



CHLAZENÍ JADER TLAKOVÉ LICÍ FORMY TECHNOLOGIÍ JET COOLING

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály
Autor práce: **Bc. Jakub Fiala**
Vedoucí práce: prof. Ing. Iva Nová, CSc.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub Fiala**
Osobní číslo: **S13000526**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**
Název tématu: **Chlazení jader tlakové licí formy technologií Jet Cooling**
Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s technologií výroby odlitků vysokotlakým litím. Zaměřte se na temperování vysokotlakých forem a na chlazení jejich jader.
2. Prostudujte novou metodu chlazení jader vysokotlakých forem - Jet Cooling a porovnejte ji s konvenční metodou chlazení jader.
3. V rámci spolupráce s firmou ŠKODA Auto, a.s. Mladá Boleslav realizujte praktické zkoušky chlazení jader slévárenské formy pomocí metody Jet Cooling.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky a formulujte dílčí závěry.

Rozsah grafických prací: **grafy, tabulky**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 50**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

- [1] VALECKÝ, J. a kol. *Lití kovů pod tlakem*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1963.
- [2] RAGAN, E. a kol. *Liatie kovov pod tlakom*, 1. vydání. Prešov: Vydavateľstvo Michala Vaška, 2007. ISBN 978-80-8073-979-9.
- [3] Interní podklady firmy ŠKODA AUTO a.s. Mladá Boleslav.
- [4] Technické podklady firmy LETHIGUEL - Francie.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Iva Nová, CSc.**
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání diplomové práce: **2. března 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **2. června 2016**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 2. března 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

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

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 25.5.2015

Podpis: 

Anotace

Cílem této práce je prověřit vhodnost a přínosy technologie chlazení jader Jet-Cooling na tlakové lici formě pro odlitek bloku motoru v sériovém provozu slévárny ŠKODA AUTO a.s. V teoretické části práce se nachází popis výroby odlitků vysokotlakým litím a zejména pak principy temperování a chlazení tlakových licích forem. Obsahem praktické části je stručné seznámení s technologií Jet-Cooling a popis realizace samotného experimentu od výběru zkoušených jader, přes návrh metody a postupy měření až po vyhodnocení výsledků. Na základě těchto výsledků se nachází v poslední části práce formulace dílčích závěrů.

Klíčová slova

Tlakové lití, tlaková lici forma, chlazení jader, Jet-Cooling

Annotation

The aim of this thesis is to discover suitability and benefits of core pins cooling by the Jet-Cooling technology in high pressure die casting mould for engine block cast in series production in ŠKODA AUTO foundry. In the theoretical part there is a description of cast's production by high pressure die casting especially with the principles of tempering and cooling moulds. Content of the practical part is a brief introduction with the Jet-Cooling technology and a description of the experiment itself, from the selection of tested core pins, over proposal of a method and measurement procedures to the evaluation of results. On the basis of these results there is the formulation of partial conclusions in the last part of this thesis.

Key words

High pressure die casting, pressure die casting mould, core pins cooling, Jet-Cooling

Poděkování

Rád bych touto formou poděkoval vedoucí prof. Ing. Ivě Nové, CSc. za vedení při tvorbě této diplomové práce a konsultantovi Ing. Přemyslu Stýblovi za jeho cenné rady a připomínky. V neposlední řadě patří poděkování i mé rodině, která mne po celou dobu studia podporovala.

Diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže /SGS 21005/ ze strany Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.

OBSAH

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	8
1. ÚVOD	11
2. TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE.....	13
2.1 Technologie tlakového lití.....	13
2.1.1 Historie tlakového lití.....	13
2.1.2 Výhody, nevýhody a ekonomické zhodnocení technologie.....	14
2.2 Stroje pro tlakové lití.....	15
2.3 Licí cyklus	18
2.4 Tlakové licí formy	19
2.4.1 Konstrukce	20
2.4.2 Materiály tlakových licích forem	21
2.5 Speciální metody používané ve ŠKODA AUTO a.s.....	25
2.6 Materiály pro tlakové lití.....	27
2.7 Chlazení a temperace tlakové licí formy.....	29
2.7.1 Význam regulace teploty formy	29
2.7.2 Nástřik separačního prostředku.....	30
2.7.3 Vnitřní chlazení a temperování formy	30
2.7.4 Problematika chlazení jader formy	34
2.7.5 Termoregulační zařízení.....	35
2.7.6 Tepelné procesy mezi formou a odlitkem	36
2.7.7 Zjednodušený výpočet tepelné bilance.....	38
2.8 Numerické analýzy ve slévárenství.....	40
3. PRAKTICKÁ ČÁST PRÁCE.....	42
3.1 Technologie chlazení jader Jet–Cooling	43
3.1.1 Princip chlazení	44
3.1.2 Chladicí cyklus.....	45

3.2	Zkouška chlazení technologie Jet-Cooling	46
3.2.1	Volba chladícího agregátu.....	48
3.2.2	Jádra a chladící elementy	49
3.2.3	Řešení rozvodů média	51
3.2.4	Zapojení jader do chladících okruhů	52
3.2.5	Optimalizace okruhů a parametrů chlazení	54
3.2.6	Dílčí výsledky experimentu	58
3.2.6.1	Životnost jader.....	60
3.2.6.2	Kvalita odlitku.....	61
3.2.6.3	Porovnání mikrostruktury odlitku	64
3.3	Diskuse dílčích výsledků.....	65
4.	ZÁVĚR.....	70
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ	72
	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	74
	SEZNAM PŘÍLOH.....	77

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

2D, 3D	2, 3 rozměrný
A	tažnost [%]
a.s.	Akciová společnost
CAD	Computer aided design (počítačem podporované navrhování)
CT	Computed tomography (počítačová tomografie)
ČSN	Česká státní norma
Demi	Demineralizovaná
DIN	Deutsche Industrie-Norm (Německá národní norma)
DN	Světlost trubek [mm]
dQ	Tepelný tok [W]
E	Modul pružnosti [Pa]
EA211	Označení koncernové řady motorů
EN	Evropská norma
HBW	Tvrlost dle Brinella
HRC	Tvrlost dle Rockwella s kuželovým zkušebním tělesem
HV	Tvrlost dle Vickerse
J-C	Jet-Cooling
k	Přepočební koeficient [-]
MKP	Metoda konečných prvků
NPT	National pipe thread, americký závit dle normy ANSI/ASME
OHV	Over head valve, typ ventilového rozvodu pístového motoru

PACVD	Plasma-assisted chemical vapour deposition (chemické napařování povlaků aktivované plazmou)
PTFE	Polytetrafluorethylen - Teflon
PVD	Physical vapour deposition (fyzikální napařování povlaků)
Q	Celkové množství tepla [Ws]
Q _{ch}	Teplota odvedená ze soustavy forma-odlitek chlazením [Ws]
Q _{píst}	Teplota ze soustavy forma-odlitek odvedená pístem [Ws]
Q _{proud}	Teplota ze soustavy forma-odlitek odvedená prouděním [Ws]
Q _{sál}	Teplota ze soustavy forma-odlitek vyzářená [Ws]
Q _{stroj}	Teplota odvedená ze soustavy forma-odlitek frémami [Ws]
R _m	Mez pevnosti v tahu [Pa]
R _{p0,2}	Smluvní mez kluzu [Pa]
RTG	Rentgenové záření
S	Plocha styčná, tepelného toku, proudící kapaliny, sálajícího povrchu [m ²]
SW	Software
t	Čas [s]
t _{ch}	Teplota chladícího media [°C]
T _{kr}	Teplota krystalizace taveniny [°C]
t _{pF}	Teplota povrchu formy [°C]
TPO	Tepelný přechodový odpor
t _{pO}	Teplota povrchu odlitku [°C]

t_s	Teplota ochlazované stěny [$^{\circ}\text{C}$]
$t_{sál}$	Teplota sálajícího povrchu [$^{\circ}\text{C}$]
TSi	Twincharged Stratified Injection (přepřňované motory s přímým vstřikem benzínu)
VSN3	Oddělení výroby metalurgického nářadí ve ŠKODA AUTO a.s.
X_F	Charakteristický rozměr formy
Z	Kontrakce [%]
α_D	Součinitel přestupu tepla dotykem [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]
α_p	Součinitel přestupu tepla [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]
ΔT_F	Rozdíl teplot ve formě [$^{\circ}\text{C}$]
ΔT_O	Rozdíl teplot v odlitku [$^{\circ}\text{C}$]
λ	Tepelná vodivost [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]
σ	Součinitel sálání dokonale černého tělesa [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$]
dt/dx	Teplotní gradient [$^{\circ}\text{C}$]
ε	Emisivita tělesa [-]

1. ÚVOD

Historicky nejvýznamnější producent tlakově litých odlitků na Českém území je bezesporu slévárna ŠKODA AUTO a.s. v Mladé Boleslavi. Hliníkové bloky motorů byly běžné ve vozech značky Škoda od roku 1947, avšak lité v tu dobu běžnou, gravitační, technologií. Na počátku 50tých let vznikl odlitek nové koncepce čtyřválcového bloku motoru OHV, kvůli kterému bylo nutné sestavit novou metalurgickou linku. Tuto problematiku automobilka řešila s firmou CZ Strakonice, která měla velmi dobré zkušenosti s tlakovým litím a právě také díky této spolupráci byla zvolena pro výrobu tohoto odlitku technologie vysokotlakého lití. Na této nové metalurgické lince bylo poté vyráběno až 59 různých druhů odlitků.

Až do té doby se tlakovým litím vyráběly jen některé velkoobjemové americké motory, v Evropě byla tato technologie novinkou. Slévárna Škodovky patřila ve své době k nejmodernějším a jen železná opona a obecně bídný image Československa té doby zabránily zasloužené mezinárodní publicitě. [1]

V další fázi prošlo tlakové lití hliníku v Mladé Boleslavi bouřlivým vývojem. Roku 1961 byla zahájena výstavba nových hutních provozů na „zelené louce“. Na základě požadavků automobilky došlo k vývoji licích strojů, začalo být využíváno tlakových licích strojů se studenou horizontální komorou s uzavírací silou až 2800 tun. Pro výrobu odlitku bloku motoru také došlo ve spolupráci s Výzkumným ústavem kovů v Panenských Břežanech k vyvinutí nové slitiny.

Důležitým strategickým partnerem pro slévárnu hliníku ŠKODA AUTO a.s. je již od roku 1961 samozřejmě nářad'ovna, která leží také v závodě v Mladé Boleslavi v těsné blízkosti slévárny. Mezi kompetence nářad'ovny v současné době nepatří pouze kompletní výroba a konstrukce forem jako taková, ale zaštiťuje i jejich opravy, technický servis ve slévárně, návrh licí technologie apod.

Současný sortiment odlitků ve slévárně hliníku ŠKODA AUTO a.s. se skládá z dílů bloků motoru, spodních dílů motoru, skříní spojek a skříní převodovek, vše v několika jejich modifikacích. Dnešní produkce dosahuje až 20 100 tun hliníkových odlitků za rok. Většinou se jedná o velmi objemné až 25kg vážící surové odlitky, což znamená, že je nutné do licí formy dopravit velké množství taveniny, které samozřejmě vnese do procesu velké množství tepelné energie. Tu je nezbytné při tuhnutí taveniny v odlitek odvést z pracovního procesu. Využití konvenčních temperačních a chladících kanálů ve formě však přináší určitá omezení v dostupnosti

chlazení. Touto koncepcí lze jen obtížně zachladit úzké a hluboké tvary, jakými jsou například vkládaná jádra formy. Nedostatečně zachlazená jádra poté způsobují v jejich okolí vady odlitku, nízkou kvalitu povrchu a díky jejich případnému přehřátí se rapidně snižuje i jejich životnost.

Jako účinné řešení tohoto problému se jeví použití technologie Jet-Cooling, která by právě výše popsany problém měla eliminovat. Z tohoto důvodu jsem vypracoval diplomovou práci na téma *Chlazení jader tlakové licí formy technologií Jet-Cooling*. Cílem práce je vtipovat vhodná jádra pro zkoušku chlazení technologií Jet-Cooling, provést její zástavbu do konstrukce stávající tlakové licí formy pro bloku motoru, provést praktickou zkoušku v provozu slévárny a formulovat dílčí výsledky, zejména pak posoudit vliv tohoto chlazení na životnost jader a kvalitu odlitku.

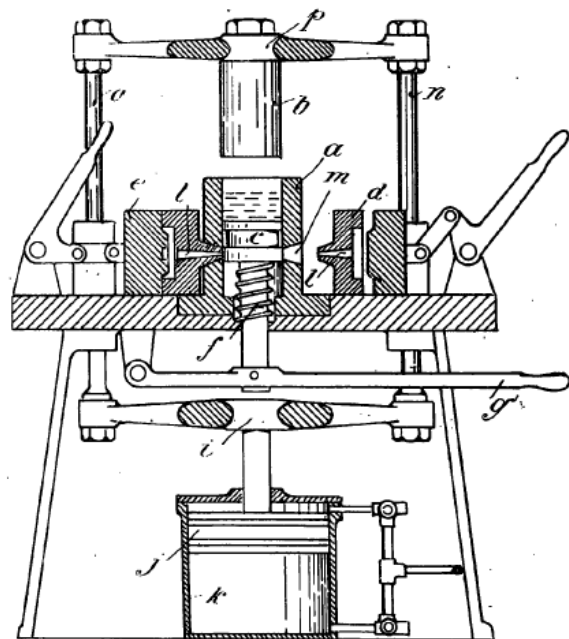
2. TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE

2.1 Technologie tlakového lití

Princip technologie vysokotlakého lití spočívá ve vyplňování dutiny trvalé kovové formy roztaveným kovem za pomoci vysokého tlaku. Specifická pro tuto technologii je tzv. fáze dotlaku, kdy je na taveninu vyvozen tlak rovnající se měrnému tlaku v dutině formy 20 - 100MPa. Tato fáze má významný vliv na kvalitu odlitků, životnost formy a v podstatě celý lící proces. Specifické je také pro tuto metodu tzv. atermické podchlazení, což je podchlazení taveniny vlivem zvýšeného tlaku. Po ztuhnutí taveniny je odlitek vyjmut z formy a dále zpracováván. Jedná se o velmi přesný a produktivní způsob lití určený pro tvorbu vysokojakostních, převážně i tlakotěsných a členitých odlitků.

2.1.1 Historie tlakového lití

Vznik této technologie se uvádí již v 19. století, kdy byla využívána pro výrobu tiskařských písmen. Ve strojírenství se tato metoda výroby odlitků začala používat počátkem 20. století. Dosud se jednalo o technologii s teplou komorou. Počátek tlakového lití v Československu je spjat se jménem Ing. Josefa Poláka, který svým patentem s názvem „Stroj na výrobu vstříkované litiny“ na počátku 20tých let 20. století položil základy metody tlakového lití se studenou komorou. Jeho zařízení na vstříkování mosazi vzduchem o tlaku 15ti atmosfér sestrojil ve své dílně v Praze na Balabence v letech 1923 – 1924. Polákova firma se zabývala výrobou polotovarů z neželezných kovů a zároveň Ing. Polák soustavně pracoval na inovaci této technologie. Za svůj život se mu podařilo přihlásit mnoho patentů v oboru slévárství v mnoha zemích, jako např. USA, Velká Británie, Itálie, Švédsko a v dalších. Ing. Polák zemřel 17. října 1939. V bývalém Československu úspěch Ing. Poláka nastartoval vývoj



Obr. 1 schéma lícího stroje z patentového spisu Ing. Poláka [11]

této technologie i tlakových licích strojů. Od roku 1957 se výrobcem těchto strojů v bývalém Československu stala např. firma Vihorlat Snina. Doposud se v České Republice výrobou tlakových licích strojů zabývá firma např. TOS Rakovník.

2.1.2 Výhody, nevýhody a ekonomické zhodnocení technologie

Lití pod tlakem je technologie, která sebou nese jistá specifika a její výhodnost tkví v podstatě pouze při použití v sériové a hromadné výrobě, kde se velmi často využívá robotických a automatizovaných pracovišť. Emil Ragan výhody a nevýhody této technologie uvedl ve své knize takto:

Výhody lití pod tlakem:

- možnost výroby odlitků v nízkých rozměrových tolerancích, často bez obrábění
- hladký povrch odlitku
- dobré mechanické vlastnosti odlitků vzhledem na jemnozrnnou strukturu
- možnost výroby tenkostěnných odlitků
- menší náklady na materiál
- v odlitkách se dají předlévat otvory i velmi malých průměrů s malým dodatečným opracováním
- možnost výroby součástek složitých tvarů
- lehké použití zalitých vložek a jiných kovů nebo některých nekovových materiálů
- větší přesnost než při odlitků ze stejných materiálů litých do písku

Nevýhody lití pod tlakem:

- velké náklady na výrobu formy
- velké investice na stroje a další zařízení
- slitiny odlité pod tlakem mají menší tažnost
- vzhledem k nebezpečí vytvoření povrchových bublin nemůže být odlitek odlitý pod tlakem použitý za vyšších teplot než je tato teplota pro příslušné slitiny přípustná
- maximální velikost odlitku je omezená velikostí stroje
- lití pod tlakem vyžaduje určité pracovní zkušenosti

[2]

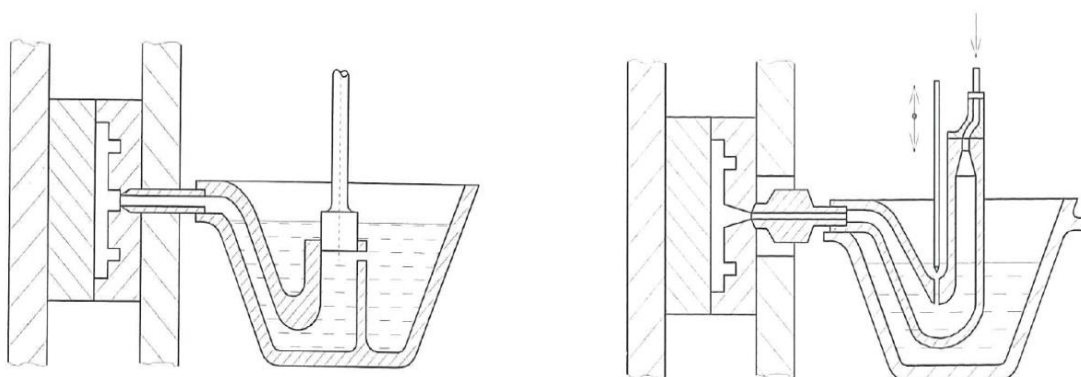
Co se ekonomického porovnání technologie týče, tak oproti ostatním technologiím odlévání, myšleno gravitační odlévání do písku a do kokil, jsou výrobní náklady při vysokotlakém lití o 15 až 30% nižší. Úspora materiálu na odlitek činí cca. 10 až 20%. Obecně lze říci, že pro malosériovou výrobu je výhodné použít lití do pískových forem a pro série do zhruba 13.000 odlitek lití do kokil. Ve srovnání tlakového lití s třískovým obráběním např. na soustružnických automatech je nutné zohlednit vysokou cenu slitiny oproti oceli, kde však u třískového obrábění může docházet k tvorbě velkého množství odpadního materiálu. Dále je nutné říci, že ani mechanické vlastnosti ani povrch odlitku nebývají z pravidla tak kvalitní jako tomu může být u obrobku. I přes tato negativa mohou však být odlitky výhodnějším řešením než obrobky, nicméně je nutné posuzovat konkrétní případy a aplikace.

2.2 Stroje pro tlakové lití

Základní dělení strojů pro lití pod vysokým tlakem:

- S teplou komorou

Konstrukční řešení strojů pro tlakové lití s teplou komorou je takové, že udržovací pec je součástí stroje a komora je tudíž v trvalém styku s roztavenou slitinou. Tato metoda se převážně využívá pro lití slitin s nízkým bodem tavení, jako jsou např. slitiny cínu, olova, zinku atd. Dle způsobu lisování a vyvinutí tlaku kovu na slitinu se dále lití s teplou komorou dělí dle obr. 2.

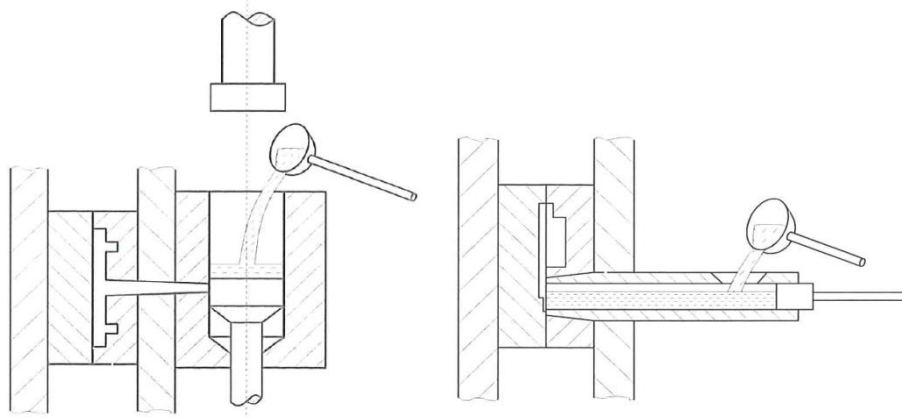


Obr. 2 vlevo – Lisování kovu pístem; vpravo – Lisování kovu vzduchem [2]

- Se studenou komorou

Při lití se stroji se studenou komorou není udržovací pec součástí tlakového licího stroje. Plnicí komora není v přímém styku s roztavenou slitinou a ta je do ní dopravována slévačskou lžící, nebo dávkovacím zařízením. Touto metodou se

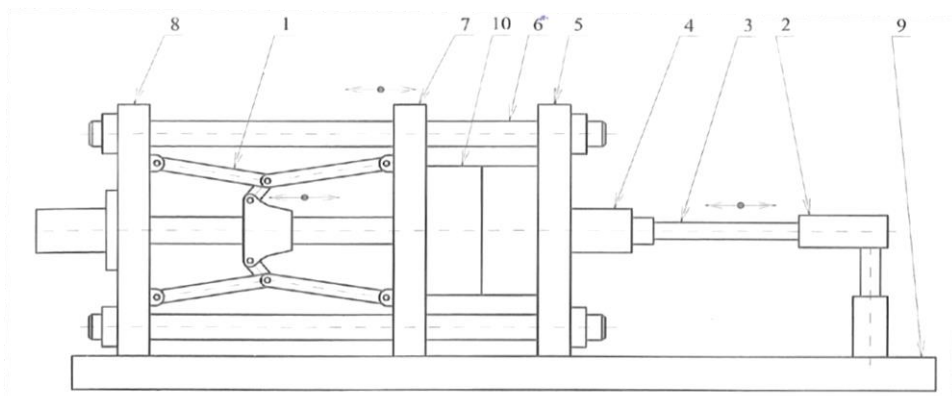
zpravidla odlévají slitiny s vysokým bodem tavení, jako např. slitiny hliníku, mědi, železa, hořčíku apod. Lití se studenou komorou se dále dělí dle obr. 3.



