. [cit. 27.11.2022]. Dostupné z: <https://almet.cz/>.
 3. Slévárenství, Roč. 57, č. 11-12 (listopad-prosinec 2009), s. 397-400.
 4. *Základy tepelného zpracování kovů*. PDF. 2013. Dostupné také z: https://katedry.pf.jcu.cz/kaft/wp-content/uploads/Ing_Hladky_6.pdf.
 5. *Ocelové písty motoru: Začínají vytlačovat hliníkové. V čem jsou lepší?* Online. www.auto.cz. 2018. Dostupné z: <https://www.auto.cz/ocelove-pisty-motoru-zacinaji-vytlacovat-hlinikove-v-cem-jsou-lepsi-120385>. [cit. 2024-01-22].
 6. www.hybrid.cz. [online]. 2014 [cit. 2023-01-26]. Dostupné z: <https://www.hybrid.cz/ocelovy-pist-pro-lepsi-ucinnost-spalovaciho-motoru/>
 7. Doc. Ing. Rostislav Chotěborský, Ph.D. *Nauka o materiálu*. Skriptum. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2011.
 8. *Binární diagram železo-uhlík*. Online. Wikipedie. 2023. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Bin%C3%A1rn%C3%AD_diagram_%C5%BEelezo-uhl%C3%ADk. [cit. 2024-01-22].
 9. *Ni-Resist Piston Inserts from Argentina and Korea*. Online. In: . Dostupné z: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-ITC1-PURL-gpo14564/pdf/GOVPUB-ITC1-PURL-gpo14564.pdf>. [cit. 2024-02-05].
 10. *Pistons*. www.drouzhba.bg [online]. Bulharsko [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: <https://www.drouzhba.bg/en/products/pistons/>
 11. *MAHLE: Kleine Kolbenkunde*. Stuttgart, 1995.
 12. *Manufacturing technology*. 19. Ústí nad Labem, 2019, ISSN: 2787-9402
 13. *Aluminium alloys*. Online. Smithshp. 2019. Dostupné z: <https://www.smithshp.com> [cit. 2024-01-16].
 14. *Slévárenská technologie pístů pro výrobu spalovacích motorů* [online]. Liberec, 2021, 45 s. [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/161302/Konecny_Dan_BP_21_6_2021.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. TUL. Vedoucí práce prof. Ing. Iva Nová, CSc.
 15. *Narrowing your piston choices*. Online. www.motortrend.com. 2014. Dostupné z: <https://www.motortrend.com/how-to/narrowing-your-piston-choices/>. [cit. 2024-01-16].
 16. *Aligned Grain Flow*. Online. auto.jepistons.com. 2023. Dostupné z: <https://auto.jepistons.com/je-auto-blog/aligned-grain-flow-introducing-je-pistons-revolutionary-forging-technology/>. [cit. 2024-01-16].
 17. *How a forged piston is produced*. Online. www.motortrend.com. 2018. Dostupné z: <https://www.motortrend.com/how-to/1803-how-a-forged-piston-is-produced>. [cit. 2024-01-16].
 18. *Auto.jepistons*. Online. 2022. Dostupné z: <https://auto.jepistons.com/blog/2618-vs.-4032-material-differences>. [cit. 2024-05-12].
 19. *Vady hliníkových odliťků* [online]. Liberec, 2016, 61 s. [cit. 2023-03-01]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/149920/V_00417_Sb.pdf?sequence=4&isAllowed=y. Bakalářská práce. TUL. Vedoucí práce Ing. Iva Nováková, Ph.D.
-