Obr.3 Vlevo – S vertikální komorou; Vpravo – S horizontální komorou [2]

Strojní park ve slévárně ŠKODA AUTO a.s.

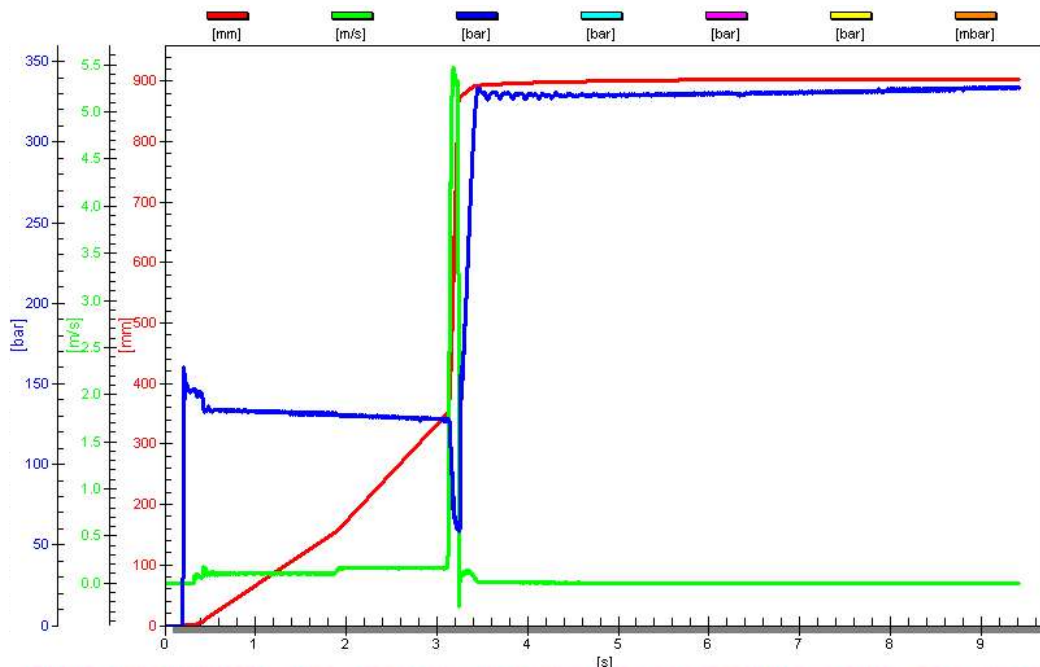
Ve slévárně hliníku ŠKODA AUTO a.s. se využívá pouze strojů se studenou, horizontální komorou od výrobců Idra, Frech, Ital – Presse a Müller – Weingarten o uzavíracích silách 1600 a 2000 tun. Tyto stroje mají shodné základní prvky. Stroje jsou třideskové konstrukce se čtyřmi sloupy. Disponují horizontálně uloženým kloubovým uzavíracím mechanismem s hydraulickým pohonem, což umožňuje bezpečné a přestavitelné sevření licí formy. Stroje jsou také vybaveny centrálním vyhazovákem, který je řízený hydromotorem s vestavěnou vyhazovací deskou. Na obr.. 4 je schematicky znázorněna konstrukce těchto strojů.



Obr.4 Schéma licího stroje s horizontální studenou komorou [2]

1-uzavírací mechanismus; 2-lisovací mechanismus; 3-lisovací píst s pístnicí; 4-plnicí komora; 5-pevný třmen; 6-sloup; 7-pohyblivý třmen; 8-zadní třmen; 9-fréma; 10-forma

Lisovací ústrojí je také uloženo horizontálně a dávkovacím zařízením je do něj dopravována tavenina z udržovací pece. Hlavní funkce lisovacího mechanismu spočívá v řízení pístu, který provádí vstřikování taveniny. Moderní řídicí systém dovoluje řízení pístu v reálném čase, s možností rozdělit rychlost pístu v závislosti na dráze do několika kroků. Rychlost plnicího pístu může dosahovat až 6ms^{-2} . Rychlost, dráha a tlak pístu jsou jedny ze základních parametrů procesu tlakového lití a příklad je uveden na obr.5. Z grafu je patrné, v jak krátkém časovém úseku dochází k lisování. Červená křivka znázorňuje dráhu pístu v plnicí komoře, zelená křivka rychlost pístu a modrá znázorňuje tlak pístu. Je zde i názorné rozdělení lisování do třech fází.



Obr.5 Příklad lisovací křivky [1]

I.fáze – pomalý pohyb pístu cca $0,2\text{m/s}$ alespoň do polohy než píst přejede nalévací otvor. Nutné pro ustálení hladiny kovu v komoře a předejití zavalování plynu v plnicí komoře.

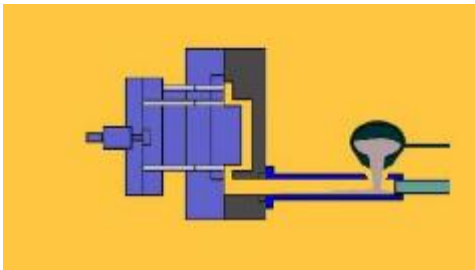
II.fáze – když kov dosáhne zářezu vtokového systému, nastane prudké zrychlení pístu, může dosahovat až 10m/s .

III.fáze – po naplnění dutiny kovem nastává fáze dotlaku, která jak bylo výše zmíněno, pozitivně ovlivňuje kvalitu odlitku, na druhou stranu ale nepříznivě namáhá licí stroj a formu. Velikost a rychlost náběhu dotlaku lze regulovat na regulátorech tlaku na licím stroji.

Tlakové licí stroje musí zajišťovat mnoho funkcí při licím cyklu. Mezi nejdůležitější patří bezpečné uzavření formy. Uzavírací síla je parametr určující velikost stroje, potažmo velikost odlévaného dílu. Další funkce jsou např. lisování kovu, pohyb odtahovaných jader, vyhazování odlitku apod. I v tomto oboru platí zásady flexibilní výroby, kdy výrobci požadují lití výrobku nárazově po malých sériích, což sebou nese četné výměny forem a přenastavování licích strojů, proto se dnes s výhodou uplatňují modulové koncepce zařízení. Tyto koncepce umožňují rychlé a snadné přenastavení stroje i parametrů.

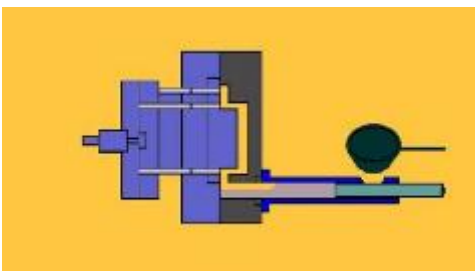
2.3 Licí cyklus

Proces tlakového lití na stroji se studenou horizontální komorou se dělí do těchto základních fází:



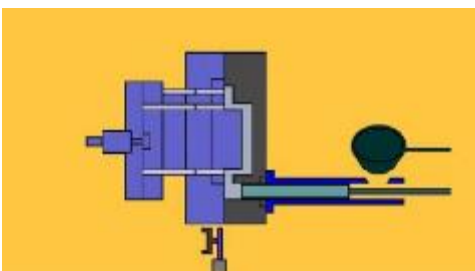
Obr.6 Licí cyklus – krok 1[10]

Licí cyklus začíná sjetím pohyblivých jader a šoupat a sevření obou polovin formy pomocí uzavíracího mechanismu licího stroje, čímž se vytvoří potřebná dutina.



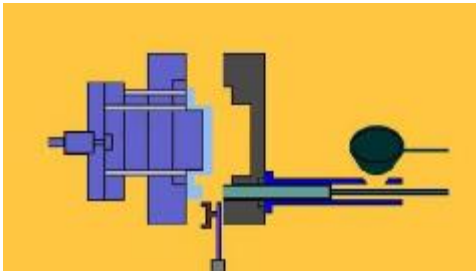
Obr.7 Licí cyklus – krok 2[10]

V druhém kroku dochází k nadávkování potřebného množství taveniny z udržovací pece pomocí dávkovacího zařízení do plnicí komory. Pohybem pístu se vstříkne tavenina do dutiny, kterou vyplní. Jedná se o fázi lisování.



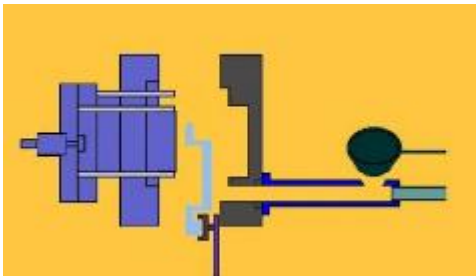
Obr.8 Licí cyklus – krok 3[10]

Fáze tuhnutí – tavenině se odebrá tepelná energie a ta tuhne v odlitek. Po celou dobu na taveninu působí píst tlakem, tzv. dotlakem, který vytváří specifický tlak v dutině formy až 100MPa. Vyšší tlaky nemají vliv na kvalitu odlitku, proto se nepoužívají.



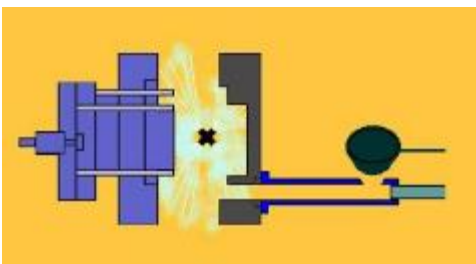
Obr.9 Licí cyklus – krok 4[10]

V tomto kroku dochází k rozjetí pohyblivé a pevné části formy a pohyblivých šupáků. Odlitek je i s tabletou a vtokovým systémem vnesen v pohyblivé polovině formy.



Obr.10 Licí cyklus – krok 5[10]

Odlitek je uchopen manipulačním robotem a za pomoci vyhazovacího systému je vyhozen z formy. Robot přiloží odlitek ke snímačům, které zaručí, že byl odlitek vyjmut úplný a založí ho do apretačního zařízení, kde dojde k odstranění vtoku a přetoků.



Obr.11 Licí cyklus – krok 6[10]

Následuje ošetření líce formy a plnicího pístu separační látkou a posléze ofuk líce. Návrat plnicího pístu do zadní polohy a jeho mazání. Manipulační robot zakládá vložky válců, které budou zalité v odlitku, do formy.

2.4 Tlakové licí formy

Jak již bylo uvedeno, na výrobu jakostního odlitku se největší měrou podílí správně navržená a vyrobená tlaková licí forma. Chyby při přípravě taveniny, změna licích parametrů, jako např. změna rychlosti pístu nebo velikost dotlaku apod. se dají odstranit za relativně nízkých nákladů, avšak oprava samotné formy, která je již nasazena do provozu, obnáší vysoké finanční a časové náklady. Také zabere výrobní kapacitu dílny, což je v současné době důležité hledisko každé nářaďovny. Velmi nákladná je i výroba odlitků pomocí nevhodně navržené formy, která způsobuje vysokou zmetkovitost produkce.

2.4.1 Konstrukce

Tlakové licí formy mohou být konstrukčně řešeny z jednoho kusu materiálu. Toto se využívá pouze u velmi jednoduchých odlitků, kde se dá předpokládat, že forma nebude příliš namáhána. Pro složitější typy odlitku se využívá forem, které mají exponované části vložkovány, což zvyšuje životnost formy a počet odlitých kusů za její životnost. V případě poškození určité části formy je možná její jednoduchá výměna, bez nutnosti renovace formy navářením apod. Toto je i případ formy pro lití bloku motoru, který je velmi složitý, členitý a obsahuje zalité vložky válců z šedé litiny.

Základní části formy:

- Pevná část

Je to část formy s vtokovým systémem a je upevněna na pevné frémě licího stroje, kde do této části formy ústí plnicí komora.

- Pohyblivá část

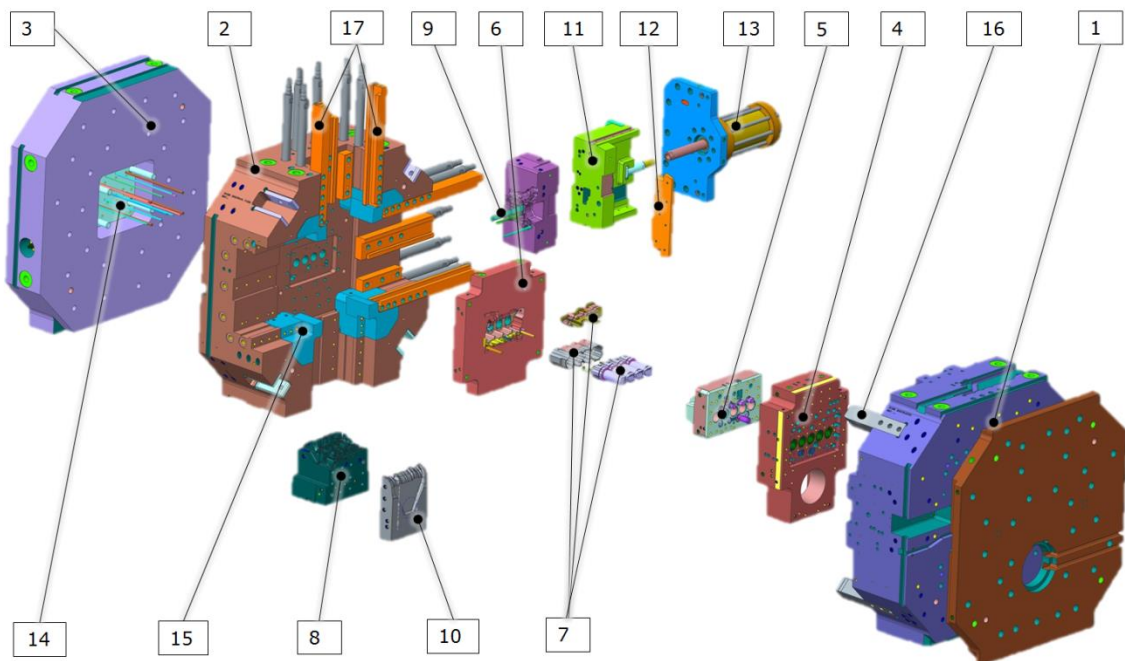
Jedná se o část formy upevněnou na pohyblivé frémě stroje, obsahuje pohyblivé části formy jako např. vyhazování a odtahovaná jádra. Je koncipována tak, aby byl odlitek vynášen v této polovině formy.

Důležitá fáze konstrukce formy je návrh technologických prvků ve formě. Správný návrh těchto prvků zaručí hospodárnou výrobu jakostních odlitků. Jedná se hlavně o:

- správnou volbu a místo vtokového systému
- velikost a umístění nařiznutí vzhledem ke geometrii odlitku
- vhodné umístění odvzdušnění a přetoků
- zaformování odlitku
- volba dělicí roviny
- vhodné rozmístění vyhazovačů
- návrh temperačního a chladicího systému
- vložkování tvarů apod.

Další důležitý prvek v konstrukci formy je systém chlazení a temperace, který velkou měrou ovlivňuje kvalitu odlitku, životnost formy a celý licí cyklus. O této problematice je pojednáno podrobně v kapitole 2.2.

Konstrukční řešení formy pro blok motoru je znázorněno na obrázku 12.



Obr.12 Konstrukce tlakové licí formy pro blok motoru – koncepce Škoda Auto a.s.[1]

1-Pevný rám; 2-Pohyblivý rám; 3-Stolička; 4-Pevná vložka; 5-Karter; 6-Pohyblivá vložka; 7-Vložky do pohyblivého dílu; 8-Šupák; 9-Vložené jádro; 10-Vtoková deska; 11-Vedení šupáku; 12-Úkosový zámek; 13-Hydraulický válec šupáku; 14-Vyhazovací systém; 15-Vyplňovací vložky; 16-Vodící kolíky; 17-Vodící lišty šupáků

2.4.2 Materiály tlakových licích forem

Tlaková licí forma je velice mechanicky, tepelně a chemicky exponované zařízení. Toto nepříznivě ovlivňuje životnost, která je u hlavních složitých tvarových částí forem pro bloky motoru mezi 50 – 90ti tisíci odlitky. Mezi hlavní kritéria životnosti patří kvalita líce formy, jež je nepříznivě ovlivněna cyklickým tepelným namáháním a opotřebením jednotlivých částí formy za vysokých teplot.

Tepelné namáhání formy

Je způsobeno stykem roztaveného kovu o vysoké teplotě s licí formy s teplotou nižší. Rozdíl těchto teplot definuje intenzitu tepelného rázu. Při zalisování a působení roztaveného kovu na povrch formy, kdy povrch a jádro materiálu mají velké teplotní rozdíly, dochází k tlakovému pnutí v povrchové vrstvě líce. Při ošetření formy separačním nástřikem dochází v povrchové vrstvě formy naopak k pnutí tahovému. Toto střídání tahového a tlakového pnutí vede k tvorbě síťových trhlin, viz obr. 13. Materiálové vlastnosti, které toto nejvíce ovlivňují, jsou tepelná vodivost, tepelná roztažnost a modul pružnosti.

Mechanické namáhání formy

Mechanické namáhání formy je vyvozeno především bržděným smršťováním odlitku v dutině formy, kdy smršťující se, tuhnoucí a chladnoucí odlitek je přidržován tvarovými částmi formy. Při vyhazování odlitku z formy, takto přidržovaný odlitek také namáhá tvarové části formy na otěr.

Zde je nutné si uvědomit, zda je výhodné zpracovávat materiál na vyšší pevnost a tvrdost, kdy materiál také lépe odolává abrazivním a chemickým účinkům taveniny, avšak na druhou stranu vykazuje nižší zásobu plasticity. Současný trend je nanášení na povrch líce formy nitridační vrstvy, vysokopevnostní nanopovlaky (např. PACVD, PVD) apod. Tyto povlaky zaručí velmi vysokou tvrdost povrchu a otěruvzdornost při zachování houževnatého jádra materiálu.

Co se týče netvarových částí formy, jako např. rámy, stolička, zámkové plochy apod., tyto nejvíce namáhá uzavírací síla stroje. Ve styčných plochách těchto dílů vzniká měrný tlak, a proto je tyto styčné plochy nutné bohatě dimenzovat a materiál volit vzhledem k povoleným hodnotám.

Chemické namáhání formy

Chemické narušování formy je ve slévárenské praxi známo jako nalepování viz obr 13. Dochází k němu v místech s největší rychlostí tekutého kovu a tam kde dochází



k výraznému zvýšení jeho teploty. Nejvíce jsou ohrožena nevhodně umístěná jádra formy. Tomuto jevu se předchází zvýšením tvrdosti líce, povrchovými vrstvami, mazáním a snížením teploty lití, popř. formy.

Princip nalepování je tvorba intermetalických fází a pro ocelové formy pro lití hliníkových slitin mají význam soustavy Fe-Al. Hliník tvoří s ocelovou formou intermediální fáze $FeAl_2$, Fe_2Al_5 a $FeAl_3$. Jedná se o křehké fáze, které negativně ovlivňují povrch formy i odlitku.

Obr.13 Síťové trhliny a nalepený hliník na licí formě

Tomuto jevu napomáhá křemík obsažený v siluminech. Proces nalepování je tím rychlejší, čím je licí teplota vyšší díky urychlené difúzi.

Pro výrobu forem se ve ŠKODA AUTO a.s. využívá několik druhů materiálu dle jejich aplikace pro konkrétní díly. Příklad jejich použití je uvedeno v tab. 1.

Tab.1 Materiály pro výrobu tlakové licí formy[1]

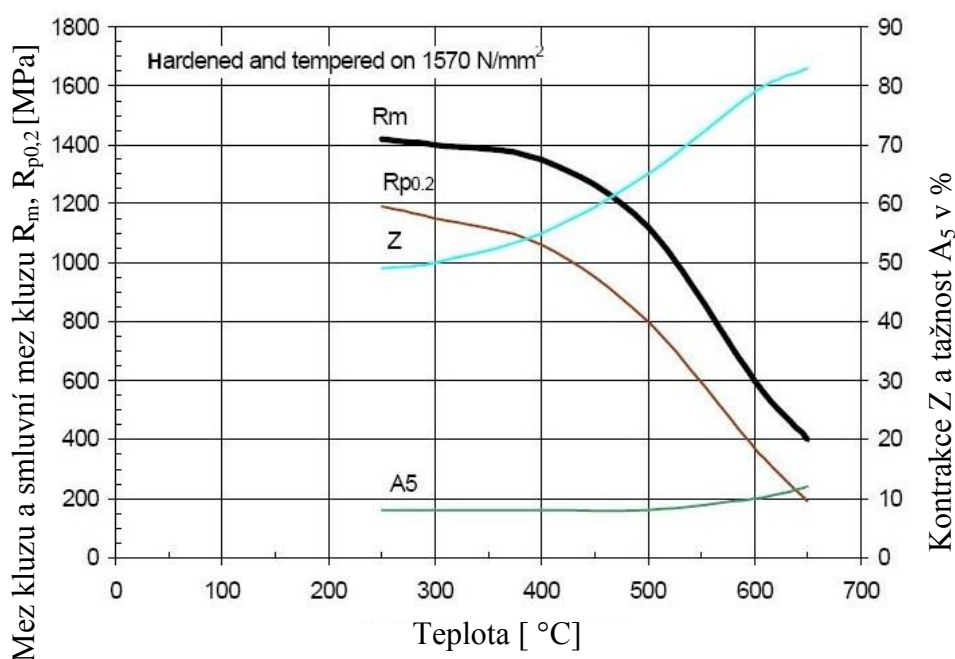
DIN	ČSN	Označení	Tepelné zpracování	Díl
1.2343	19552	X38CrMoV5-1	1375±50MPa	Pevná a pohyblivá vložka
				Karter
				Jádra
				Tvarové vložky
				Sondy chlazení
				Razník a vložka squeeze
				Šoupata, Deska vtoku
Zámek pevný a pohyblivý (za šoupata)				
1.8159	15260	51CrV4	900+150 MPa	Rámy formy pro bloky
1.2311 1.2312	19520	53CrMo8	900+150 MPa	Stolička, Podložná deska
				Vedení šoupat
				Zámkové vložky vyplňovací
1.7131	14220	16MnCr5	Cementovat do hl. 0,6	Lícovací kolík a líc. destičky
	16220	15NiCr6	Kalit 57-60 HRC	Pera šoupat
				Středící čep
1.0570	11523	St 52-3	-----	Chlazení komory
				Rozvodné kostky
				Desky, Příruby tahače

Jak je z tab.1 patrné, pro nejvíce namáhané tvarové části formy je použit materiál 1.2343, značení X38CrMoV5-1 o kterém je dále blíže pojednáno. Jedná se o nástrojovou chromovou ocel pro práci za vysokých teplot. Vyznačuje se dobrou kombinací pevnosti, tvrdosti a odolnosti proti opotřebení. Je odolný proti měknutí a praskání.