-
20. *Diagnostika a řízení kvality odlitků* [online]. Ostrava, 2013, 179 s. [cit. 2023-03-01]. první. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/08_Diagnostika_a_rizeni_kvality_odlitku/Elbel_Diagnostika_a_rizeni_kvality.pdf. Studijní opora. VŠB-TUO. Vedoucí práce Prof. Ing. Tomáš Elbel, CSc.
 21. *Experimentální ověření ultrazvukových systému pro nedestruktivní zkoušení*. Praha, 2020, 73 s. Dostupné také z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/89678/F2-BP-2020-Pham-Huu%20Petr-BP-final-pham.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Prof. Ing. Jan Suchánek, CSc.
 22. RULCOVÁ, Adéla a Jiří MACHUTA. *Simulační výpočty tuhnutí a chladnutí odlitků jako nástroje pro zvýšení kvality výroby pístních kroužků z litiny s lupínkovým grafitem*. Technická Univerzita v Liberci, 2015. Dostupné také z: http://knihovna-opac.tul.cz/diplomovaPrace.php?id_dipl=32016&typ=1
 23. ČSN 42 1240. *Vady odlitků, názvosloví a třídění vad*. 2. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 1964.
 24. OTÁHAL, Vlastislav. 2008. *Vady odlitků - Atlas Vad Železné a neželezné slitiny*. Brno: MCFC/TEP.
 25. *Slévárství*. 67. Praha, 2019, 76 s. ISSN 0037-6825.
 26. *Slévárství*. 64. Praha, 2016, 144 s. ISSN 0037-6825
 27. *Spektrometry.cz. Spektrometry* [online]. Blansko [cit. 2023-03-05]. Dostupné z: https://www.spektrometry.cz/analyzatory/rucni_analyzator_kovu_a_slitin_delta_professional_bas_rudice_delta.php
 28. *Hutnické listy*. LXIII. 2010. ISSN 0018-8069.
 29. Wang, J. *et al.* (2021). Solutions to Common Problems of Forged Steel Piston. In: *Proceedings of China SAE Congress 2019: Selected Papers. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 646. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7945-5_50
 30. *Pyrotek*. Online. www.pyrotek.com. 2018. Dostupné z: <https://www.pyrotek.com/show/ProductLine>. [cit. 2024-01-16].
 31. *RECUPERATIVE GAS FIRED BASIN TILTING MK V 'R'*. Online. www.morganthermalceramics.com. Dostupné z: https://www.morganthermalceramics.com/media/gtzhlyftk/recup_gfbt-mms.pdf. [cit. 2024-04-04].
 32. *CITACE PRO*. Online. Dostupné z: <https://www.citacepro.com>. [cit. 2024-05-21].
-

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Vlastnosti ocelí pro výrobu pístů
- Příloha 2 Vlastnosti litin pro výrobu pístů a jejich částí
- Příloha 3 Pece MORGAN
- Příloha 4 Slévárenské vady pístů

Příloha 1
 Vlastnosti ocelí pro výrobu pístů [1]

1/1

Table 4.5: Steels for pistons—chemical composition, mechanical and physical properties

Description		42CrMo4	38MnVS6
State of heat treatment		Heat-treated	Controlled cooling from heat of deformation
Alloying elements (Percent by weight)	C	0.38–0.45	0.34–0.41
	Si	max. 0.40	0.15–0.80
	Mn	0.60–0.90	1.20–1.60
	Cr	0.90–1.20	max. 0.30
	Mo	0.15–0.30	max. 0.08
	P	max. 0.035	max. 0.025
	S	max. 0.035	0.020–0.060
	V		0.08–0.020
	N		0.010–0.020
Brinell hardness HBW 30		265–330	240–310
Tensile strength R_m [MPa]	20°C	920–980	910
	130°C	870–960	860
	300°C	850–930	840
	450°C	630–690	610
Yield strength $R_{p0.2}$ [MPa]	20°C	740–860	610
	130°C	700–800	570
	300°C	680–750	540
	450°C	520–580	450
Elongation at fracture A_5 [%]	20°C	12–15	14
	130°C	8–13	9
	300°C	10–13	11
	450°C	15–16	15
Fatigue strength σ_{bw} [MPa]	20°C	370–440	370
	130°C	350–410	350
	300°C	340–400	320
	450°C	280–340	290
Young's modulus E [MPa]	20°C	212,000	208,000
	130°C	203,000	201,000
	300°C	193,000	189,000
	450°C	180,000	176,000
Thermal conductivity λ [W/mK]	20°C	44	38
	130°C	43	39
	300°C	40	39
	450°C	37	37
Average linear thermal expansion α [10^{-6} m/mK]	20–300°C	13.2	13.1
	20–450°C	13.7	13.7
Density ρ [g/cm ³]	20°C	7.80	7.78