Aplikace tohoto materiálu je pro vysoce namáhané díly. Odolává změkčení do teplot 537°C. Hlavní použití je pro nástroje pro kování za tepla, tlakové licí formy, razníky, nože apod. Chemické složení je uvedeno v tab. 2, ovlivnění mechanických vlastností teplotou znázorňuje graf na obr. 14.

Tab.2 Chemické složení materiálu 1.2343- uvedené hodnoty v hmotnostních %[6]

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	Ostatní
0,37	1,0	0,38	5,15	1,3	-	0,4	-	-



Obr.14 Závislost mechanických veličin na teplotě materiálu 1.2343 [6]

Jak bylo již uvedeno, pro zvýšení životnosti formy a snížení opotřebení formy při rozběhu po nasazení na stroj, se dnes již standardně využívá povrchových nanopovlaků nanášených technologií PVD, či PACVD. Hlavní výhody těchto vrstev spočívají ve zvýšení životnosti součásti, snížení koeficientu tření, zlepšení tribologických vlastností, snížení spotřeby mazadel a separátorů, zvýšení odolnosti proti tepelné únavě, vytvoření bariéry mezi hliníkovou slitinou a kovovou formou (chemické působení taveniny) a to vše, aniž by došlo ke změnám v mikrostruktúře a rozměrech součásti. Současní výrobci povlaků nabízejí celou řadu typů pro konkrétní aplikace. Pro představu např. nanokompozitní povlak AlWin od výrobce SHM Šumperk, Alcrona od Oerlikon Balzers, NANOCOMP od VÚHŽ a mnoho dalších. Na obr.15 je uvedena aktuální nabídka povlaků firmy VÚHŽ, kde je

přehledně uvedeno, jakých vlastností a rozměrů tyto povlaky běžně dosahují včetně jejich chemického složení, pracovních a povlakovacích teplot.

Povlak	Mikrotvrdost HV 0,025	Tloušťka (μm)	Koeficient tření	Povlakovací teplota (°C)	Pracovní teplota (°C)	Barva	Technologie	Typ
BASICCOMP	2500	1 - 6	0,4	150 - 600	600	zlatá	PVD	TiN
STANDARDCOMP	3000	1 - 4	0,4	do 600	600	bronzová	PVD	TiCN
ALUCOMP	2500 - 3500	1 - 6	0,4	do 600	900	fialová	PVD	AlTiN
SPEEDCOMP	2500 - 3500	1 - 8	0,4	do 600	800	fialová	PVD	TiAlN
PRESSCOMP	1500 - 2500	1 - 10	0,4	150 - 450	700	stříbrošedá	PVD	CrN
ANTI KOROCOMP	1500 - 2500	10 - 30	0,5	150 - 450	700	stříbrošedá	PVD	CrN
MULTICOMP	2500 - 3500	2 - 6	0,4	do 600	800	zlatá	PVD	TiN/TiAlN
DLC COMP	2000 - 4000	1 - 3	0,05 - 0,15	160 - 300	350	černá	PVD/PACVD	a-C:H
DLC SILLCOMP	1500 - 2500	1 - 5	0,02 - 0,1	160 - 300	450	černá	PVD/PACVD	Si-DLC
DLC HARDCOMP	4000 - 7000	1 - 3	0,05 - 0,15	80 - 200	300	černá	PVD	ta-C
HLF COMP	2300	1 - 5	0,2	500	350	tmavě šedá	PVD	DLC
MAXCOMP	2300	1 - 5	0,2	150 - 300	350	tmavě šedá	PVD	W-C:H
HOTCOMP	3500	1 - 6	0,5	do 600	1500	šedá	PVD	TiSiN
UNICOMP	3000	1 - 6	0,35	do 600	1100	šedá	PVD	AlCrN
ZIRCOMP	1800	1 - 4	0,5	500	550	zlatobílá	PVD	ZrN

Obr.15 Přehled vlastností, chem. složení a pracovních teplot povlaků VÚHŽ [7]

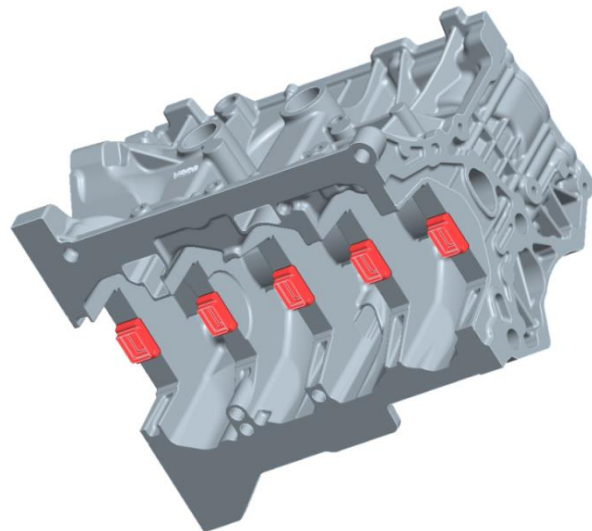
2.5 Speciální metody používané ve ŠKODA AUTO a.s.

Tlakové lití s vakuovanou formou

Princip této metody spočívá v odsávání vzduchu z dutiny formy před a během zalisování taveniny. Při tlakovém lití je nutné z dutiny odvést během velmi krátké doby velké množství plynů. Standardní odvzdušnění formy bývá dimenzováno s relativně malými průřezy a proto vzduch, který zůstane uvězněný v tavenině, vytváří vady v odlitku v podobě porezity. Technologie vakuování nevyžaduje speciální úpravy parametrů licího procesu ani velký zásah do konstrukce formy, či stroje. Stroj je dovybaven vakuovou pumpou, řešenou především jako rotační vývěva. Co se konstrukčního řešení formy týče, ta musí být vybavena vakuovacím ventilem, nebo vlnovcem. Je nutné dodržovat zásadu, že odvzdušňovací kanály pro tyto prvky se umísťují do míst, která jsou vyplňována taveninou jako poslední. Při použití vlnovců dochází k zamrznutí taveniny průchodem chlazeného vlnovce tvořící dutinu ve tvaru vlnek o tloušťce 0,4-0,7mm. Start vakuování je závislý na poloze plnicího pístu přímo signálem z licího stroje, nebo pomocí snímačů na pístnici plnicího pístu.

Lokální squeeze casting

Podstata technologie lokálního squeeze castingu, neboli lokálního dotlaku, spočívá v dotlačování míst odlitku v okamžiku, kdy je tavenina zalisována a nachází se již v poloztuhlém stavu. Dojde tak k zhutnění těchto míst a k potlačení objemových vad odlitku a poretity. Odlitek následně vykazuje lokální zlepšení mechanických vlastností.

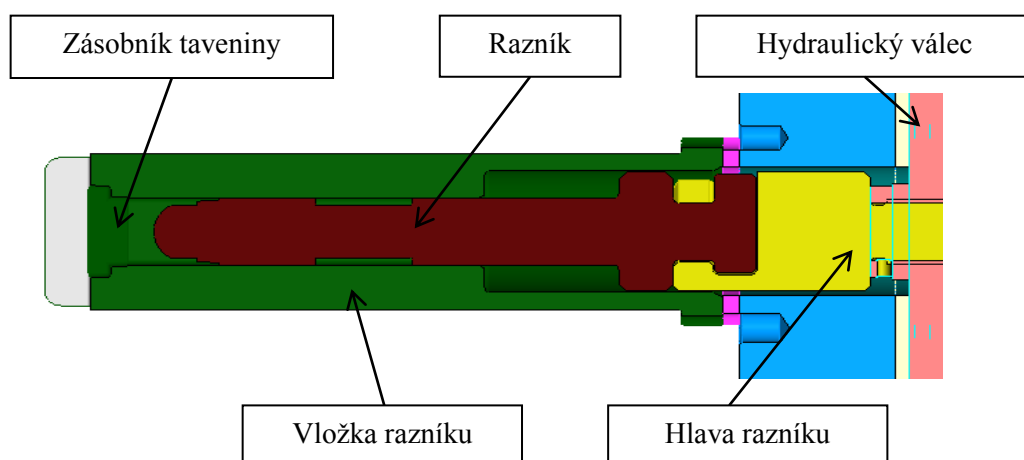


Obr.16 Blok motoru – místa lokálního dotlaku[1]

Ve slévárně ŠKODA AUTO a.s. se tato technologie používá při výrobě

bloků motoru v místech ložisek klikové hřídele, viz obr. 16. Konstrukční řešení je zřejmé z obr. 17. Skládá se z razníků umístěných ve vložce, které bývají nitridované a dutina vložky je povlakována technologií PACVD. Pohyb razníků zajišťují hydraulické válce. Vstupní tlak cca 100MPa je přes násobiče tlaku multiplikován zhruba 5krát. Tyto hydraulické válce mohou být zapojeny až na 3 na sobě nezávislé okruhy a lze u nich tedy nezávisle nastavovat vstupní tlak a zpoždění od zalisování.

Razník a vložka razníku jsou náročné na přesnost výroby, kdy je nutné dodržet předepsané vůle mezi těmito součástmi, pohybující se v řádu setin mm. Také údržba a provoz tohoto zařízení vyžaduje zvýšenou pozornost.



Obr.17 Vložka a razník lokálního dotlaku[1]

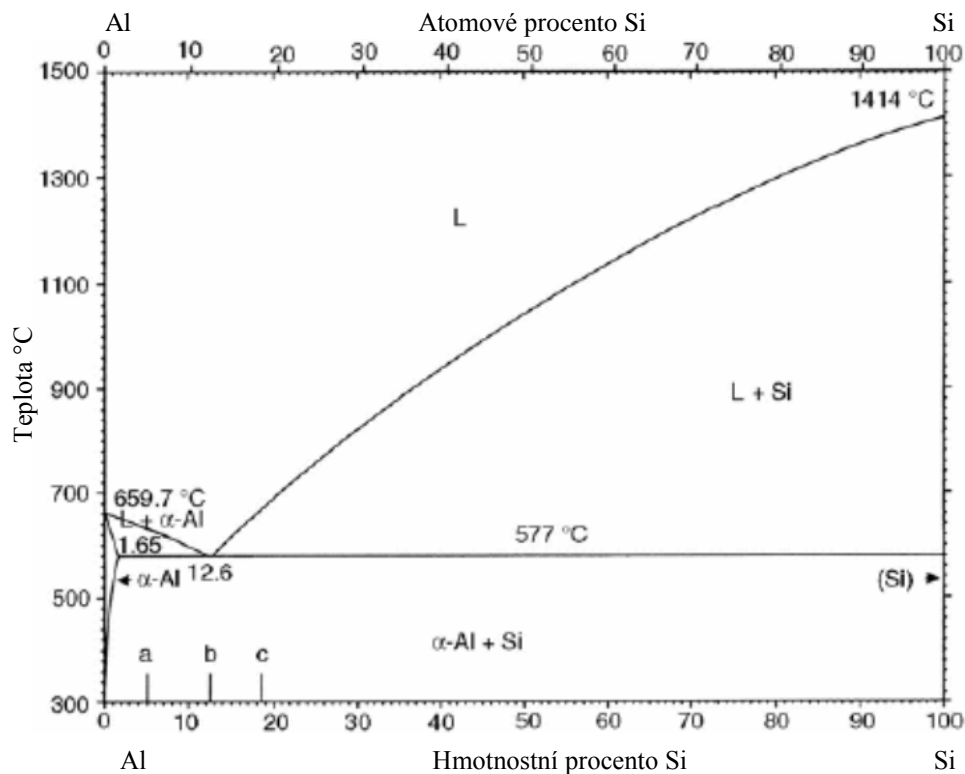
2.6 Materiály pro tlakové lití

Pro tlakové lití se využívá řada materiálů jako např. slitiny cínu, zinku, hořčíku, hliníku apod. Pro výrobu odlitků ve slévárně ŠKODA AUTO a.s. se používá slitiny $AlSi9Cu3(Fe)$. Jedná se o slitinu hliníku a křemíku patřící do třídy siluminů, proto o těchto materiálech bude dále blíže pojednáno.

Čistý hliník se v přírodě vyskytuje zřídka. Je velmi dobře kujný, velmi dobře tepelně a elektricky vodivý. Hustota hliníku je $\rho=2698\text{kg/m}^3$ při 20°C , teplota tání 660°C s modulem pružnosti $E=70\text{GPa}$. Mechanické vlastnosti závisí na obsahu nečistot. Použití čistého hliníku pro slévárenské účely není vhodné a používá se jen výjimečně, např. v elektrotechnice. Čistý hliník lze odlévat pouze pod tlakem a to o čistotě až 99,8% Al. Při této čistotě dosahuje po vyžhání smluvní mez kluzu $R_{p0,2} = 20\text{-}30\text{MPa}$ a tažnost $A_{10}=30\text{-}45\%$.

Co se týče slitiny hliníku s křemíkem, její binární fázový diagram je uveden na obr.18. Siluminy se dělí podle obsahu křemíku:

- Podeutektické (4,5-10% Si)
- Eutektické (10-13% Si)
- Nadeutektické (14-17% Si)



Obr.18 Binární fázový diagram Al-Si [8]

Podeutektické siluminy (a)

Ve své struktuře obsahují dendrity tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$ a eutektikum, které je vyloučeno v mezidendritických prostorech. Podeutektické siluminy mají poněkud nižší zabíhavost, než eutektické, i přesto jsou jejich slévárenské vlastnosti dostatečně dobré a používají se pro výrobu tvarově jednodušších a méně namáhaných součástí. [9]

Eutektické siluminy (b)

Vyznačují se eutektickou strukturou a výbornou zabíhavostí. Z tohoto důvodu se používají pro výrobu tvarově členitých a tenkostěnných odlitků hlavně pro automobilový průmysl. Má dobrou obrobiteľnost a dobré mechanické vlastnosti i za vyšších teplot. Jsou vhodné nejen pro metodu tlakového lití, ale i pro lití do kokil, nebo pro metodu vytavitelného modelu.

Nadeutektické siluminy (c)

Obsahují hrubé krystaly křemíku, jelikož má křemík vysoké krystalizační schopnosti. Tyto slitiny se vyznačují nízkým koeficientem tepelné roztažnosti a dobrou odolností proti abrazi.

Dle uvedeného rozdělení slitina AlSi9Cu3(Fe) patří do skupiny eutektických siluminů s obsahem cca 9% křemíku, 3% mědi a do 1% Fe. Přesné chemické složení v tavicí peci je ovlivněno přidáním vratného materiálu, či tavnou z jiné dávky, musí se však pohybovat v předepsaných mezích. V tab. 4 je uvedeno chemické složení z provedené chemické analýzy této slitiny. Křemík ve slitině zvyšuje zabíhavost, zlepšuje kluzné vlastnosti a otěruvzdornost. Snižuje tepelnou roztažnost siluminu. Měď se do materiálu přidává pro zlepšení mechanických vlastností, zejména za vyšších teplot. Tvoří s hliníkem intermetalickou fází CuAl_2 . Na druhou stranu, měď snižuje slévárenské vlastnosti a snižuje také odolnost proti korozi. Železo je nežádoucí prvek, který se dostává do slitiny při používání druhotných surovin. Přítomnost železa snižuje mechanické vlastnosti, ale omezuje nalepování taveniny na formu. Údaje týkající se mechanických vlastností této slitiny jsou uvedeny v tab. 3.

Tab. 3 Mechanické vlastnosti slitiny AlSi9Cu3(Fe) [5]

Mez pevnosti v tahu Rm	Smluvní mez kluzu Rp0,2	Tažnost A %	Tvrdość dle Brinella
MPa	MPa	%	HBW
240	140	<1	80

Tab. 4 Chemické složení slitiny AlSi9Cu3(Fe)

Naměřené hodnoty[%]		Předepsané hodnoty[%]			
		Norma ČSN EN 1706		Specifikace	
Prvek	Hodnota	min.	max.	min.	max
Si	9,47	8	11	8,5	10
Fe	0,86		1,3		1
Cu	2,32	2	4	2	3,5
Mn	0,25		0,55	0,1	0,4
Mg	0,25	0,05	0,55	0,1	0,5
Cr	0,031		0,15		0,05
Ni	0,054		0,55		0,3
Zn	0,86		1,2		1,2
Pb	0,073		0,35		0,2
Sn	0,014		0,15		0,1
Ti	0,055		0,25		0,15
Bi+Ca+Cd+Li+ B+Be	0,003		0,25		0,15

2.7 Chlazení a temperace tlakové licí formy

2.7.1 Význam regulace teploty formy

Při licím cyklu je nezbytné udržovat teplotu formy na správné hodnotě, tato hodnota se však liší, dle odlévaného materiálu. U tlakového lití hliníku se pohybuje okolo 140-200°C před nanesením separátoru na bázi vody. Jedná se o střední hodnotu, protože teplota formy v jednotlivých místech kolísá.

Pokud není forma dostatečně přehřátá a povrch formy je oproti teplotě odlévaného kovu výrazně nižší, dochází k významným tepelným šokům v materiálu formy, vzniku povrchových trhlin a s tím souvisejícímu zkrácení životnosti. Dalším negativním důsledkem je snížená kvalita odlitku, která se projevuje velkým vnitřním pnutím, potažmo povrchovými trhlinami a rozměrovou nestabilitou odlitku.

Naopak, pokud je teplota formy příliš vysoká, může docházet při odlévání vysokotavitelných slitin k vyžhání materiálu formy a ke snížení jeho tvrdosti. U velkých forem dochází k rozměrové nestabilitě. S tímto souvisí také poruchy pohyblivých částí, jako například zadírání vyhazovačů, pohyblivých jader, razníků squeeze apod. Jak již bylo uvedeno výše, zvýšená teplota formy je příčinou nalepování hliníku při odlévání hliníkových slitin, což znehodnocuje kvalitu povrchu formy i odlitku a činí obtížnější jeho vyjímání z formy.

Pro zachování správné teploty formy je důležité zachování licího rytmu, tzn. shled a pracovní čas jednotlivých fází licího cyklu. V případě narušení licího rytmu dochází k nerovnoměrnému přivádění, nebo odvádění tepla, což přímo ovlivňuje životnost formy, licího stroje, kvalitu odlitku a produktivitu.

2.7.2 Nástřik separačního prostředku

Při nanesení mazadla na povrch formy dochází k odpařování zplodin, díky kterému má tento nástřik na kvalitu odlitku vždy zhoršující vliv. Přesto však jeho význam je důležitý a to proto, že:

- vrstva mazadla chrání lici formy před napadáním tekutým kovem
- přimazává pohyblivé části formy
- vytváří izolační vrstvu, která snižuje tepelné rázy při lití

V současné době se používá jako mazadla směs parafinů, olejů a vody, kde poměrný obsah vody bývá cca 1:60. Z tohoto důvodu působí nástřik separátoru jako významný odběr tepla z formy, kdy může odvádět až 15% z celkové přivedené tepelné energie. Tento koncept se využívá i ve slévárně ŠKODA AUTO a.s.

Aby se snížil negativní vliv mazání na kvalitu odlitku, s výhodou se dá požit tzv. mikropostřik, který obsahuje minimální množství vody. Díky tomuto nízkému obsahu vody však nedisponuje tak intenzivním chladícím účinkem a tuto neodvedenou tepelnou energii je nutné odvést z formy chlazením podpovrchovým, které musí být o to bohatěji dimenzováno. Nanášení mazadla je prováděno přesně pomocí robota se speciální technologickou hlavicí, tzv. postřikovací hlavou. Po postřiku se využívá ofouknutí povrchu stlačeným vzduchem, který rovnoměrněji rozptýlí mazadlo po povrchu formy a nanese ho i do hůře přístupných míst. Nanášení postřiku je relativně složitý proces, kterým se dnes zabývá řada specializovaných firem a nabízí širokou škálu postřiků a technologií speciálně navržených pro konkrétní aplikace.

2.7.3 Vnitřní chlazení a temperování formy

Jak bylo uvedeno, drtivá většina tlakových licích forem využívá vnitřní, podpovrchové chlazení. To je standardně realizováno pomocí vrtaných kanálů a dalších vložených elementů, v kterých proudí chladící medium, jenž může být:

- Voda
- Olej
- Vzduch

Dle teploty proudícího media v okruhu může kanál fungovat jako temperace formy, či chlazení. Tato teplota bývá běžně nastavitelná. Obzvláště důležité je před rozběhem sériového provozu naterování formy na pracovní teplotu, jinak dochází ke zkracování její životnosti, popř. může dojít i k poškození vyžadující časově a finančně nákladnou opravu. Počet chladících okruhů, jejich rozmístění a velikost je dimenzováno podle tepelné bilance tak, aby odvod tepla byl co nejintenzivnější a teplotní pole formy bylo co nejrovnoměrnější. Další text je zaměřen na řešení podpovrchového chlazení forem ve ŠKODA AUTO a.s.

Chladící medium

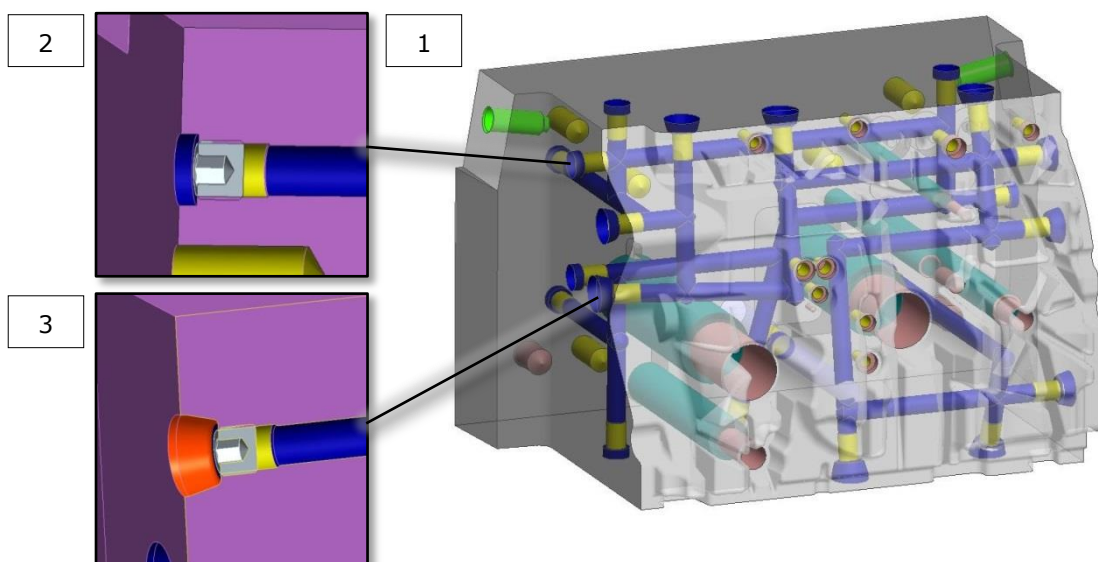
Jako chladící medium se v současné době používá výhradně voda. Do nedávna se používalo také temperování formy olejem, od kterého se však upustilo. Pro rovnoměrnější teplotní pole formy se reguluje vstupní teplota a tlak media:

- Pro šoupata, vložky karter a rámy
 - Medium: demi voda
 - Teplota media: 80 – 160°C
 - Tlak media: 0,5 - 0,6MPa
- Pro jádra, vtokovou desku a některé méně rozměrné vložky
 - Medium: demi voda
 - Teplota media: 20 - 30°C
 - Tlak media: 0,3MPa

Velmi důležité je sledovat správné parametry chladící vody, jako jsou například pH, tvrdost, bakterie, chloridy apod. Hodnoty lišící se od hodnot optimálních mohou mít za následek např. korozi kanálů, zanášení chladících okruhů vápenatými usazeninami, které snižují jejich efektivitu až o 70%, neprůchodnost kanálů, či trubiček apod.

Konstrukční řešení

Soustava chladících okruhů v částech formy tvořící tvar odlitku je řešena vrtanými kanály o průměru 14mm. Tyto kanály se kvůli efektivitě chlazení umísťují co nejbližše tvaru odlitku, avšak je nutné dodržovat minimální odstup, který se pohybuje okolo 1,5*průměr chladícího kanálu. Dochází zde k velkému pnutí, vzniklé teplotním rozdílem roztaveného kovu a proudícího chladícího media. Hrozí riziko vzniku trhlinek, které mohou dosáhnout až k povrchu formy a medium jimi začne prolínat do odlitku. To způsobí produkci zmetkovitých odílů a nutnost demontáže formy z licího stroje. Uzavírání a utěsnění kanálů po vrtání je realizováno šroubovanou zátkou těsněnou páskou z PTFE. Pokud jsou tato místa v plochách, které musí být těsnící a kde hrozí přímý styk s hliníkovou slitinou, jsou tyto zátky zavařeny. Tato koncepční řešení jsou znázorněna na obr. 19.



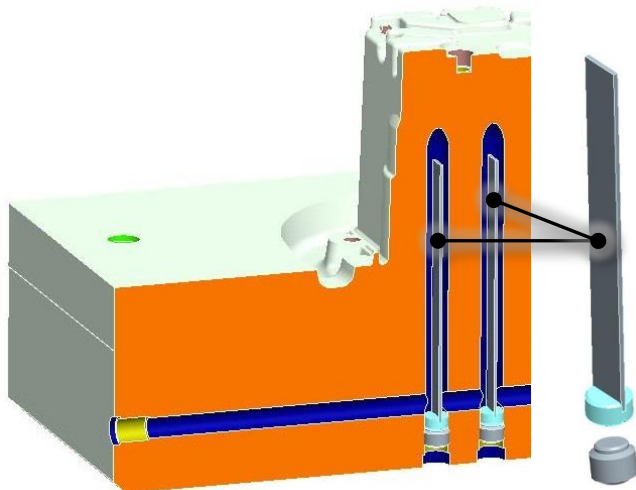
Obr. 19 Vnitřní chlazení tvarové části formy

1-šoupátko s chladícími kanály; 2-zakončení chl.kanálu zátkou těsněnou PTFE páskou; 3-zakončení chladícího kanálu se zátkou a zahloubením pro zavaření

Chladící kanály mají omezení ve své dostupnosti a pro partie odlitku s hlubokými tvary není příliš vhodné, protože jimi do těchto míst lze jen obtížně dosáhnout. Pro takovéto případy se využívá systém navrtaných sond a chladící medium je vedeno k nejteplejší části odlitku pomocí vložených elementů. Ty jsou konstrukčně nejčastěji řešeny jako:

- Přepážka (obr. 20)

Přepážka se využívá pro přiblížení se s chlazením k dutině formy při použití vrtaných kanálů a mnohdy se dodělávají do konstrukce dodatečně, kdy se navrtají do stávajícího chlazení sondy o průměru 16-18mm a okruh se přepaží vhodnou přepážkou.



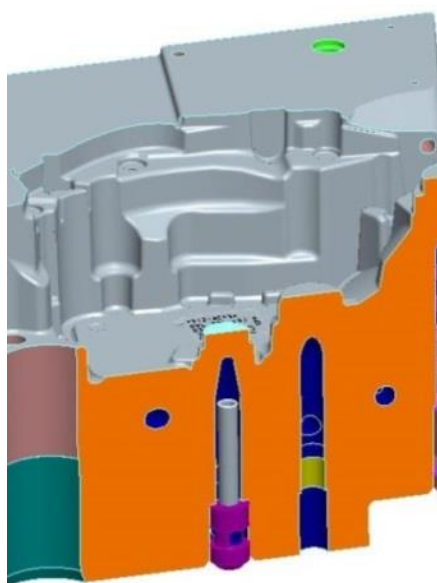
Obr. 20 Chlazení sondami s přepážkou

- Trubička (obr. 21)

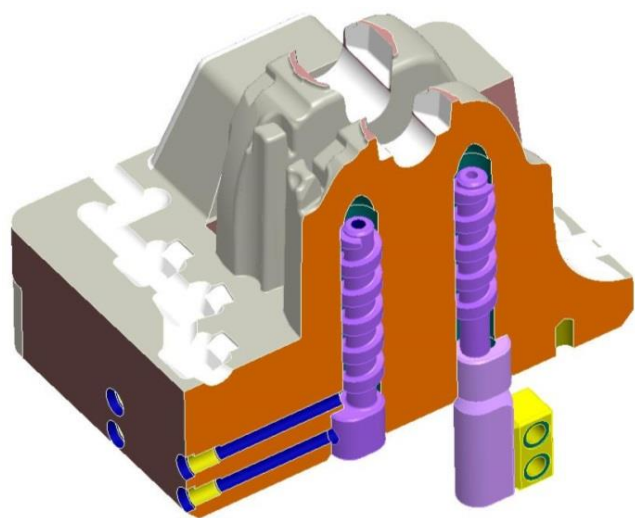
K dutině formy je přivedeno chladicí medium pomocí vložené trubičky a zpět je odvedeno navrtanou sondou. Nejintenzivnější odvod tepla je tudíž ve špičce sondy, kde je největší teplotní spád. Tento koncept se dá využívat i pro relativně malé rozměry od světlosti trubičky DN 3mm a průměru sondy 6mm.

- Spirála (obr. 22)

Spirálová sonda funguje na podobném principu jako sonda s trubičkou. Díky vložené spirále je však vhodnější do masivnějších tvarů, které jsou ale zachlazeny po jejich obvodu rovnoměrněji.



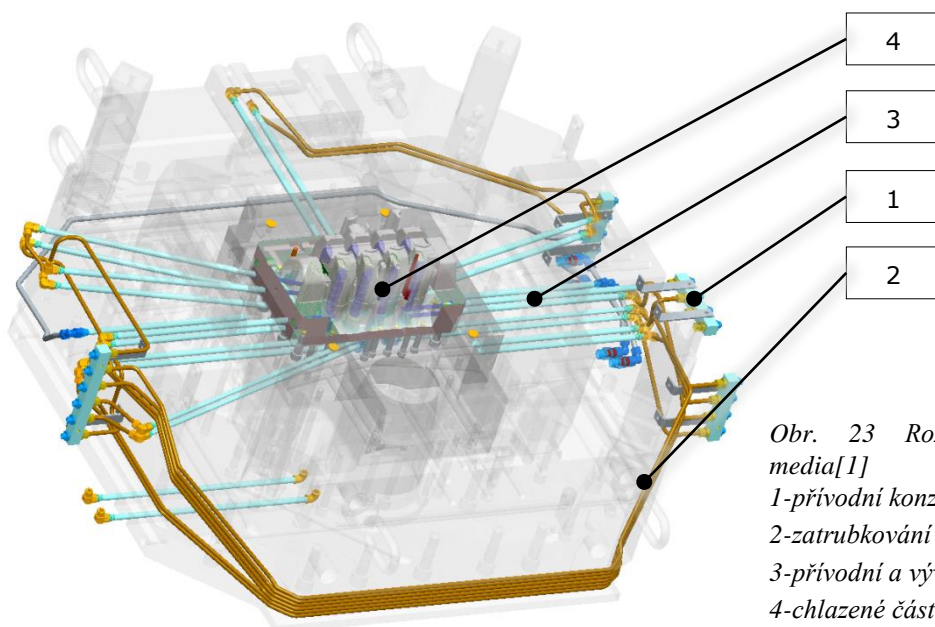
Obr. 21 Chlazení sondami s trubičkou



Obr. 22 Chlazení sondami se spirálou

Rozvody chladícího media

Přívodní konzole tvoří rozhraní mezi formou a teplotním regulačním zařízením. Rozvedení chladícího media z přívodních konzolí je realizováno zatrubkováním pomocí nerezových ohýbaných trubek okolo rámu formy. Přívod a vývod media pro tvarové chlazené vložky usazené uvnitř formy je pomocí šroubovaných trubek, tzv. násadců. Na pohyblivá jádra formy, popř. šoupátka se chladicí medium přivádí hadicemi z PTFE s ochranným opletem. Většina spojů těchto hydraulických rozvodů je koncipována šroubením s převlečnými maticemi a zářezným prstýnkem (např. koncept firmy Walterscheid). Koncepte těchto rozvodů je znázorněna na obr. 23.



Obr. 23 Rozvody chladícího media[1]
 1-přívodní konzole;
 2-zatrubkování
 3-přívodní a vývodní násadce
 4-chlazené části formy

2.7.4 Problematika chlazení jader formy

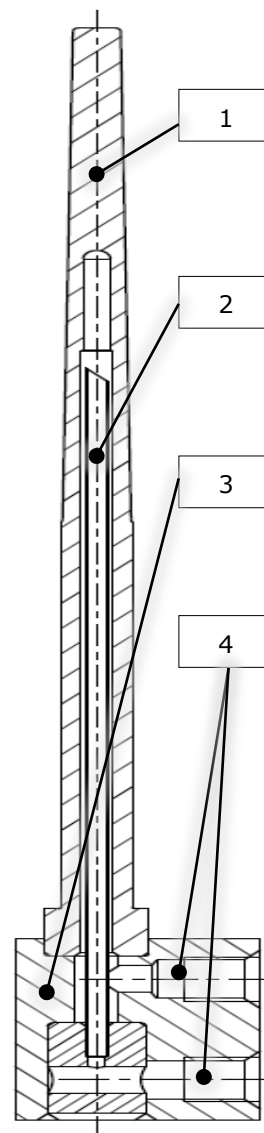
Odlitek bloku motoru obsahuje řadu předlitých otvorů, které jsou ve slévárenské formě tvořeny buď šroubovanými, nebo vkládanými jádry, které jsou jedny z nejvíce exponovaných částí formy. Co se týče mechanického namáhání, je to:

- tlakové napětí při zalisování kovu a dotlaku
- působení smršťujícího se odlitku na tvar jádra a tím vyvozené ohybové napětí
- tahové osově napětí při vyjímání odlitku z formy

Jádra jsou také velmi náchylná na abrazivní a erozivní účinky proudící taveniny a při jejich nedostatečném chlazení také velmi trpí na nalepování hliníku na jejich povrch.

Jedná se o štíhlé a dlouhé tvary, které se vyznačují relativně velkou stykovou plochou s roztaveným kovem a malým objemem hmoty, díky čemuž dochází k jejich značnému přehřívání. Toto vše má velmi nepříznivý vliv na životnost jádra a kvalitu odlitku.

V některých případech je zchlazení jádra postříkem relativně obtížné, jelikož tryska postřikovací hlavy nemůže díky složitosti tvaru odlitku dosáhnout na celou jejich délku a postřík ulpí pouze na vrcholu jádra. Z tohoto důvodu je důležité jádra kvalitně zchlazení vnitřním chlazením. Konstrukčně je chlazení jader řešeno pomocí navrtného chladicího otvoru a vložené trubičky – trysky, v kterých proudí chladicí voda. Trubička je připájena do rozvodného elementu, kde je přívodní a vývodní otvor pro chladicí médium a tento element je přivařen vodotěsně k jádru. Rozměr chladicího otvoru je závislý na průměru jádra, avšak menší průměr vrtání než 6mm a světlosti trubičky DN 3 mm se nepoužívá z důvodu soustřednosti vyvrtání chladicího otvoru do jádra a možného rychlého zanesení malého průměru trubičky. Příklad konstrukčního řešení je uveden na obr. 24. Přesnost a kvalita chladicího otvoru má značný vliv na životnost jádra. Mezi důležité vlivy patří souosost s tvarem jádra, povrchová drsnost otvoru a tvarové vruby.



Obr. 24 Chlazení jádra
1-jádro
2-trubička
3-rozvodný element
4-přívod a vývod media

2.7.5 Termoregulační zařízení

Ve slévárně ŠKODA AUTO a.s. se využívají dva typy termoregulačních zařízení od výrobců Thermobiehl a Tribon.

Thermobiehl HK 3002 W

Jedná se o mobilní dvouokruhové zařízení poháněné zubovým čerpadlem, pracující s vodním chladicím médiem. Může fungovat v režimu chlazení, či temperace, kdy přepínání mezi těmito režimy je automatické pro udržení nastavené teploty. Topný výkon zařízení je 24kW pro každý okruh a aktivní topná plocha se pohybuje okolo

1,32m². Chladicí výkon je 50 kW na každý okruh. Maximální teplota media v závislosti na tlaku v okruhu, může dosahovat až 180°C při 0,6 MPa.

Tribon typ 2408-03-N

Tribon slouží pouze pro chlazení formy. Jako medium se používá demineralizovaná voda, která je centrálně rozváděna do těchto chladicích zařízení u licích strojů po slévárně. Zařízení firmy Tribon disponuje 18 chladicími okruhy a umožňuje přepínat tři typy regulace.

PI regulace umožňuje měřit skutečné teploty okruhů 1-18, přepočítává regulační odchylku algoritmem PI a provádí regulační zásahy spojitou šířkově pulsní modulací PWM. *Regulace třístavová*, kdy přístroj měří skutečné teploty okruhů a provádí regulační zásahy třemi stavy – zapnuto / pulsace / vypnuto. *Vlečným řízením* přístroj měří teploty kanálů pouze informativně a pro případné vyhodnocení alarmu. Řízení čeká na signál od stroje, aby započalo chladit. [12]

Ve ŠKODA AUTO a.s. se využívá pouze regulace vlečným řízením a využívá se zejména pro chlazení jader a vložek. Přístroj také disponuje kontrolou úniku chladicího media. Jednak jako okamžitou hodnotu úniku v kg/h a také jako rozdíl průtoku za poslední hodinu v kg. Překročení některé z mezí způsobí sepnutí alarmu.

2.7.6 Tepelné procesy mezi formou a odlitkem

Proto, aby odlitek dostal svůj tvar, požadovanou kvalitu a mechanické vlastnosti, je nutné, aby povrch formy odvedl tepelnou energii z materiálu odlitku. Sdílení tepla mezi odlitkem a povrchem formy může nastat třemi způsoby:

- Vedením (kondukcí)

Přenos tepla vedením je založen na kinetické energii molekul, které si navzájem předávají svoji energii. Ta se přenáší z míst o vyšší teplotě do míst o nižší teplotě. Tento způsob přenosu energie může nastat v pevných, kapalných i plynných látkách. Matematicky lze vyjádřit dle vztahu (1).

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot S \cdot \frac{dt}{dx} \quad (1)$$

\dot{Q} - tepelný tok [W]

λ - tepelná vodivost [$Wm^{-1}K^{-1}$]

$\frac{dt}{dx}$ - teplotní gradient [$^{\circ}C$]

S - plocha tepelného toku [m^2]

- Prouděním (konvekci)

Tento způsob přenosu tepla probíhá pouze v kapalinách nebo plynech a může být buď samovolné, nebo nucené. Samovolné proudění je vyvoláno změnou hustoty látky v závislosti na její teplotě. Tento přestup tepla je popsán vztahem (2).

$$\dot{Q} = \alpha_p \cdot S(t_s - t_{ch}) \quad (2)$$

α_p - součinitel přestupu tepla [$Wm^{-2}K^{-1}$]

S - plocha proudící kapaliny [m^2]

t_s - teplota ochlazované stěny [$^{\circ}C$]

t_{ch} - teplota chladícího media [$^{\circ}C$]

- Sáláním (radiací)

V tomto případě není nutné látkové prostředí. K přenosu energie dochází prostřednictvím elektromagnetického záření, vzniklé přeměnou tepelné energie. Přestup tepla sáláním popisuje Stefan-Boltzmannův zákon (3).

$$\dot{Q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \left(\frac{t_{sál}}{100} \right)^4 \quad (3)$$

ε - emisivita tělesa [-]

σ - součinitel sálání dokonale černého tělesa [$Wm^{-2}K^{-4}$]

S - plocha sálajícího povrchu [m^2]

$t_{sál}$ - teplota sálajícího povrchu [$^{\circ}C$]

Jedná se o složité děje, jejichž intenzita je stanovena součinitelem přestupu tepla. V procesu tlakového lití se nejčastěji uplatňuje současné sdílení tepla kondukcí a konvekci, která se souhrnně nazývá sdílení dotykem, vyznačující se součinitelem přestupu tepla dotykem α_D . Tento děj popisuje Newtonův zákon, vztah (4) uvádí celkové předané teplo z odlitku do formy.

$$Q = \alpha_D(t_{pO} - t_{pF}) \cdot S \cdot t \quad (4)$$

Q – celkové množství tepla [Ws]

α_D – součinitel přestupu tepla dotykem [$Wm^{-2}K^{-1}$]

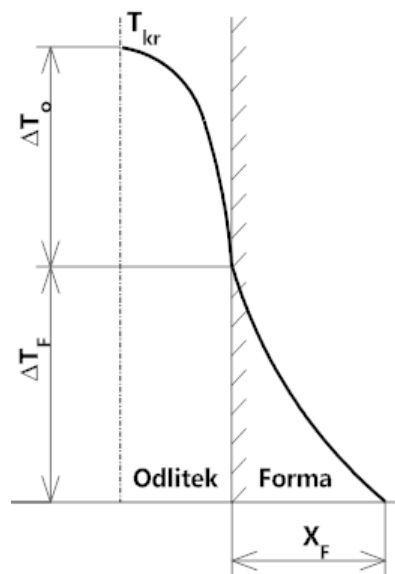
t_{pO} – teplota povrchu odlitku [$^{\circ}C$]

t_{pF} – teplota povrchu formy [$^{\circ}C$]

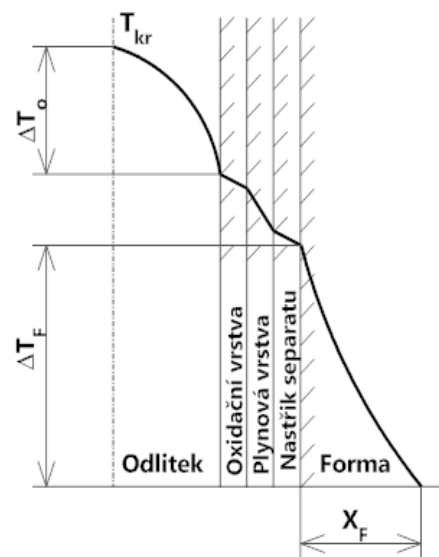
S – styčná plocha [m^2]

t – čas [s]

V některých partiích odlitku může dojít vlivem smrštění odlitku a změnou rozměrů ohřívajícího se materiálu formy ke ztrátě kontaktu formy a odlitku a vzniku mezery. Tato mezera se skládá z vrstvy oxidické, plynové a vrstvy separátoru a vytváří přechodový tepelný odpor TPO. Sdílení tepla probíhá ve vrstvě oxidické a vrstvě separátoru vedením a ve vrstvě plynové sáláním. Plynová vrstva tvoří viditelnou mezeru mezi odlitkem a formou a nabývá hodnot řádově v desetinách milimetru. Na obr.25 a obr.26 je znázorněna intenzita ochlazování při těsném styku odlitku a formy a styku odlitek – mezera – forma.



Obr. 25 intenzita ochlazování při těsném styku odlitku a formy [18]



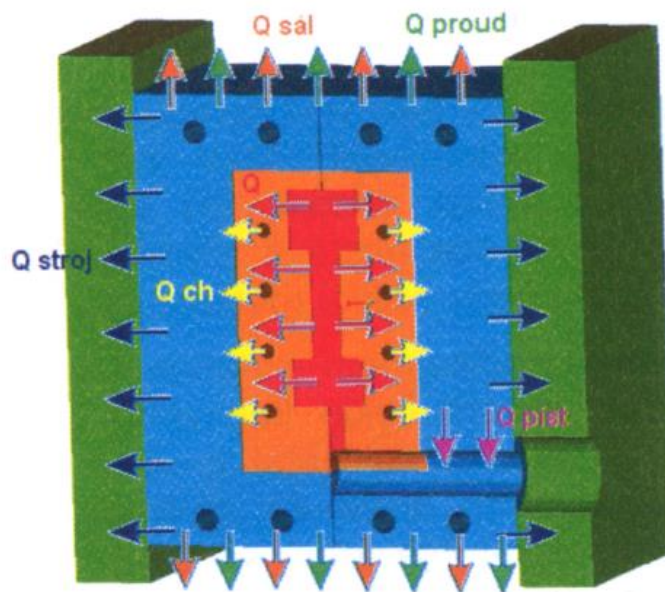
Obr. 26 intenzita ochlazování při styku odlitek – mezera – forma [18]

X_F – charakteristický rozměr formy; ΔT_F – rozdíl teplot ve formě; ΔT_O – rozdíl teplot v odlitku; T_{kr} – teplota krystalizace taveniny

2.7.7 Zjednodušený výpočet tepelné bilance

Pro analytický výpočet tepelné bilance tlakové licí formy je nezbytné přistoupit k jistým zjednodušením:

- forma – odlitek, při výpočtu je uvažováno jako uzavřená soustava
- teplota formy a tepelné toky jsou konstantní hodnoty
- teplota povrchu formy během licího cyklu je konstantní
- teplotonosné medium má stálou teplotu, zanedbává se kolísání teploty media při licím cyklu
- teplota povrchu formy je uvažována jako střední hodnota teploty povrchu formy po postřiku



Obr. 27 Schema formy s vyznačením tepelné bilance[15]

Q – celkové teplo přivedené; Q_{ch} – teplo odvedené chlazením; Q_{stroj} – teplo odvedené frémami; $Q_{sál}$ – teplo vyzářené; Q_{proud} – teplo odvedené prouděním; Q_{pist} – teplo odvedené pístem

chybí znázorněno teplo odvedené postříkem a zbytkové teplo odlitku, které na rozdíl od tepla odvedeného plnicím pístem nelze zanedbat. V tab. 5 je uveden poměr jednotlivých dílčích hodnot tepelné energie. Tento postup řešení tepelné bilance je jen přibližný a nedává nám představu o rozložení teplotního pole. V praxi se v současnosti tento postup příliš nepoužívá. V dnešní době, kdy je dostupná dostatečně výkonná výpočetní technika, se pro výpočet teplotních polí používá simulačních softwarů, které dokáží řešit licí proces komplexně.