Vlastnosti litin pro výrobu pístů a jejich částí [1]

Table 4.4: MAHLE cast iron materials—chemical composition, mechanical and physical properties (guidelines for separately cast sample bars)

Description	Austenitic cast iron for ring carriers		Cast iron with spheroidal graphite for pistons and piston skirts	
	M-H (lamellar)	M-K (spherulithic)	M-S70 (EN GJS 700-2)	
Alloying elements [Percent by weight]	C	2.4–2.8	2.4–2.8	3.5–4.1
	Si	1.8–2.4	2.9–3.1	2.0–2.4
	Mn	1.0–1.4	0.6–0.8	0.3–0.5
	Ni	13.5–17.0	19.5–20.5	0.6–0.8
	Cr	1.0–1.6	0.9–1.1	–
	Cu	5.0–7.0		<0.1
	Mo			
	Mg		0.03–0.05	0.04–0.06
Brinell hardness HBW 30		120–150	140–180	240–300
Tensile strength R_m [MPa]	20°C	190	380	700
	100°C	170		640
	200°C	160		600
	300°C	160		590
	400°C	150		530
Yield strength $R_{p0.2}$ [MPa]	20°C	150	210	420
	100°C	150		390
	200°C	140		360
	300°C	140		350
	400°C	130		340
Elongation at fracture A_5 [%]	20°C	2	8	2
Fatigue strength σ_{bw} [MPa]	20°C	150		250
Young's modulus E [MPa]	20°C	100,000	120,000	177,000
	200°C			171,000
Thermal conductivity λ [W/mK]	20°C	32	13	27
Thermal expansion α [10^{-6} m/mK]	20–200°C	18	18	12
Density ρ [g/cm ³]	20°C	7.45	7.4	7.2

RECUPERATIVE GAS FIRED BASIN TILTING MK V 'R'

IMPROVES THE THERMAL EFFICIENCY OF THE MELTING PROCESS

REDUCES FUEL CONSUMPTION

The Morgan Recuperative Basin Tilting Furnace is specially designed for highly efficient, rapid, bulk melting of aluminium and zinc alloys for both die-casting and non-ferrous foundries. The furnace utilizes exhaust recuperation, where a portion of the heat in the waste gases is recycled to the combustion air, saving at least 25% in energy over non recuperating furnaces.



LOW NOISE LEVEL

LOW HOLDING COSTS

SIMPLE MAINTENANCE

FURNACE DESCRIPTION

The steel furnace casing is lined with MorganMMS radiant panels backed by premium grade insulation.

LIP AXIS POURING

Lip axis pouring is achieved by tilting the furnace by means of twin hydraulic rams. The pouring rate is easily controlled, allowing a transfer ladle to be kept in one position.

SIZE RANGE

• 213—1496 kg Aluminium

CONTROL SYSTEM

Furnaces with automatic, fully-modulating burners are supplied with a fixed pyrometer assembly, which is connected to the control system, to provide metal temperature control. Other control systems are also available.