Tab.5 Přivedená a odvedená tepelná energie ze soustavy forma - odlitek

Teplo přivedené	Tavenina	87%	100%
	Přeměna kinetické energie na tepelnou	5%	
	Temperace formy	8%	
Teplo odvedené	Zbytkové teplo odlitku	45%	100%
	Vnitřní chlazení	20%	
	Postřík	15%	
	Kontakt s frémami stroje	15%	
	Sálání	4%	
	Proudění	1%	

Na obr. 27 je znázorněna schematicky tepelná bilance tlakové licí formy. Tato ilustrace koresponduje s postupem zjednodušeného analytického výpočtu, který v podstatě řeší objem přivedené tepelné energie odlitkem a temperací formy a objem tepelné energie z této uzavřené soustavy odvedené nejen chlazením, ale i např. sáláním, či kontaktem formy s frémami licího stroje. V ilustraci

2.8 Numerické analýzy ve slévárenství

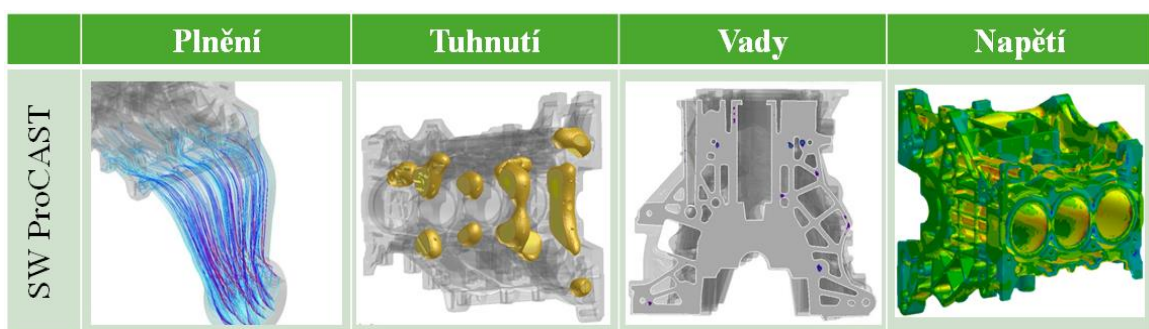
Během lití, tuhnutí a chladnutí odlitku dochází ve slévárenské formě k řadě složitých dějů, jenž se dají jen těžko popsat analytickými metodami. Postupovat při zavádění nové technologie metodou pokus - omyl je velmi časově a finančně náročné. Současný trend je využití numerických simulací, které za posledních deset let zaznamenaly značný rozmach, a dá se říci, že v podstatě každá slévárna, popř. nářaďovna, která chce být efektivní a konkurenceschopná, numerické simulace využívá. Dnes nám tyto programy umožňují nejen predikovat technologické vady v odlitku, teplotní pole apod., ale umožňují určit i napěťové stavy nástroje a odlitku, výslednou strukturu odlitku a mnoho dalšího.

V nářaďovně ŠKODA AUTO a.s. je nasazen software ProCAST od americké firmy UES. Výhoda tohoto výpočtového programu spočívá ve:

- snižování nákladů ve fázi vývoje formy
- úspore nákladů při zavádění konstrukčních změn na sériovém nástroji
- snižování zmetkovitosti odlitků
- rozvíjení know-how personálu v oblasti tlakového lití

Jedná se o modulární software, jehož jednotlivé moduly (viz. obr.28) umožňují sledovat:

- dynamiku proudění taveniny
- tuhnutí odlitku ve formě
- napěťové stavy odlitku a formy
- teplotní pole formy, funkci chlazení a postřiku
- riziková místa výskytu vad v odlitku
- určení materiálových charakteristik – inverzní modul



Obr. 28 - příklady modulů softwaru ProCAST[1]

Tento program pracuje s metodou konečných prvků, což znamená, že kontinuum, na kterém se analýza provádí, se rozdělí sítí konečných prvků. Tomuto kroku se říká diskretizace, nebo česky zasíťování. Na každém prvku, uzlovém bodu sítě, se posléze řeší zjišťovaná funkce. Zpřesnění výpočtu se dá dodatečně dosáhnout zjemněním sítě a tím souvisejícím navýšením uzlových bodů, což na druhou stranu vede k prodlužování doby výpočtu.

Stejně jako každý simulační program se proces výpočtu dělí do třech fází. První je fáze *preprocessingu*, což obnáší tvorbu nebo importování geometrie, kterou je nutné pro akceptovatelný výpočtový čas a hardwarovou náročnost zjednodušit. Pro potřeby výpočtu se používají pouze tvarové části formy a plnicí komora. V těchto datech se potlačí všechny netechnologické prvky. Takto připravenou geometrii je nutné zasíťovat a zadat okrajové podmínky, všechny materiálové vlastnosti a konstanty, parametry stroje a procesu. Velmi důležité pro řešení přestupů tepla je samozřejmě správné nastavení kontaktů, kde ProCast umožňuje jak konstantní, tak časově proměnlivé definice parametrů. Preprocessing je velmi důležitá fáze výpočtu, na které závisí výpočtová náročnost a konečná přesnost výsledků. Vždy je nutné hledat kompromis mezi těmito veličinami. V dalším kroku následuje *processing*, což je v podstatě samotný průběh výpočtu. Rychlost zadaného výpočtu ovlivňuje již pouze hardwarové vybavení. V konečné fázi, *postprocessingu*, pak člověk vyhodnocuje zobrazené, nejčastěji grafické, výsledky. Zde záleží velmi na citu a zkušenostech výpočtáře, aby správně vyhodnotil, zda výsledky nebo jejich charakter odpovídá reálnému stavu. Často je nutné výsledky porovnat s praktickými výsledky např. z termokamery, či CT snímků odlitku, pro korekci zadaných vstupních podmínek a takovouto optimalizací přiblížit výsledky ze simulačního softwaru reálnému stavu.

3. PRAKTICKÁ ČÁST PRÁCE

Cílem praktické části této práce je ověřit vhodnost použití technologie chlazení jader Jet-Cooling ve formě pro odlitek bloku motoru. Ve slévárně ŠKODA AUTO a.s. se jedná o zcela novou technologii a tento experiment slouží jako první seznámení s jejími možnostmi a úskalími.

V současnosti se slévárna ŠKODA AUTO a.s. potýká s omezenou životností forem na jedno nasazení na licí stroj z důvodu destrukce jádra, nebo netěsnost chlazeného jádra, čímž dochází k produkci zmetkovitých odlitků. Toto je zejména zapříčiněno nízkou efektivitou jejich chlazení. Motivace pro provedení této zkoušky je tedy:

- nízká životnost jader
- vady v odlitku

Přínosy, které se od nasazení technologie Jet-Cooling očekávají:

- zvýšení produktivity
- zlepšení kvality odlitku
- zvýšení životnosti formy na jedno nasazení
- zvýšení životnosti jader

Záměrem experimentu je posouzení technologie z hlediska těchto očekávání, formulovat dílčí výsledky a porovnat je s výsledky konvenčního způsobu chlazení jader. V úvodu praktické části se nalézá stručné seznámení s technologií Jet-Cooling a princip tohoto chlazení. Další část zaujímá popis postupu samotného experimentu, který je možné chronologicky shrnout do těchto kroků:

- Vytipování vhodného odlitku a jader pro experiment
- Volba chladícího agregátu
- Koncepce jader a chladících elementů
- Návrh zapojení rozvodů media
- Návrh zapojení jader do společných chladících okruhů
- Optimalizace zapojení chladících okruhů z hlediska teplotních polí jader

V průběhu praktické části se nalézá seznámení s využitými metodami měření a kontroly a je zde definována i použitá metodika. V závěru praktické části je uvedena formulace dílčích výsledků a jejich diskuse včetně porovnání technologie J-C.

3.1 Technologie chlazení jader Jet–Cooling

Technologie Jet – Cooling je původem Japonský systém vysokotlakého chlazení tvarových částí tlakové licí formy, který pro firmu ŠKODA AUTO a.s. poskytla francouzská společnost Lethiguel, prostřednictvím českého zástupce firmy Šebesta s.r.o. a při návrhu koncepce pro tento pilotní projekt bylo s těmito firmami spolupracováno.

Primárně se technologie Jet-Cooling využívá pro efektivní zachlazení rozměrově malých a tudíž pro konvenční způsob chlazení nedostupných, tvarů a vkládaných jader. Díky vysokému tlaku chladicího media až 0,2 MPa lze používat malé průřezy chladících kanálů, v podstatě se jedná již o kapiláry o průměru trysek od DN 0,85 mm a lze zachladit jádra od jejich vnějšího průměru 4mm.

Jako chladicí medium se využívá pečlivě upravená pitná voda. Pro tyto účely systém disponuje demineralizačním a deionizačním zařízením. To obsahuje náplň na bázi pryskyřice, přes kterou protéká pitná voda do zařízení Jet-Cooling, kdy je zbavována minerálů.

Tato technologie umožňuje samokontrolu těsnosti okruhu, kdy lze včas detekovat porušené jádro, které by mohlo zapříčinit produkci zmetkovitých odlitků. V takovém případě jednotka Jet-Cooling vyšle signál do licího stroje, který zahlásí alarm. Kontrola se provádí automaticky po každém cyklu stlačeným vzduchem, následně po kompletním vyčištění chladících okruhů od zbytkové vody.

Mezi hlavní *výhody* technologie patří:

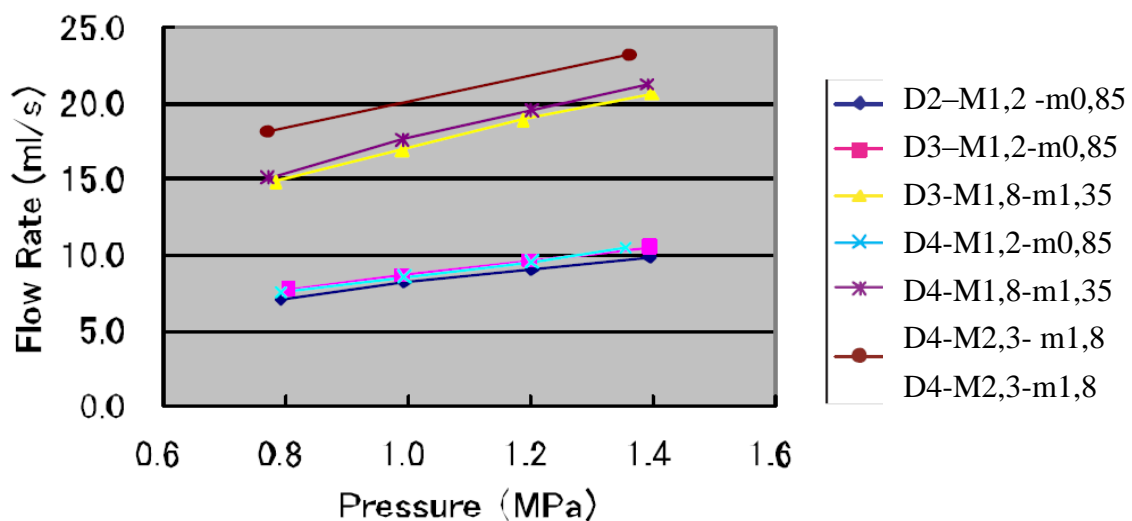
- velmi intenzivní odvod tepelné energie
- možnost zachladit jádra od průměru 4mm, což rapidně zvyšuje dostupnost chlazení
- čištění chladících okruhů od zbytkové vody stlačeným vzduchem po každém cyklu
- kontrola těsnosti chladících okruhů po každém cyklu
- malé rozměry chladících elementů a rozvodů media

Nevýhody této technologie jsou:

- vysoké nároky na přesnost a kvalitu výroby jader
- vyšší vstupní náklady na výrobu tlakové licí formy
- nutnost kvalitně upravené (demineralizované) chladicí vody

3.1.1 Princip chlazení

Děje probíhající uvnitř jádra při chlazení v licím procesu jsou relativně složité a jejich exaktní matematické vyjádření není možné v rozsahu této práce popsat. Záměrem této kapitoly je deklarované procesy uvnitř jádra opřít o teoretickou rovinu pomocí základních termodynamických veličin, avšak reálné procesy probíhající uvnitř jádra během chlazení se dají jen těžko prakticky dokázat. Koncepce jádra je podobná konvenčnímu jádru s vloženou trubičkou, v tomto případě jet-coolerem, viz kapitola 3.2.1. Základní princip spočívá ve vysokém tlaku chladícího media až 0,2 MPa. Ten je nutný pro zaručení dostatečného průtoku jádry i přes použití velmi

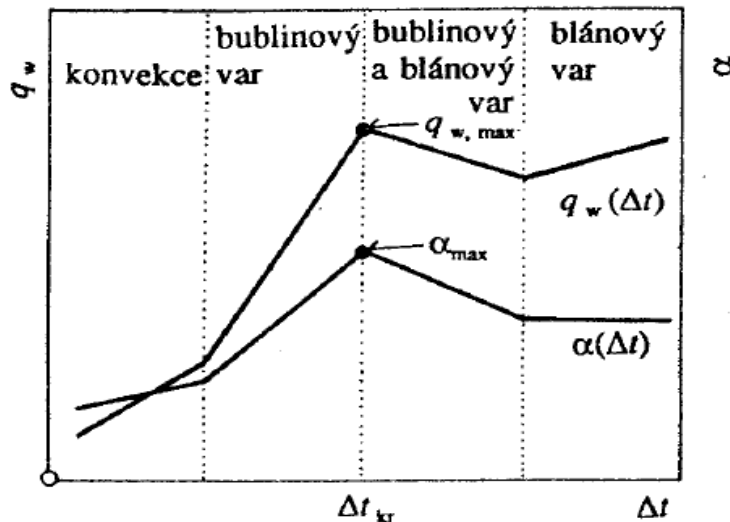


Obr. 29 - průtoky používanými kapilárami [14]

D – vnitřní průměr velké trubky (výstup media); *M* – vnější průměr kapiláry; *m* – vnitřní průměr kapiláry (vstup media) v mm

malých trubiček - kapilár o světlosti od DN 0,85mm. Příklad hodnot průtoků chladícího media jednotlivými kapilárami v závislosti na tlaku je znázorněn na obr. 29. Vysoká intenzita chlazení tohoto systému nesouvisí pouze s tepelným tokem díky nucené konvekci vody v jádru, ale dochází zde také k fázové přeměně vody na páru. Když voda opouští ústí kapiláry, dochází zde ke snížení jejího tlaku na min. 1,2 MPa a tím pádem i ke snížení bodu varu. Při dotyku se stěnou chladícího kanálu ohřátého jádra proběhne var media, který by však neměl dosáhnout varu blánového, ale pouze bublinového. Při tomto varu je intenzita přestupu tepla nejvyšší, viz obr. 30. Na povrchu chladícího kanálu jádra se začnou tvořit bubliny páry, které se odtrhávají a proudí dále do středu kanálu. Tímto se potenciaální laminární proudění u povrchu kanálu mění na turbulentní a efekt chlazení je o to intenzivnější. Proto,

aby se místně nevytvořil parní polštář, který by přestup tepla z jádra do chladícího media zhoršoval, je nutný zmíněný vysoký průtok vody, která nestačí v celém objemu zplynit a odvádí parní bubliny dále z přehřátého jádra, kde se mění opět na vodu.



Obr. 30- závislost součinitele přestupu tepla a intenzity přestupu tepla q_w při varu na rozdíl teplot varného povrchu α vroucí kapaliny Δt ve dvojitých logaritmických souřadnicích [13]

3.1.2 Chladicí cyklus

Chladicí cyklus Jet-Cooling probíhá ve stanovených krocích. V každém uvedeném kroku lze definovat jeho časový interval.

1/ Start cyklu – prodleva

Start cyklu je zahájen signálem od licího stroje v okamžiku začátku pohybu pístu lisovacího ustrojí. Definuje se čas, za jak dlouho od tohoto okamžiku čerpadlo začne vhnět do formy chladící vodu.

2/ Chlazení jader

Definuje se časový interval pro samotné chlazení jader. Jedná se o čas, po který čerpadlo tlačí vodu do chladícího okruhu.

3/ Prodleva před profukováním

4/ Vyfukování chladící vody z okruhů

Lze definovat interval, po který dochází k vyfukování zbytkové vody. Dochází k tomu prostřednictvím stlačeného vzduchu o tlaku 0,6 MPa. Pro správnou činnost systému nesmí zůstat v okruzích žádná zbytková voda.

5/ Prodleva před testem těsnosti

6/ Test těsnosti

Po ukončení každého cyklu dochází k automatickému testu těsnosti. Každý okruh se uzavře a je do něj vháněn vzduch o tlaku 0,6 MPa. Na konci okruhu je umístěn membránový tlakový spínač, jehož hystereze je nastavena na rozdíl tlaku 0,3 MPa. Pokud tlak v okruhu nepoklesne pod tuto hodnotu, je vyhodnocen jako těsný a pokračuje se v produkci. V opačném případě licí stroj obdrží impuls k přerušení licího cyklu a zahlásí alarm.

Chladicí cyklus by nikdy neměl přesahovat dobou cyklu licího a prodlevy mezi jednotlivými kroky musí být nastaveny tak, aby k testu těsnosti docházelo až po vyjmutí odlitku z formy, jinak může docházet ke zkreslení výsledku testu.

3.2 Zkouška chlazení technologie Jet-Cooling

Pro zkoušku tohoto typu chlazení byla zvolena forma pro lití odlitku čtyřválcového bloku motoru EA211 1,2TSi. Tento odlitek je vyroben pomocí technologie vysokotlakého lití s horizontální studenou komorou z hliníkové slitiny AlSi9Cu3, jejíž specifikace je uvedena v teoretické části této práce. Teplota materiálu při lití se pohybuje do 660°C. Odlitek obsahuje zalité vložky spalovacího prostoru z šedé litiny. Licí cyklus trvá 152s a je při něm využito lokálního dotlaku v oblasti ložisek klikového hřídele a vakuované formy. Obě tyto technologie a další podrobnosti o licím procesu tohoto odlitku jsou opět popsány v teoretické části práce. Specifický tlak v dutině dosahuje hodnoty 80 MPa.

Pro experiment byl vybrán třideskový tlakový licí stroj od výrobce Idra o uzavírací síle 19600kN. Maximální výška forem pro tento stroj může dosahovat až 1450mm a dráha licího pístu je 1000mm, jeho licí tlak dosahuje hodnoty 34 MPa.

Výběr jader, na kterých byla zkouška provedena, probíhal na základě dvou kritérií:

- *Jádra vykazující nízkou životnost* – volba dle statistiky četnosti jejich výměn a příčin demontáže formy z licího stroje
- *Vady odlitku v blízkosti jader* – volba na základě snímků z rentgenové tomografie a statistik kvality od odběratelů odlitku

Počítačová tomografie

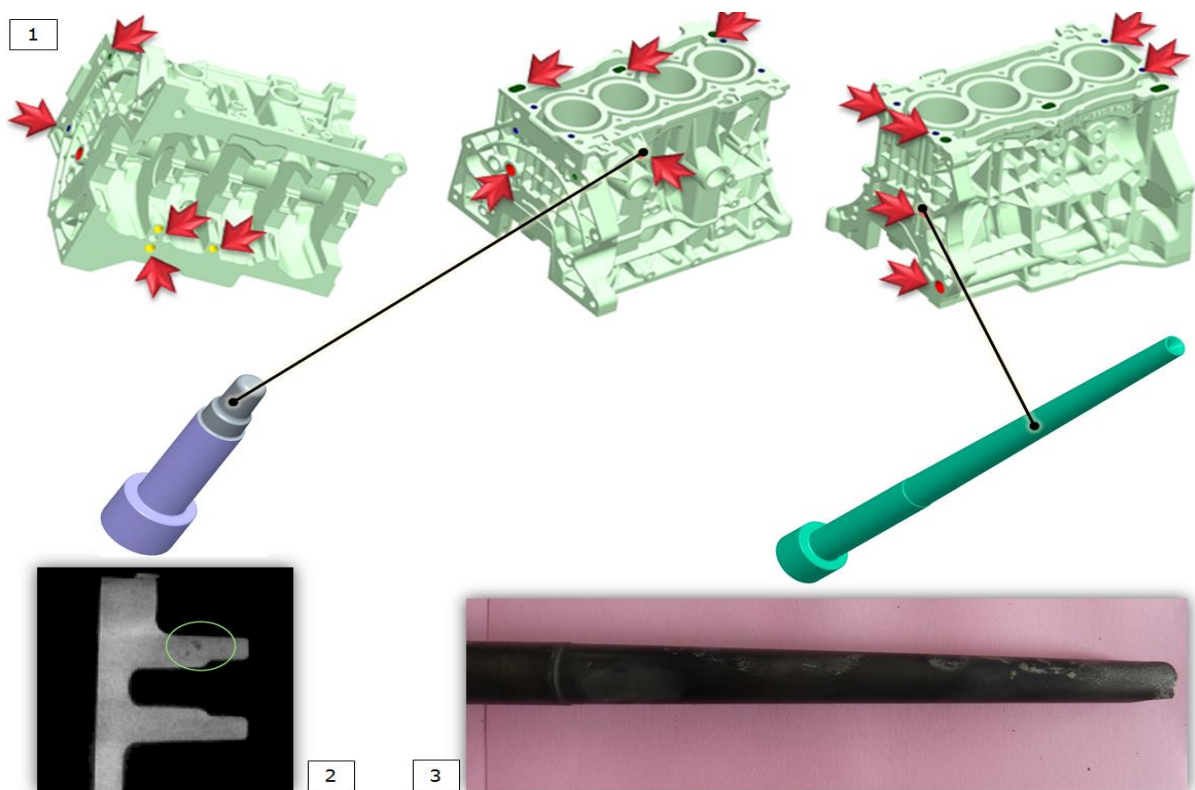
Pro nedestruktivní posouzení vnitřní kvality odlitku bylo během experimentu použito rentgenové (počítačové) tomografie. V rentgenové tomografii se využívá schopnost pronikání rentgenových paprsků skrze objekty. Bodový zdroj záření, rentgenka, generuje záření, které prochází objektem, kde se část záření pohltí a zbylé záření se dostává na detektor. Jas vzniklého obrazu ovlivňuje dráha paprsků a hustota materiálu. Rentgenový detektor zachycené snímky předává v digitální podobě pro další zpracování. Snímá se řádově až tisíce snímků s různě pootočeným objektem, jež pak slouží jako vstupní informace pro výpočet trojrozměrného modelu. Rentgenové tomografy pracují s tzv. voxely, což je objemový obrazový bod. Analogií ve 2D jsou tzv. pixely. Na snímku poté světlé voxely znázorňují místa s nízkou hodnotou pohlcení paprsků, např. dutina, staženina, poretita v odlitku apod. a tmavé voxely představují místa s vysokým pohlcením paprsků, např. kov. Lze také porovnávat nasnímaný objekt vůči CAD datům a nedestruktivně tak zjistit tolerance vyrobené součásti.

Pro tuto zkoušku bylo k dispozici multisenzorového měřícího zařízení TomoScope HV 500 od firmy Werth Messtechnik. Na tomto přístroji lze měřit objekty s max. průměrem 500 mm a délkou až 700 mm. Urychlovací napětí je 225 kV, plocha detektoru je 400 mm s rozlišením až 2 048 x 2 048 pixelů.

Postup kontroly kvality odlitku pomocí rentgenové tomografie je následující. Odlitek se příčně nařeže na čtyři kusy, které se postupně vkládají do měřícího zařízení. Je to zejména z důvodu kvalitnějšího prosvícení kontrolovaného objektu a redukci rušivých šumů. V měřícím zařízení se odlitek upne na pohyblivý stůl, který se během scanování natáčí vůči rentgence a detektoru, tak aby zaujal co nejvýhodnější polohu. Získaná data se pomocí počítače složí a vytvoří jednotlivé řezy odlitkem, odstupňovaných po 1mm. Zpravidla se snímá odlitek ve třech pravoúhlých osách kolmých na jeho základnu.

Dále bylo využito této technologie pro nedestruktivní kontrolu chladících kanálů v jádru, kdy se z nasnímaných dat jádra dopočítal 3D model, který bylo možné porovnat s CAD daty a zjistit úchytky mezi těmito změřenými hodnotami.

Na základě výše uvedených kritérií bylo vybráno celkem 16 jader pro provedení této zkoušky. Ilustrace vybraných jader je uvedena na obr. 31, kompletní přehled je obsažen v příloze 1.



Obr. 31- Příklady výběru vhodných jader pro zkoušku technologie Jet-Cooling
1 – Vybraná místa na odlitku bloku motoru; 2 – Vadné místo v odlitku, jádro pos. 6.31; 3 – Jádro vykazující nízkou životnost pos. 8.9 (konkrétně ulomené na 7800 cyklech)

3.2.1 Volba chladícího agregátu



Obr. 32 - Zařízení HDK 4-20

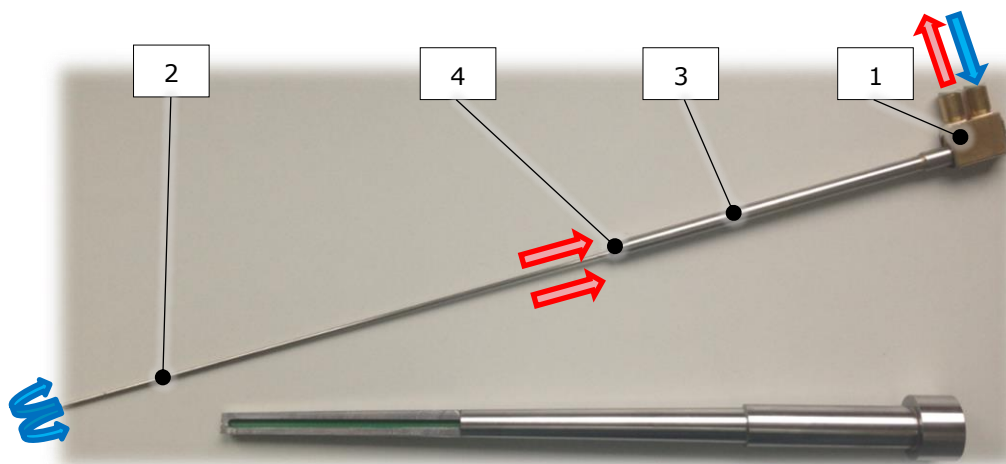
Na základě volby chlazených jader, respektive jejich počtu, byl zvolen i chladící agregát. Jedná se o zařízení *Jet-Cooling HDK 4-20*, viz obr. 32. Jedná se o nejmenší nabízené zařízení. Jeho technická specifikace je uvedena v tab. 6. Systém je schopen pojmout až 20 jader, což pro zvolený rozsah experimentu plně dostačuje. Jádra jsou rozdělena do 4 okruhů, přičemž na každý okruh by mělo připadnout optimálně 5 jader. Parametry se nastavují zvlášť pro každý okruh.

Tab.6 Technické parametry zařízení HDK 4-20

HDK 4-20	
Tlak chladicího média	2 MPa
Průtok média	až 20 l/min
Tlak vzduchu	0,6 MPa
Zásobník chladicí vody	60 l – uzavřený okruh
Výměník pro chlazení média	Demi voda
Počet okruhů	4
Max. počet napojených jader	20

3.2.2 Jádra a chladicí elementy

Jádra a chladicí elementy tzv. coolery jsou velmi podstatnou součástí tohoto systému. Jejich koncepce je zřejmá z obr. 33. V jádru je vyvrtán chladicí kanál, do kterého se šroubuje cooler, jenž je těsněn PTFE páskou. Cooler se skládá z rozvodné hlavy, kapiláry, která přivádí medium do vrcholu jádra, a silnější trubičkou odvádějící ohřáté medium z jádra. Pro provedení této zkoušky byla jádra dodána od japonského výrobce Ahresty, který je originálním dodavatelem jader pro technologii

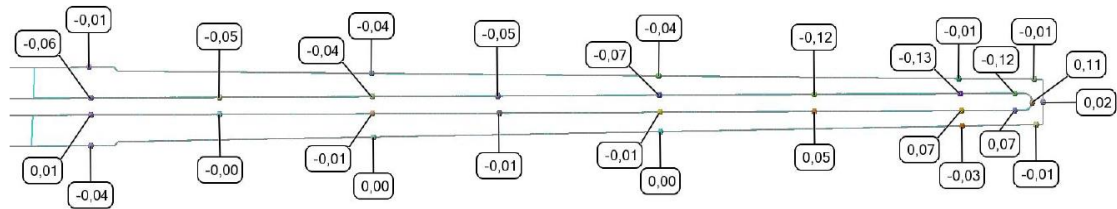


Obr. 33- Jádro a cooler

1-otočná hlavička; 2-přivodní kapilára; 3-vývodní trubička; 4-NPT závit pro spojení s jádrem

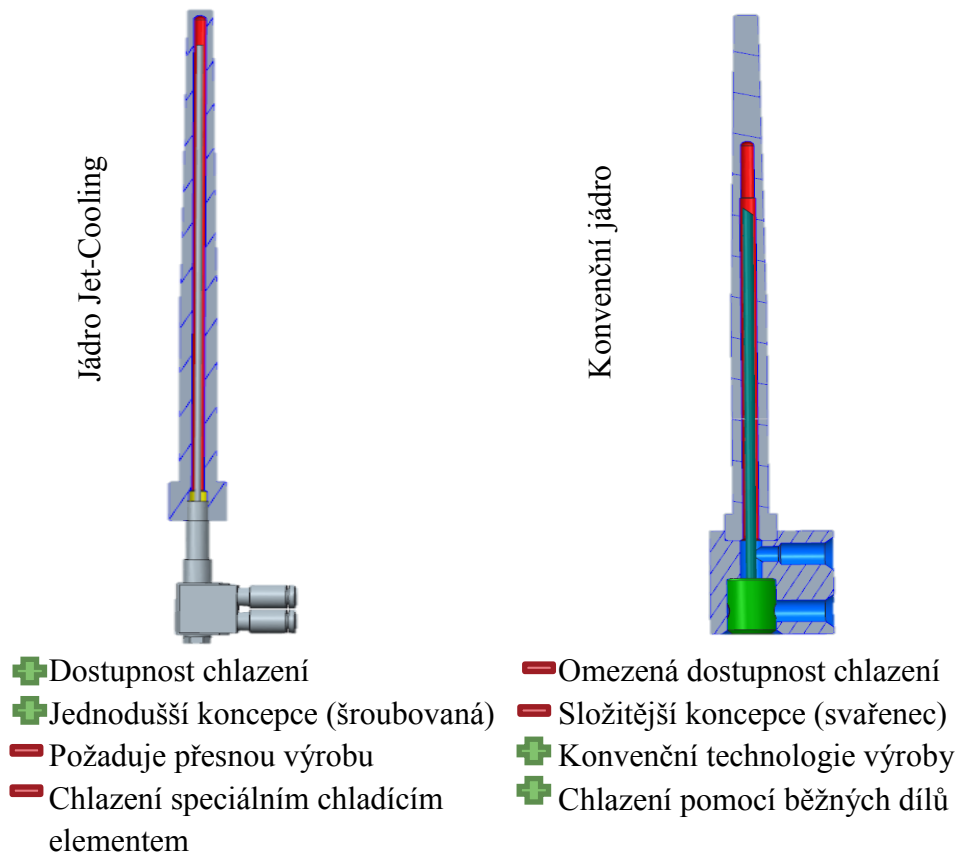
Jet – Cooling. Jak bylo zmíněno v teoretické části této práce, je důležité zaručit precizní výrobu chladicího kanálu. Jádra pro tuto technologii jsou často tenká a dlouhá, což má za následek jejich tenkou stěnu mezi roztaveným kovem a chlazením, která může být i 1,5mm. Při nesouosém vývrtu dochází k nerovnoměrnému teplotnímu spádu a tím i k nerovnoměrnému tepelnému namáhání jádra. U takovýchto nepřesně vyrobených jader by došlo k jejich deformování a rapidnímu zkrácení životnosti. Souosost chladicího kanálu s vnějším

plášťem jádra by v ideálním případě měla dosahovat 0,3 – 0,5mm na průměr. Z tohoto důvodu byl vzorek dodaných jader kontrolován na tvar a polohu chladicího otvoru. Provedlo se naskenování jader pomocí rentgenové tomografie a tento scan se porovnal s CAD daty jader. Výsledný vzorový protokol je zobrazen na obr. 34.



Obr. 34- měření rentgenovou tomografií dodaných jader – pos. 8.10
vyznačené úchytky v mm

Z vyznačených vektorových úchylek CAD dat oproti měřenému kusu je patrné, že i při výrobě otvoru o průměru 4,5mm a hloubce 358mm bylo dosaženo souososti do 0,13mm, tzn. 0,26mm na průměr. Důležité také je eliminovat vruby, v kterých by docházelo ke koncentraci napětí, proto dna chladicích kanálů jsou hladké kulové plochy.



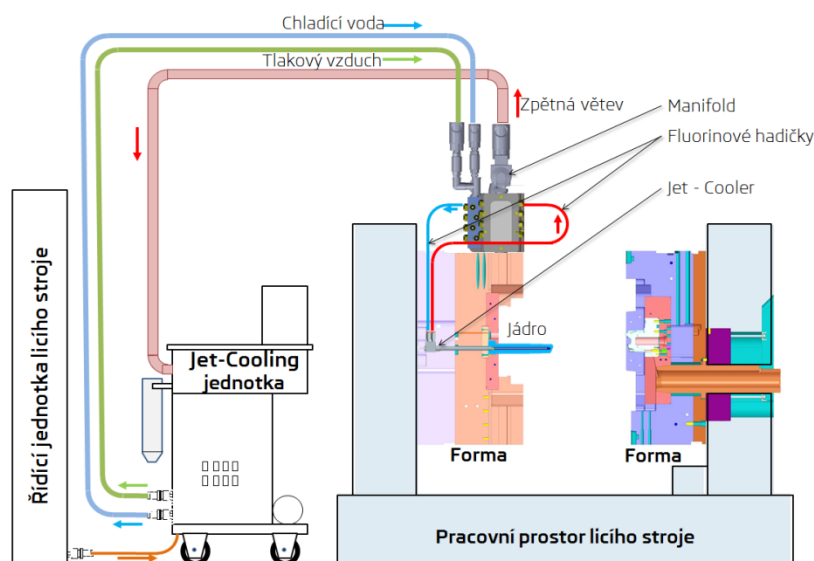
Obr. 35- Porovnání koncepce jádra Jet-Cooling s konvenčním jádrem

Materiál jader pro tuto zkoušku byl zvolen 1.2344, který se vyznačuje podobným chemickým složením a mechanickými vlastnostmi jako materiál 1.2343. Byl použit z důvodu snazší dostupnosti v Japonském regionu. Na povrch byl nanesen PVD povlak na bázi TiN.

Dále byl navrhnout vhodný průměr chladicích kanálů v jádru. Využívá se typizované řady průměrů 3; 3,5; 4; 4,5 mm. Podle rozměru kanálu se následně volí rozměr chladicího cooleru, resp. rozměry přívodní trysky a rozměry odvodní trubičky, tak aby byl zaručen co nejvyšší průtok chladicího media, viz obr. 29. Délka těchto elementů je závislá na zástavbě do formy. Obr. 35 porovnává koncepci jádra Jet-Cooling a jádra konvenčního.

3.2.3 Řešení rozvodů média

Na obr. 36 je znázorněno schematicky zapojení rozvodů systému Jet-Cooling. Jednotka J-C je propojena s řídicí jednotkou licího stroje pro zajištění vzájemné komunikace. Na formě je umístěna rozvodná kostka, tzv. manifold, který je se zařízením J-C propojen tlakovými hadicemi a elektrickým kabelem. Jednomu okruhu náleží jeden manifold. Dvě tlakové hadice slouží k dopravě chladicí vody a tlakového vzduchu do formy a jedna hadice zpětná, kterou se vede vzduch i voda zpět do zásobníku v jednotce. Elektrický kabel slouží pro komunikaci uzavíracího ventilu, popř. tlakového snímače umístěného v manifoldu. Na manifold jsou napojeny jednotlivá jádra okruhu. Realizace propojení byla zvolena pomocí speciálních fluorinových hadiček o světlosti DN 2mm a spoje pomocí nástrčného



Obr. 36- schéma zapojení systému Jet-Cooling

rychloupínacího systému dodaného firmou Lethiguel. Pro kontrolu průchodnosti media jednotlivými jádry byla zpětná část manifoldu osazena optickým zařízením kontroly průtoku.

3.2.4 Zapojení jader do chladících okruhů

Dalším důležitým krokem při návrhu zapojení systému Jet-Cooling je rozdělení jader do jednotlivých okruhů. Jelikož nastavení parametrů je umožněno pouze pro každý okruh jako celek, bylo při výběru přihlédnuto k:

- teplotám jader při licím cyklu před zavedením J-C a zohlednění, zda jádro bylo již chlazené konvenčně
- geometrie jádra a velikost navrhnutých chladících kanálů a coolerů
- rozmístění a zástavbě jader a manifoldů na formě
- délce přívodních hadiček od manifoldu ke cooleru - max. 2m, kvůli rychlosti odezvy chlazení

Nejvýznamnější kritérium byla zástavba ve formě, kdy výběr jader a zaformování odlitku určilo rozmístění jednotlivých manifoldů, potažmo okruhů na formě. Na pevné části formy bylo nutné zachladit 3 jádra a na pohyblivé části formy 13 jader, pro optimální chladicí podmínky je nutné osadit každý okruh maximálně 5ti jádry. To znamená, že na pevnou část formy byl umístěn okruh „A“ a okruhy „B, C, D“ byly umístěny na boční strany pohyblivé části formy.

Jádra z pohyblivé části formy byly dále rozděleny podle jejich geometrie, přesněji velikosti a rozměru navrhnutých chladících kanálů a zvolených chladících elementů. Bylo to z důvodu, aby chladicí účinek systému J-C měl podobný vliv na všechna jádra v okruhu a změna intervalu chlazení účinkovala na všechna jádra konstantně.

Podstatný krok při tvorbě rozvahy rozložení jader do okruhů bylo provedení termovizního měření formy a vybraných jader termovizní kamerou před nasazením technologie J-C.

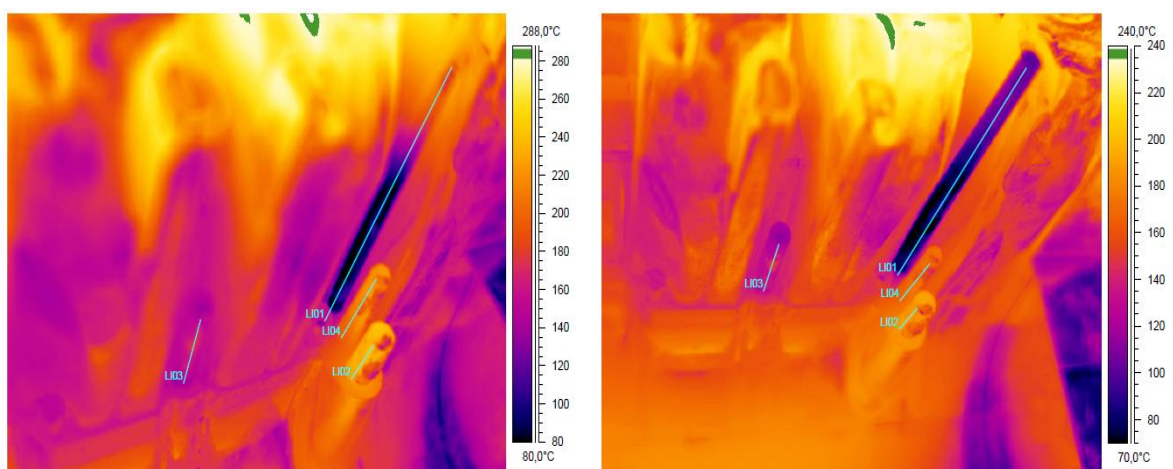
Termovizní bezkontaktní měření

Termovizní kamera je přístroj pro bezkontaktní měření teplotních polí na povrchu materiálů pomocí měření intenzity pro lidské oko neviditelného infračerveného záření. Toto záření je nejčastěji pomocí tzv. bolometrů převedeno na elektrický signál. Výstupem pak je dvourozměrný barevný nebo monochromatický obraz (záleží na zvolené barevné paletě). Výhodou je, že měření je bezkontaktní a je tak

tedy možné zaznamenat teplotní změny mnohem rychleji a měřit i vzdálenější a nepřístupné povrchy či elektrická zařízení v provozu pod napětím. Nejčastěji se dnes v komerční sféře setkáme se snímači využívajícími tzv. bolometry. Bolometr (z řeckého bole = paprsek) je senzor pracující na principu pyrometrie, tzn. měření celkového vyzařeného tepelného výkonu prostřednictvím infračerveného záření. Absorbované dopadající infračervené záření se na bolometru projevuje změnou teploty, resp. změnou odporu. Záření dopadá na absorpční vrstvu tvořenou zlatou folií, ta ohřívá teplotně vodivý povrch i nosník. Na spodní straně nosníku je napařený meandr odporové dráhy, jejíž odpor se mění s teplotou. Díky miniaturizaci je možné umístit celé matice mikro-bolometrů na jednom čipu. [16]

Pro měření teplot během této zkoušky byla použita kamera FLIR SC660 s rozlišením 640x480 pixelů, která dokáže zaznamenat teploty od 30°C a přesnost měření se pohybuje +/- 2°C.

Postup měření během celého experimentu byl stále totožný. Všechna měření se prováděla v pracovním cyklu formy a to před nanesením separačního prostředku a po nanesení separačního prostředku. Mezi každým měřením, myšleno snímáním termovizní kamerou, se provedlo odlití cca 5ti odlitků, aby se teplota formy dostala po měření opět na pracovní hodnotu. Ke každému měření však docházelo po vyjmutí odlitku a při otevřené formě, kdy již došlo k částečnému ochlazení formy sáláním a prouděním tzn., že naměřené hodnoty jsou částečně zkreslené, avšak k měření docházelo vždy za konstantních podmínek, proto pro potřeby porovnání plně dostačují. Totožná technologie měření teploty a stejný postup měření byl použit i při měření teplotních polí při optimalizaci chladících parametrů, viz kapitola 3.2.5.



Obr. 37- Termovizní měření

vlevo – před ošetřením; vpravo – po ošetření postříkem; LIO1 – pos. 2.13; LIO2 – pos. 2.9

Jádra bylo nutné rozdělit podle intenzity jejich ohřátí a distribuovat je do zbylých tří okruhů tak, aby následná zvolená intenzita chlazení ovlivnila všechna jádra rovnoměrně. Muselo zde být však zohledněno, zda jádro bylo již chlazeno konvenčně, či nikoliv. Je zřejmé, že chladicí efekt technologie J-C bude výraznější u jader dříve nechlazených, než u jader chlazených. Na obr. 37 je snímek z termovizního měření před ošetřením postřikem. Je zde názorně vidět, že konvenčně chlazené jádro pos. 2.13 má po své délce velmi rozdílné teploty 80-200°C. Jeho teplotní minimum je již nedostačující pro nanášení postřiku, nedojde k odpaření vodní složky a může zde vznikat poretita v odlitku. Jádro pos. 2.9 je nechlazené a vykazuje teplotu 200-220°C, což již v tomto případě způsobuje vady v odlitku. Kompletní měření formy bez J-C je obsaženo v příloze 2. Nastavení času chlazení jader pro první test bylo zvoleno podle doby tuhnutí odlitku ve formě, což v tomto případě je 35s. Interval profukování okruhu byl nastaven pokusem tak, aby v okruhu nezbyvala žádná zbytková voda, což bylo cca 40s. Interval testu těsnosti je neměnný a trvá 15s. V tab. 7 jsou uvedeny posice jader rozdělených do 4 okruhů včetně prvního nastavení parametrů chlazení.