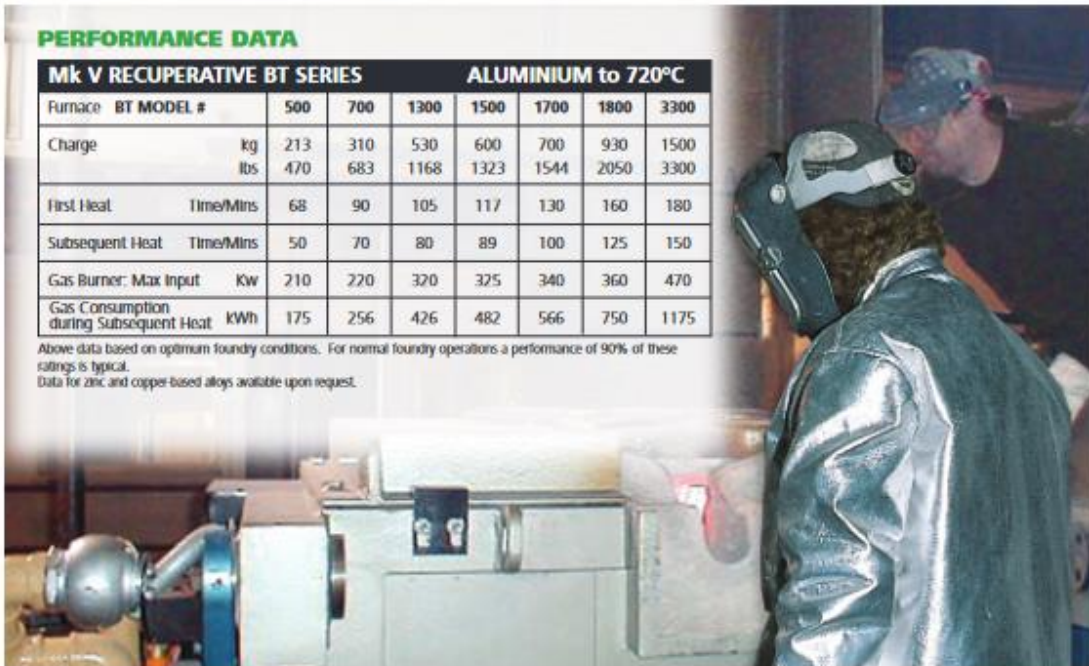
INSTALLATION

The furnace is supplied assembled and only requires bolting down on a suitable concrete floor and connection to fuel and electricity sources. For zinc and aluminium melting, MKV Furnaces up to BT700 Furnaces can be fitted with a spilt metal tray. Otherwise, spilt-metal pits should be provided.

PERFORMANCE DATA

Mk V RECUPERATIVE BT SERIES		ALUMINIUM to 720°C						
Furnace	BT MODEL #	500	700	1300	1500	1700	1800	3300
Charge	kg	213	310	530	600	700	930	1500
	lbs	470	683	1168	1323	1544	2050	3300
First Heat	Time/Mins	68	90	105	117	130	160	180
Subsequent Heat	Time/Mins	50	70	80	89	100	125	150
Gas Burner: Max Input	Kw	210	270	320	325	340	360	470
Gas Consumption during Subsequent Heat	KWh	175	256	426	482	566	750	1175

Above data based on optimum foundry conditions. For normal foundry operators a performance of 90% of these ratings is typical. Data for zinc and copper-based alloys available upon request.



For additional information on Morgan MMS' products & services or to find a location nearest to you, please visit: www.morganmms.com



GRTBCE3.12 MORGAN MMS RESERVES THE RIGHT TO CHANGE SPECS AT ANY TIME. NOT RESPONSIBLE FOR ANY TYPOGRAPHIC ERRORS.

RECUPERATIVE GAS FIRED BASIN TILTING MK V 'R'

KEY FEATURES

BURNER EQUIPMENT

- Fully-Modulating Gas Burners: high velocity, low NOX, pre heated air, nozzle mix, with inverter fan control
- Exhaust recuperator
- Burner Tilts with Furnace
- Radiant Panels
- Crucible and Burner Hour Meters
- Seven Day Time Clock
- Proportional (PID) Control

POLICEMAN CONTROL

The furnace is equipped with a "policeman" control. This feature is designed to prevent overheating of the furnace refractories and radiant panels, thus avoiding reduction of their lifespan.

PYROMETRY

A variety of metal temperature pyrometry can be specified. This includes adjustable or fixed immersion types and thermocouples housed within the crucible for holding applications.

FURNACE LINING

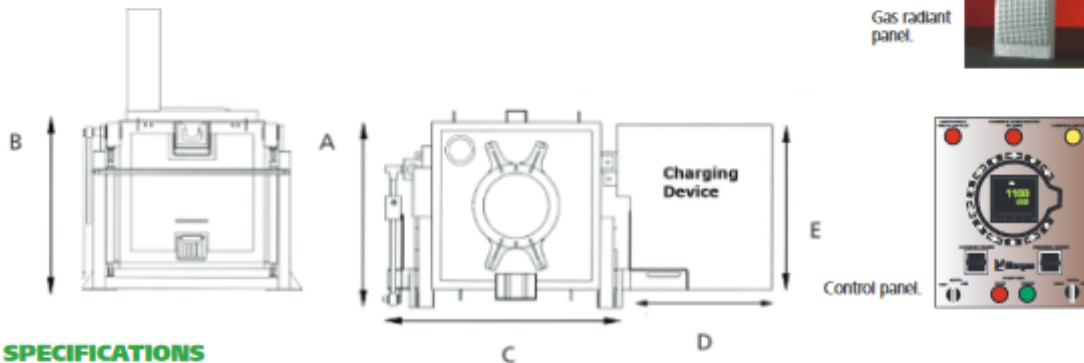
For aluminium and zinc alloy applications: lined with a high alumina, gas radiant panel hot face, backed with a highly efficient insulation. The system is particularly beneficial in gas-fired applications, providing an effective radiating surface from the non-luminous productions of combustion.

OPTIONS AVAILABLE

Spill metal detection, low metal temperature alarm, in-range indicating beacons and metal temperature overshoot control.

BENEFITS

- Very Low Energy Costs
- Good Metal Temperature Control
- Very Low Casing Temperature
- Low Noise Level
- Low Holding Costs
- Simple Maintenance



SPECIFICATIONS

	BT500	BT700	BT1300	BT1500	BT1700	BT1800	BT3300	
CRUCIBLE	TPX387E	TPX412E TBN112	TPX587E TPX1600 TBN587, TBN750	TPX587E TPX1600 TBN587, TBN750	TPX1800E TBN690	TBN1100	BU1800ALLU	
FURNACE DIMENSIONS (mm)								
A	1480	1480	1780	1780	1815	1815	2100	
B	1560	1560	1630	1630	1850	1850	2250	
C	2310	2310	2500	2500	2500	2500	3000	
D	1370	1370	1410	1410	1650	1650	1800	
E	1460	1460	1460	1460	1460	1460	2000	
SHIPPING (approximate)								
NETT WEIGHT	kg	3500	3800	4200	4200	4500	4500	8000
GROSS WEIGHT	kg	3700	4000	4500	4500	4800	4800	8500
VOLUME	m ³	5.4	5.5	7.3	7.3	8	8	15

For additional information on Morgan MMS' products & services or to find a location nearest to you, please visit: www.morganmms.com



GR18B-C03.17 MORGAN MMS RESERVES THE RIGHT TO CHANGE SPECS AT ANY TIME. NOT RESPONSIBLE FOR ANY TYPOGRAPHIC ERRORS.

Třída vad	Název třídy vad	Skupina vad	Název skupiny vad
100	Vady tvaru, rozměrů a hmotnosti	110	Chybějící část odlitku bez lomu
		120	Chybějící část odlitku s lomem
		130	Nedodržení rozměrů, nesprávný tvar
		140	Nedodržení hmotnosti odlitku
200	Vady povrchu	210	Přípečeniny
		220	Zálupy
		230	Nárosty
		240	Výronky
		250	Výpotky
		260	Zatekliny
		270	Nepravidelnosti povrchu odlitku
		280	Vady povrchové ochrany odlitku
300	Porušení souvislosti	310	Trhliny
		320	Praskliny
		330	Porušení souvislosti z důvodu mechanického poškození odlitku
		340	Porušení souvislosti z důvodu nespojení kovu
400	Dutiny	410	Bubliny
		420	Bodliny
		430	Odvařeniny
		440	Staženiny
500	Makroskopické vměstky a vady makrostruktury	510	Struskovitost
		520	Nekovové vměstky
		530	Makrosegregace a vycezeniny
		540	Broky
		550	Kovové vměstky
		560	Nevyhovující lom
600	Vady mikrostruktury	610	Mikroskopické dutiny
		620	Vměstky
		630	Nesprávná velikost zrna
		640	Nesprávný obsah strukturních složek
		650	Zatvrdlina, zákalka
		660	Obrácená zákalka
		670	Oduhličení povrchu
		680	Jiné odchylky od mikrostruktury
700	Vady chemického složení a vlastností odlitku	710	Nesprávné chemické složení
		720	Odchylky hodnot mechanických vlastností
		730	Odchylky hodnot fyzikálních vlastností
		740	Nevyhovující homogenita odlitku