Tab. 7 Rozdělení jader do okruhů a první nastavení parametrů chlazení

Okruh	Napojená jádra	Prodleva [s]	Chlazení [s]	Prodleva [s]	Vzduch [s]	Prodleva [s]	Test [s]
A	2.8 2.9 2.13	2	35	5	40	5	15
B	4x4.14	2	35	5	40	5	15
C	4.10 4.11 4.12 8.9 8.10	2	35	5	40	5	15
D	9.7 2x9.12 6.31	2	35	5	40	5	15

3.2.5 Optimalizace okruhů a parametrů chlazení

Uvedené parametry chlazení jsou pouze hodnoty pro první nastavení systému. V počáteční fázi testování bylo nutné pomocí dalšího termovizního měření tyto hodnoty korigovat, aby se dosáhlo zrovnoměnění teplotního pole formy a vhodné teploty pro nanášení separátoru. Termovizní měření probíhalo za stejných podmínek

jako v předchozí kapitole. Na základě výsledku z každého měření proběhla korekce jednotlivých parametrů chlazení a byla sledována reakce teplotního pole jader na tuto změnu.

Správná teplota jader byla kontrolována také nepřímo vizuální kontrolou stavu opotřebení jádra a kvality povrchu předlitého otvoru. Byly sledovány především dva faktory:

- nalepování hliníkové slitiny na povrch jádra
- poškozený povrch předlitého otvoru

Jak bylo uvedeno v teoretické části této práce, nalepování hliníkové slitiny na povrch formy je nesporným důkazem jeho vysoké teploty. Pokud k tomuto docházelo, byla doba chlazení daného okruhu prodloužena. Naopak, pokud se jádro zadíralo a tím poškozovalo povrch předlitých otvorů, byla to známka, že mazadlo stékalo z jádra a proto bylo nutné interval chlazení zkrátit a tím teplotu jádra zvýšit. Jednotlivé nastavení chladících parametrů systému J-C jsou uvedeny v tab. 8. Časové intervaly prodlev nejsou uvedeny, jelikož na chlazení nemají vliv. Nutno dodat, že celá tato zkouška probíhala v sériové produkci formy, kdy bylo nutné dodržet stanovenou normu na počet vyrobených odlitků.

Tab. 8 Průběh optimalizace chladících parametrů J-C

Okruh	Fáze cyklu	1. nastavení	2. nastavení	3. nastavení	4. nastavení	5. nastavení	6. nastavení
A	Zpoždění [s]	2	2	2	2	2	2
	Chlazení [s]	35	35	25	25	25	25
	Vyfukování [s]	40	30	30	15	15	15
B	Zpoždění [s]	2	2	2	2	2	2
	Chlazení [s]	35	25	15	15	15	15
	Vyfukování [s]	40	30	30	15	15	15
C	Zpoždění [s]	2	2	2	2	2	2
	Chlazení [s]	35	25	25	25	10	15
	Vyfukování [s]	40	30	30	15	15	15
D	Zpoždění [s]	2	2	2	2	2	2
	Chlazení [s]	35	25	15	15	25	25
	Vyfukování [s]	40	30	30	15	15	15

Obsahem přílohy 3 je analýza teplot všech jader během optimalizace chladících parametrů. Některé naměřené teploty uvedené v příloze 3 vykazují hodnoty, které se vymykají očekávanému trendu při korekci parametrů chlazení. V počáteční fázi zkoušky se na některých jádrech vytvořil místně povlak z připečeného mazadla a ten poté zkresloval měření. Určení reálné teploty těchto míst bylo poté velmi obtížné. Jak z uvedených hodnot vyplývá, první nastavení systému způsobilo velmi intenzivní zachlazení jader. Některá vykazovala teplotu pouze cca 60°C, což pro fázi postřiku formy nebylo absolutně vyhovující. Následovalo proto zkrácení intervalu chlazení. Jelikož i proudící vzduch má jisté ochlazovací schopnosti, bylo přihlíženo i k fázi profukování, což znamená, že byl také redukován i interval pro profukování chladících kanálů. Toto však mělo za následek, že zbytková voda nebyla odstraněna kompletně z okruhů.

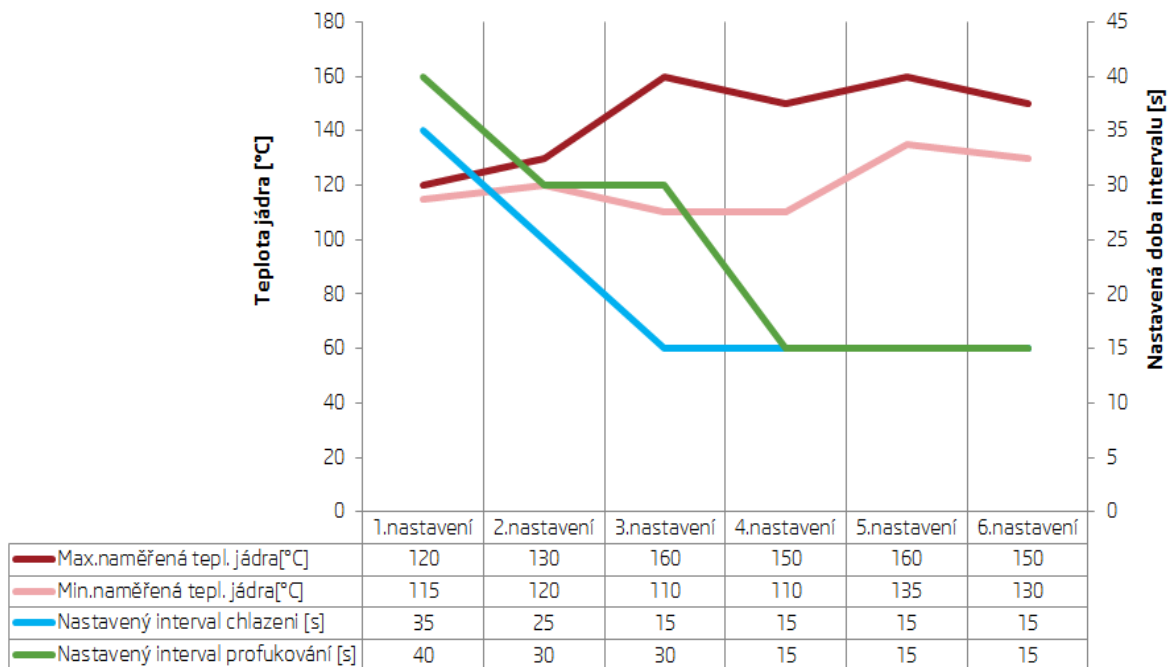
Bylo také zjištěno, že navržené zapojení jader do společných chladících okruhů není vhodné. Jak dokládají naměřené hodnoty, na změny parametrů chlazení nereagovaly změny teplot jader ve společných okruzích podobně. Jednalo se o okruhy B, C, D, kdy některá jádra v okruhu měla příliš vysokou teplotu, ale nebylo možné více zintenzivnit chlazení, jelikož by to způsobilo podchlazení jiných jader. Z tohoto důvodu došlo mezi 4. a 5. nastavením chladících parametrů k přepojení okruhů. Přepojení jader v chladících okruzích je uvedeno v tab. 9.

Tab. 9 Přepojení chladících okruhů pro zlepšení teplotního pole jader

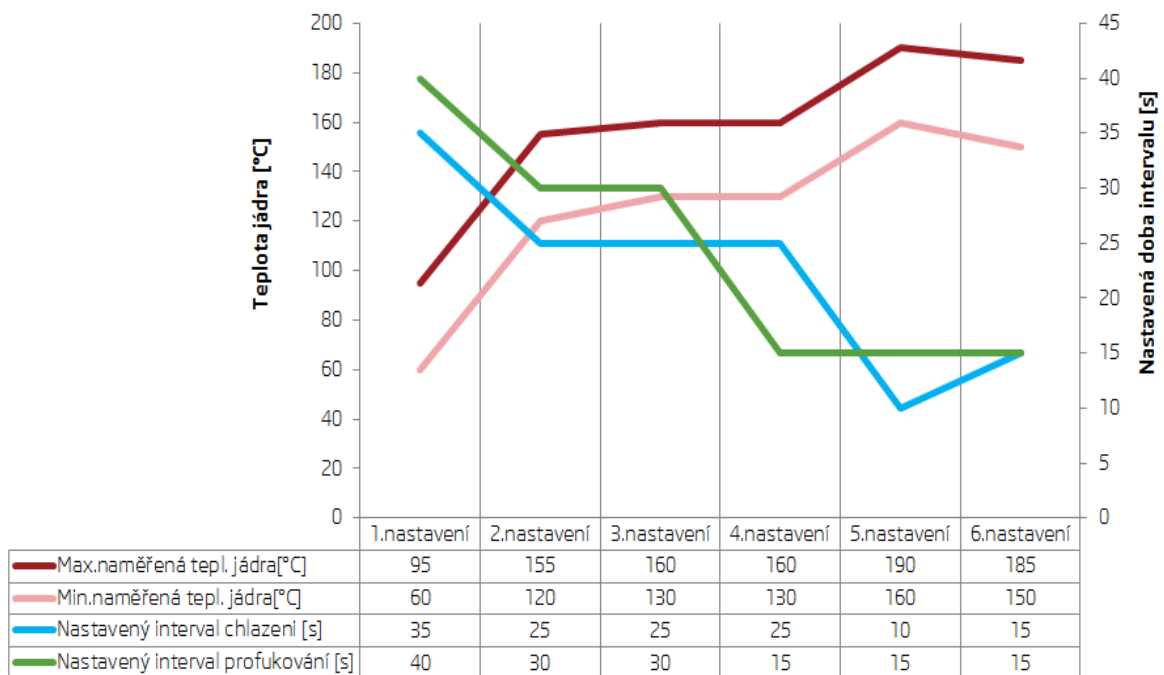
Okruh	A	B	C	D
Jádra			6.31	9.7
	2.8		4.12	4.10
	2.9	4x 4.14	8.9	4.11
	2.13	9.12 (dolní)	8.10	9.12(horní)
			4.10	9.12(dolní)
			4.11	6.31

Byly porovnány teploty jader chlazených technologií J-C a podle podobnosti jejich teplot byly jádra přepojeny. Jádra pos. 4.10 a 4.11 vykazovaly oproti ostatním jádrům z okruhu C příliš vysokou teplotu, např. jádru pos. 4.10 byla naměřena teplota před nanesením separátoru až 260°C, ale nejchladnějšímu jádru z okruhu pos. 4.12 pouze 135 až 150°C. Z tohoto důvodu byly tato nejteplejší jádra přesunuty

do okruhu D, který je nejintenzivněji chlazen. Jádru 9.12(dolní) oproti tomu vykazovalo teplotu nižší, okolo 150°C, a nebylo možné ho proto nechat s jádru v okruhu D, kde nejvíce ohřáté jádro, pos. 9.7, mělo teplotu až cca 250°C. Jádru 6.31 bylo přepojeno z důvodu zlepšení kvality odlitku.



Obr. 38 Graf teploty jádra 4.14 (dolní-spojka) před nanesením separátoru v závislosti na změně parametrů chlazení J-C



Obr. 39 Graf teploty jádra 8.10 před nanesením separátoru v závislosti na změně parametrů chlazení J-C

Konečné nastavení parametrů chlazení J-C je uvedeno v tab. 8, v červeném ohraničení. Tomuto odpovídá zapojení jader do společných okruhů dle tab. 9. Při této konfiguraci jádra vykazují teploty uvedené v příloze 3 v červeném ohraničení. Tyto teploty jader jsou již vhodné pro lící proces ve slévárně ŠKODA AUTO a.s. a s těmito parametry probíhal zbytek zkoušky technologie Jet-Cooling. Termovizní měření po konečném nastavení chlazení je uvedeno v příloze 4. Obr. 38 a 39 nám dává jasnou představu, jak nastavené parametry chlazení J-C ovlivňují teplotní pole jader.

3.2.6 Dílčí výsledky experimentu

V době, kdy vznikla tato diplomová práce, nebyl pilotní projekt zcela ukončen a vyhodnocen, proto jsou zde uvedeny dílčí výsledky. Vyhodnocení bylo zaměřeno především na očekávané přínosy od nasazení technologie Jet-Cooling a na samotný lící proces. V průběhu testování technologie až do tohoto vyhodnocení byla forma nasazena na lící stroj celkem 5 krát. V tab. 10 je uveden přehled těchto nasazení. Jsou zde uvedeny období, po které forma byla nasazena v provozu slévárny, počet nalitých odlitků za uvedené období a důvod, kvůli kterému byla forma demontována z lícího stroje. Průměrný vyprodukovaný počet odlitků z této formy na jedno nasazení na lící stroj bez Jet-Coolingu se pohybuje okolo 2700 kusů.

Tab. 10 Přehled nasazení formy s technologií J-C

	1. nasazení	2. nasazení	3. nasazení	4. nasazení	5. nasazení
Období	19.8.- 12.9.2014	12.10.- 24.10.2014	10.11.- 27.11.2014	13.2.- 23.2.2015	4.3- 8.3.2015
Čas lícího cyklu[s]	152	147	147	147	147
Produkce [ks]	9500	4700	5800	3100	1600
Důvod demontáže formy	Poškození vložky vodního prostoru	Změna sortimentu	Ulomené jádro pos. 8.9 (J-C)	Poškozený tvar formy	Poškozený tvar formy

1. nasazení formy

Při prvním nasazení formy bylo vyprodukováno 9500 ks odlitků. Forma se následně demontovala kvůli poškozené vložce vodního prostoru. Stav chlazeného jádra Jet-Coolingem, pozice 8.10, viz obr. 40, byl zhodnocen jako nepřijatelný pro další

produkcí a došlo k jeho výměně za nové. Povrch všech zkoušených jader se mechanicky vyčistil a došlo k přepojení chladících okruhů.



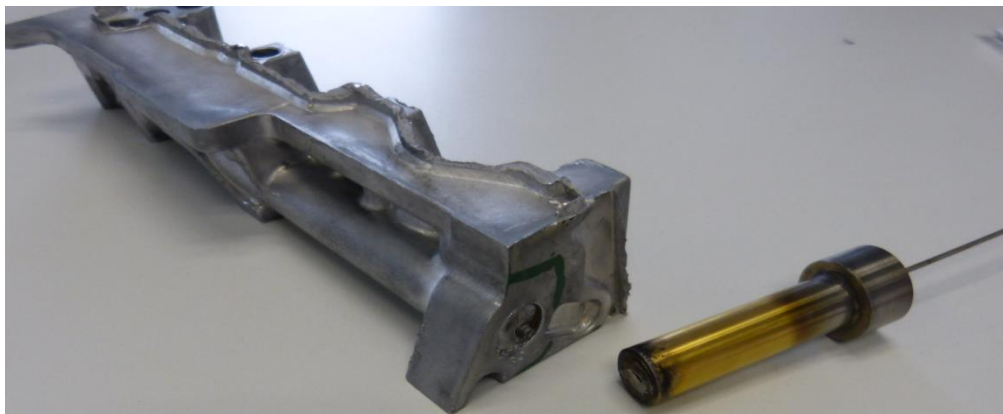
*Obr. 40 Stav jádra posice 8.10 po 9 500 cyklech
označení – velmi silné erozivní opotřebení a nalepená hliníková slitina*

2. nasazení formy

Na druhé nasazení formy na licí stroj se odlilo celkem 4700 ks odlitků. Během tohoto provozu formy došlo k optimalizaci nanášení separačního prostředku, jelikož některé partie formy nebylo nutné tímto způsobem tolik ochlazovat a dosáhlo se tak zkrácení licího cyklu o 5s. Demontáž formy se provedla z důvodu plánované změny sortimentu. S formou ani s jádru se neprováděly žádné úpravy ani čištění.

3. nasazení formy

Vyprodukovalo se dalších 5800 odlitků, kdy důvod pro demontáž formy vznikl destrukcí jádra posice 8.10 chlazeného technologií J-C. Toto zničené jádro je zobrazeno na obr. 41. Všechna zkoušená jádra byla mechanicky vyčištěna.



Obr. 41 Ulomené jádro J-C pos. 8.10 po 10500 cyklech

4. nasazení formy

Při čtvrtém nasazení se odlilo 3100 odlitků, kdy důvod pro opravu formy vznikl destrukcí exponovaného tvaru formy, který s touto zkouškou nemá souvislost. Tvar formy byl opraven bez zásahu do zkoušeného systému J-C.

5. nasazení formy

Na toto nasazení formy se vyrobilo 1600 kusů, kdy důvod pro demontáž formy z licího stroje byl opět ulomený tvar, který s touto zkouškou nemá žádnou souvislost.

Při prvním a druhém nasazení formy docházelo k optimalizaci parametrů chlazení, viz kapitola 3.2.5. Při všech nasazeních licí cyklus vykazoval velmi dobrou stabilitu. To znamená, že se snížila četnost přerušení licího procesu kvůli korekcím ve formě, jako je například obrušování povrchu jader od nalepeného hliníku, popřípadě ručním domazáváním jader apod. Nicméně tento přínos nelze kvantifikovat a přesně vyhodnotit.

3.2.6.1 Životnost jader

Hlavní přínos této technologie se očekával zejména po stránce zvýšení životnosti jednotlivých jader. Jak bylo uvedeno výše, toho času není experiment u konce a celkový přínos na jejich životnost nelze zcela vyhodnotit. V tab. 11 jsou uvedeny průměrné životnosti jader bez použité technologie J-C, získané ze statistik oprav forem sledované ve VSN3, informace, zda jsou chlazeny konvenčně, či nikoliv a jako poslední údaj je uvedeno kolik odlitků bylo odlito s technologií J-C do výměny příslušného jádra, nebo jeho porušení.

Jak je z tabulky patrné, ve většině případů toto nejsou konečné hodnoty a jádra jsou schopná dalšího provozu. Jedná se o původní jádra, se kterými zkouška startovala a se kterými byly optimalizovány parametry chlazení. U jádra posice 4.14 došlo kvůli nevhodné manipulaci s některými kusy během demontáže a čištění formy v nářadovně k jejich zničení, proto musely být vyměněny za nové. Nicméně tyto jádra byla v tu dobu stále ve velmi dobré kondici schopné dalšího provozu. Podobný případ nastal i u jádra posice 9.7, když bylo vyměněno za nový kus, avšak stávající jádro bylo stále ve velmi dobrém stavu. Jediné jádro, které bylo zničeno při samotném licím procesu, což byl i v jednom případě důvod demontáže formy z licího stroje, je posice 8.10. Ve dvou případech ho bylo nutné vyměnit po cca 10000 ranách. Z uvedených hodnot je zřejmé, že životnost tohoto jádra s J-C je cca 60% životnosti jádra bez použití technologie J-C.

Tab. 11 Přehled životností jader bez a s J-C

Posice jádra	Ø životnost bez J-C [cykly]	Chlazení konvenčně	Ø životnost s J-C [cykly]	Konečná životnost	Nárůst životnosti (průběžný stav)
2.8	14500	ano	24700	ne	+73%
2.9	Nesleduje se	ne	24700	ne	
2.13	12000	ano	24700	ne	+109%
4.10	Nesleduje se	ano	24700	ne	
4.11	Nesleduje se	ano	24700	ne	
4.12	18000	ano	24700	ne	+40%
4.14	Nesleduje se	ne	20000 - 24700	ne	
6.31	Nesleduje se	ne	24700	ne	
8.9	12000	ano	24700	ne	+109%
8.10	17000	ano	9772 10580	ano	-40%
9.7	17000	ano	20352	ne	+20%
9.12	Nesleduje se	ne	24700	ne	

3.2.6.2 Kvalita odlitku

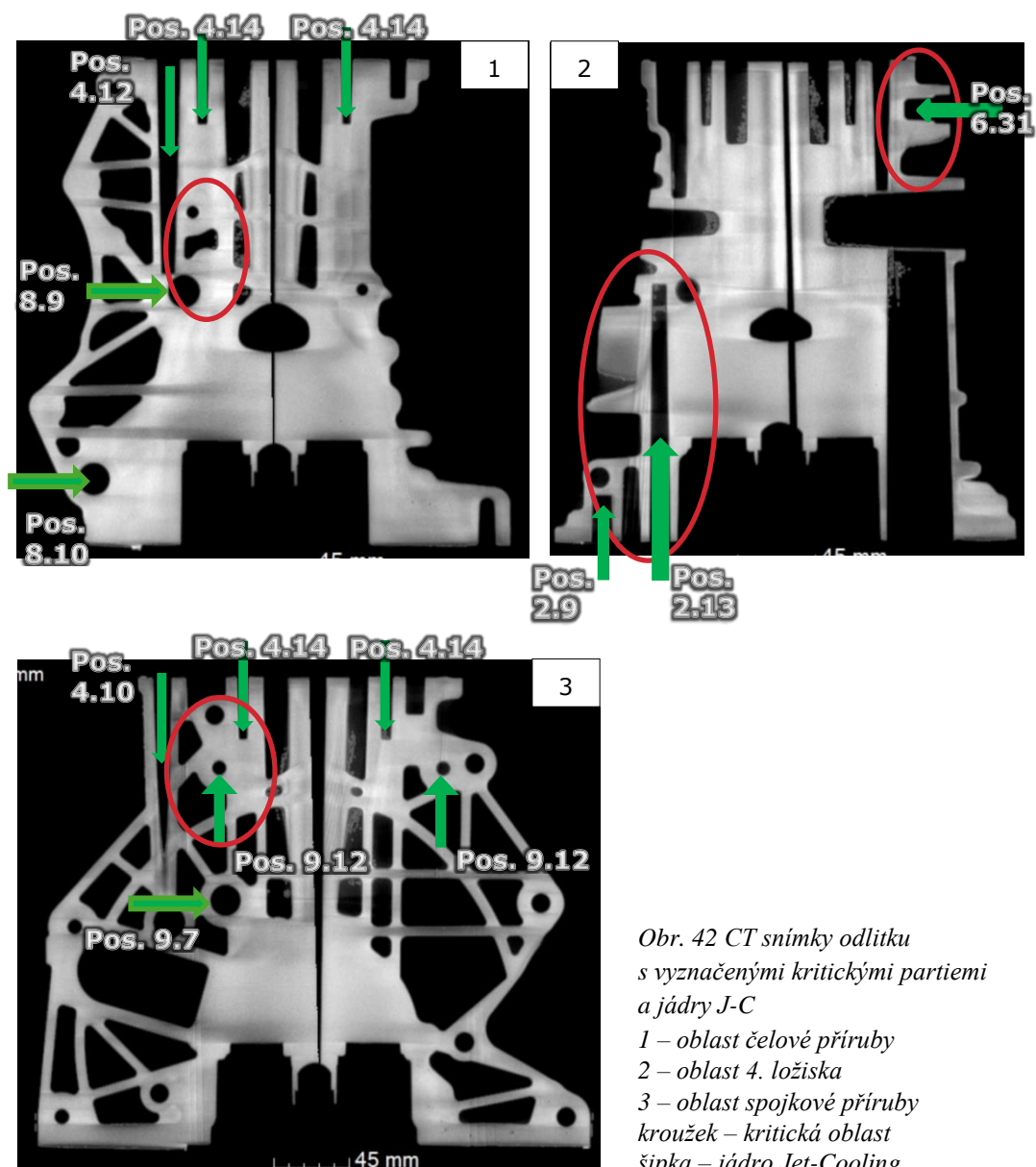
Sledování vlivu technologie J-C na kvalitu odlitku bylo provedeno několika způsoby:

- pravidelnou kontrolou odlitku pomocí RTG prováděnou 3 krát za směnu
- kontrolou odlitku pomocí rentgenové tomografie
- statistikami kvality a zmetkovitosti získanými od zákazníka, tzn. od závodu, kde se provádí opracování odlitku a kompletace motoru

Průběžná plošná kontrola odlitků pomocí RTG prováděná 3 krát za směnu je jednou ze standardní kontroly sériové produkce ve slévárně ŠKODA AUTO a.s. Tato kontrola sleduje vnitřní kvalitu odlitků a dokáže velmi rychle zjistit pokles kvality produkovaných dílů a na základě toho je možné učinit konkrétní opatření. Jednotlivé kritické partie se hodnotí číselně, avšak tyto údaje díky kvantitě měření a jejich nízké

diferenci, nejsou vhodné pro porovnávání. Je možné ale konstatovat, že v dosavadním průběhu celé zkoušky se kvalita odlitku stabilizovala, při produkci nedocházelo k výraznému kolísání objemu vnitřních vad a *celkovou kvalitu odlitku je možné zhodnotit jako velmi dobrou a konstantní.*

Dalším nástrojem pro kontrolu kvality odlitku, jak je uvedeno, byla namátková kontrola pomocí rentgenové tomografie. Touto kontrolou vzniklo velké množství řezů odlitku v jednotlivých fázích zkoušky, kde bylo možné jasně rozpoznat vnitřní vady. Na obr. 42 jsou uvedeny snímky z tomografie s vyznačenými kritickými partiemi odlitku. *Po analyzování výstupů z CT kontroly je opět možné konstatovat, že kritické oblasti odlitku jsou po konečném nastavení chladících parametrů v pořádku a kvalita odlitku je velmi dobrá.*



Obr. 42 CT snímky odlitku s vyznačenými kritickými partiemi a jádry J-C
 1 – oblast čelové příruby
 2 – oblast 4. ložiska
 3 – oblast spojkové příruby
 kroužek – kritická oblast
 šipka – jádro Jet-Cooling

V dalším kroku byly analyzovány statistiky zmetkovitosti od odběratelů odlitku. V těchto statistikách jsou uvedeny počty zmetků zjištěných na tlakové zkoušce, tzn. netěsnost odlitku vlivem porezity, mikrostaženin apod. Bohužel toto zařízení nedovede rozlišit přesné místo netěsnosti odlitku, proto nelze určit, zda je únik v partiích ovlivněných chlazením jader, nebo nikoliv. Hodnocena proto byla těsnost odlitku jako celek. Dále jsou zde uvedeny počty zmetků vlivem povrchových vad po mechanickém opracování. V tomto případě bylo možné ze statistik určit, jestli se jedná o partii ovlivňující toto chlazení a bylo uvažováno pouze s těmito hodnotami. V tomto případě se jedná pouze o oblast jádra 6.31 (otvor 5B103).

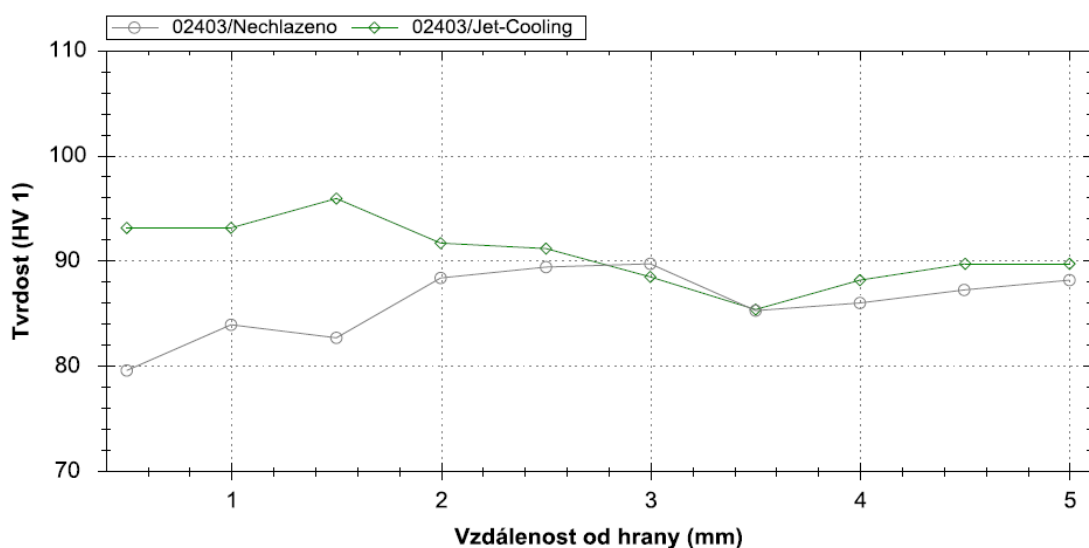
Tab. 12 Zmetkovitost produkce odlitku s technologií J-C a bez ní

		Kontrol. celkem [ks]	Netěsnost neopravitelná [%]	Povrchové vady neopravitelné [%]	Zmetky celkem [%]	
Bez Jet-Coolingu		3556	0,13	0,54	0,67	1,56
		5472	0,42	1,01	1,43	
		9028	0,30	0,83	1,13	
		6783	1,50	1,50	3,00	
S Jet-Coolingem	1. nasazení	6817	0,88	1,65	2,53	0,98
	2. nasazení	3361	0,28	0,43	0,71	
	3. nasazení	3054	0,60	0,28	0,88	
	4. nasazení	2631	0,00	0,80	0,80	
	5. nasazení	946	0,00	0,00	0,00	

Dále je nutné podotknout, že nebylo možné analyzovat celkovou produkci odlitků ze zkoušky J-C, jelikož ta byla rozdělena mezi dva odběratele a použitelnou statistiku zmetkovitosti provádí pouze jeden z nich. V tab. 12 jsou uvedeny počty zmetků v jednotlivých obdobích, kdy byly díly kontrolovány. Jsou zde uvedeny počty kontrolovaných kusů a procentuální vyjádření zmetkovitosti vlivem netěsnosti celkového odlitku a vlivem neopravitelných povrchových (partie okolo jádra 6.31 - otvor odlitku 5B103). Jelikož se jedná o důvěrné informace firmy ŠKODA AUTO a.s., všechna procentuální vyjádření zmetkovitosti byla vynásobena stejným přepočtním koeficientem „k“, z uvedených hodnot lze však sledovat trend poklesu celkové zmetkovitosti odlitků.

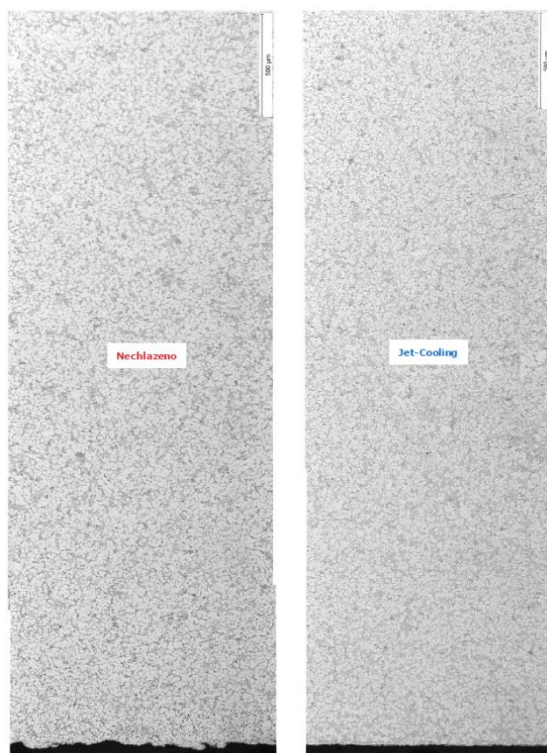
3.2.6.3 Porovnání mikrostruktury odlitku

Z důvodu porovnání vlivu technologie J-C na odlitek byl proveden metalografický rozbor dvou vzorků odlitku. Jedná se o oblast předlitého otvoru, kdy jeden vzorek má jádro tohoto otvoru nechlazené a druhý vzorek chlazené technologií J-C. Postup rozboru byl následující. Připravily se vzorky odlitku, které se v ose otvoru rozřízly a jejich poloviny se zalily do metalografického výbrusu. Jejich mikrostruktura byla posuzována pomocí mikroskopu Olympus PMG 3. Byla také prověřena tvrdost slitiny v závislosti na vzdálenosti od povrchu otvoru zkouškou tvrdosti dle Vickerse. Potvrdil se předpoklad, že výrazně jemnější mikrostruktura je v okolí chlazeného jádra Jet-Cooling. Rychlost tuhnutí kovu v okolí tohoto jádra je tedy výrazně vyšší.



Obr. 43 Tvrdost slitiny v závislosti vzdálenosti od povrchu otvoru

Patrné je to zejména na jehlicovitém AlSi eutektiku. U chlazeného jádra je také patrná vyšší tvrdost měřená od povrchu otvoru směrem do jádra a to do hloubky cca 2,5 mm, viz obr. 43. Na obr. 44 je znázorněna mikrostruktura obou vzorků a na obr. 45 je poté detail této mikrostruktury. Z uvedených informací vyplývá, že chlazení J-C příznivě ovlivňuje především oblasti odlitku v blízkosti jádra a díky pozitivnímu vlivu na mikrostrukturu má také příznivý vliv na tvrdost odlitku. Z obr. 44 je také patrná vyšší kvalita povrchu předlitého otvoru při použití J-C jádra.



Obr. 44 Mikrostruktura odlitku při použití nechlazeného jádra a jádra J-C



Obr. 45 Detail mikrostruktury

3.3 Diskuse dílčích výsledků

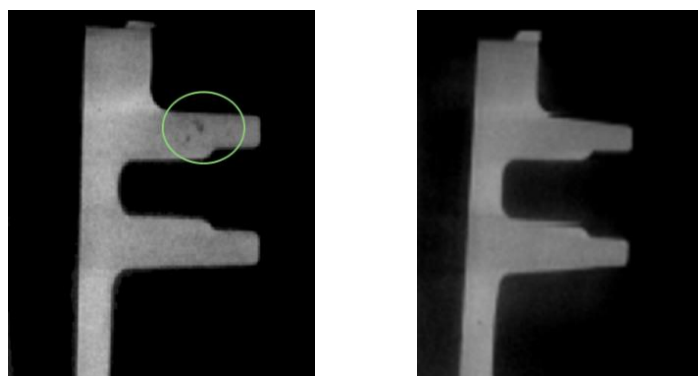
Z dílčích výsledků tohoto experimentu bylo získáno mnoho zajímavých hodnot a poznatků, které pomohou při dalším případném návrhu této technologie chlazení a při jejím dalším optimalizování. V následujícím textu jsou tyto výsledky shrnuty s ohledem na očekávané přínosy od experimentu a jsou konfrontovány s výsledky chlazení konvenčního.

Nejdříve bude zhodnocen přínos týkající se životnosti jader a zvýšení životnosti licí formy na jedno nasazení na licí stroj. Tyto dva aspekty od sebe nelze zcela oddělovat. Jak je patrné z tab. 11, u většiny sledovaných jader se dosáhlo zvýšení

životnosti o 20 až 109 % oproti jádrům bez J-C. Jádra, která jsou v této tabulce označena popisem „nesleduje se“ nebylo možné vyhodnotit, jelikož se neprováděly statistiky jejich životností před započítáním experimentu. Je to z důvodu toho, že s těmito jádry není z hlediska životnosti problém, nebo je možné provést jejich výměnu za provozu ve slévárně bez nutnosti demontovat formu z licího stroje a tudíž se tyto údaje neevidují. Důležité je však podotknout, že zkouška není zcela ukončená a většina jader je stále schopná dalšího provozu. Co se týče vizuálního zhodnocení, tak po dosažení určitého „zaběhnutí“ se jejich stav jeví stále stejný, resp. nemá zjevnou zhoršující se tendenci. Z tohoto důvodu je možné předpokládat, že životnost jader s J-C bude o mnoho vyšší. Jedinou výjimkou se stalo jádro 8.10, které bylo nutné 2 krát po cca 10000 cyklech vyměnit. Tato hodnota životnosti je přibližně o 40% nižší, než u jádra konvenčně chlazeného systémem Tribon. To, že konkrétně na toto jádro nemá chlazení J-C vliv je možné vysvětlit geometrií odlitku a umístěním naříznutí vtokového kanálu vůči jádru. Dochází zde k velmi rychlému proudění přehřáté taveniny, která částečně obtéká část jádra u paty. Díky tomu je jádro silně erozivně opotřebováváno v těchto místech. Tuto teorii potvrzují i výsledky ze simulace plnění v programu ProCAST. Zlepšení situace by se mohlo skrývat v použití tvrdší povrchové vrstvy s rozdílným chemickým složením, než je TiN a s menší povrchovou drsností, která by abrazivnímu opotřebení lépe odolávala. Hlavní příčinu nárůstu životnosti jader chlazených systémem J-C je možné vysvětlit jejich intenzivním chlazením, resp. až podchlazením. Díky tomu jádro ochladí povrchovou vrstvu předlitého otvoru, která rychle ztuhne a ve velmi krátké době se odtrhne od povrchu odlitku a vytvoří se plynová mezera. Tato mezera způsobí to, že jádro není namáháno dále v takové míře tepelně, ale ani mechanicky vlivem smrštění a vyjímání odlitku. Tímto intenzivním zachlazením se ve velké míře zredukovalo i nalepování hliníku na jádra, které má na životnost samozřejmě také negativní vliv. Jak bylo uvedeno, destrukce, či netěsnost jádra je jednou z hlavních příčin demontáže formy z licího stroje, čímž samozřejmě vznikají prostoje a další časové a finanční ztráty. Zvýšení životnosti jader by logicky tento jev mělo redukovat. V tab. 10 je přehled všech nasazení formy na licí stroj během experimentu. Průměrná životnost na jedno nasazení stejného typu formy bez J-C se pohybuje okolo 2700 cyklů. Průměrná životnost formy při této zkoušce dosáhla hodnoty 4940 cyklů, což se přibližuje dvojnásobné hodnotě. Pokud se však zohlední příčiny demontáže formy

během experimentu, jenž jsou také uvedeny v tab. 10, je zřejmé, že příčinou porušeného jádra se tak stalo pouze jednou a to díky jádru 8.10 (resp. dvakrát, když jádro 8.10 bylo vyměněno při údržbě formy preventivně z důvodu velmi špatného stavu). Ostatní demontáže této formy neměly s chlazením jader souvislost. Pokud se bude uvažovat pouze vliv jader na životnost formy na jedno nasazení na licí stroj, lze z těchto dílčích výsledků experimentu konstatovat, že je limitována životností jádra 8.10 a to cca 10000 cyklů. Na základě výše uvedených informací se jako rizikové a limitující jeví implementace chlazení J-C do tohoto jádra a proto je nutné na základě dalších výsledků stanovit, zda je toto jádro pro použití technologie J-C vhodné.

Důležitým kritériem pro posouzení tohoto chlazení byl vliv na kvalitu odlitku, jenž byla během experimentu sledována na několika úrovních. Jak je uvedeno v kapitole 3.2.5.1, díky plošné kontrole produkce odlitku pomocí RTG třikrát za směnu jde pouze kvalitativně konstatovat, že vnitřní kvalita odlitku při použití technologie chlazení J-C je velmi dobrá a také velmi stabilní oproti kvalitě odlitků litých bez této technologie, kdy v některých případech dochází k vysokým výkyvům v objemu vnitřních vad. Další úroveň kontroly kvality odlitku při tomto experimentu tvořila rentgenová tomografie. Zde se porovnával především vliv tohoto chlazení na kritické partie odlitku. Jedná se zejména o oblast jádra 6.31 (otvor 5B103), oblast okolo jader 9.12, 4.14 a 4.12, kde dochází díky tvorbě dutin k netěsnosti odlitku a dále potom oblast jader 2.9 a 2.13. Tyto partie jsou vyznačeny na obr. 42. Na základě analýzy snímků z tomografie lze konstatovat, že se se odlitky při experimentu v těchto partiích jeví jako kvalitnější a kompaktnější než odlitky produkované bez chlazení J-C. Porovnání snímků z rentgenové tomografie bez J-C a po jeho aplikaci je uveden na obr. 46.



Obr. 46 snímky odlitku z rentgenové tomografie – oblast jádra 6.31
vlevo – bez Jet-Cooling; vpravo – s Jet-cooling

Kvalita odlitků byla též sledována pomocí zpráv o zmetkovitosti od odběratele odlitků, kde se dále obráběly a komponovaly do sestavy motorů. I přesto, že v tab. 12 jsou hodnoty zmetkovitosti přepočítané koeficientem kvůli utajení důvěrných údajů, je z ní patrný klesající trend. Pro porovnání je v tabulce uvedena statistika formy s J-C a stejného typu forem bez J-C. Průměrná přepočítaná zmetkovitost těchto odlitků se dle tabulky pohybuje okolo 1,56%. Průměrná přepočítaná hodnota zmetkovitosti odlitků v průběhu experimentu dosahovala 0,98%, což znamená snížení zmetkovitosti produkce o 37%. Za povšimnutí stojí údaj z 1. nasazení formy, který je výrazně vyšší, než u ostatních nasazení během experimentu. Možná příčina se skrývá v tom, že v tomto období probíhala teprve optimalizace chladících parametrů a zapojení jader do společných okruhů, což mohlo mít vliv na jakost dílu. Pokud by se výsledek z tohoto nasazení zanedbal, průměrná přepočítaná hodnota zmetkovitosti by dosahovala 0,59%, což znamená snížení o 62%. Jak již bylo uvedeno výše v kapitole 3.2.5.2, nejedná se o celkovou kvalitu odlitku, nýbrž v případě povrchových vad, o kvalitu odlitku, která může být ovlivněna chlazením jader. Objem zkoušených dílů z tohoto experimentu je zatím relativně malý, proto je nutné ve sledování těchto údajů pokračovat a uvedené hodnoty potvrdit a dále zpřesňovat.

Poslední sledovaný aspekt byl přínos technologie z hlediska zvýšení produktivity. Do tohoto termínu je možné zahrnout všechny výše uvedené údaje. Pokud se bude jako produktivita uvažovat zkrácení licího cyklu a zvýšení produkce odlitků za časovou jednotku, bylo během tohoto experimentu dosaženo prozatím zkrácení licího cyklu ze 152s na 147s, kdy se zredukovala doba postřiku. Z termovizních měření po stabilizaci chladících parametrů, viz příloha 4, je zřejmé, že vlivem postřiku jsou některá zkoušená jádra místně ve vrchní části příliš zachlazená, např. jádro 2.13, 4.10 a 4.12. Proto by bylo vhodné dále optimalizovat proces postřiku a tím případně získat další zkrácení licího cyklu. Dále bylo dosaženo stabilnějšího licího procesu, což redukuje prostoje vzniklé nutností manuálního zásahu pracovníka do formy.

Navzdory všem uvedeným, převážně kladným výsledkům, je technologie J-C velmi choulostivá na údržbu a díky velmi malým průřezům kapilár v jádru i rozvodných hadiček je také tento systém velmi náchylný na znečištění a ucpání. Obzvláště ve slévárenském provozu je toto obtížné dodržet, proto je kázeň při zprovoznování systému nezbytná. Pokud dojde vlivem nečistoty k neprůchodnosti chladícího

okruhu, hrozí díky relativně tenkým stěnám jader jejich přehřátí a během několika pracovních cyklů dojde k destrukci jádra a popř. snížené kvalitě odlitku, čímž se v podstatě eliminují hlavní výhody tohoto systému. Další zjevný problém při aplikaci technologie J-C nastává při rozdělení většího počtu jader do společných chladících okruhů. Návrh je možné koncipovat dle postupu uvedeného v kapitole 3.2.4, avšak návrh je si ho ověřit termovizním měřením a průběžnou kontrolou stavu jader a kvality odlitku.

4. ZÁVĚR

Úkolem diplomové práce bylo provést praktickou zkoušku chlazení tenkých jader pomocí technologie Jet-Cooling a na základě výsledků ověřit, zda je vhodná pro chlazení formy bloku motoru v sériovém provozu slévárny ŠKODA AUTO a.s. Hlavní motivace pro zkoušku tohoto typu chlazení bylo zvýšení životnosti jader a s tím související zvýšení životnosti formy na jedno nasazení na licí stroj. Další očekávaný přínos tkví ve zvýšení jakosti a potlačení vnitřních vad v kritických partiích odlitku. Zlepšení těchto aspektů bude mít pozitivní vliv na produktivitu a kvalitu produkce a zredukuje prostoje a náklady vzniklé při korekci, opravě nebo demontáži formy.

Tato práce je členěna na dvě části. První část teoretická, která obsahuje problematiku tlakového lití se zaměřením na metody, materiály a specifika používané ve slévárně a nářadovně ŠKODA AUTO a.s., potažmo použité při experimentu v praktické části práce. Podrobněji jsou zde uvedeny informace týkající se temperování a chlazení tlakových licích forem a jejich jader. Druhá část práce je část experimentální, kde se v úvodu nachází stručné seznámení s technologií Jet-Cooling a dále popisuje celý průběh provedené zkoušky, použité měřicí a zkušební metody a dosažené výsledky, na základě kterých byly na konci formulovány dílčí závěry.

Příprava experimentu obnášela volbu formy, v tomto případě formu pro blok motoru EA211 1,2TSi a dle stanovených kritérií bylo vybráno 16 jader, do kterých bylo zapojeno chlazení Jet-Cooling. Na základě volby počtu jader se zvolil vhodný typ chladicího agregátu, provedla se zástavba systému do konstrukce formy a jednotlivých jader. Samotný experiment probíhal ve standardním sériovém provozu. Jako důležitá fáze návrhu tohoto systému se ukázala být optimalizace chladících parametrů a zapojení jader do společných chladících okruhů, kdy bylo využito četných termovizních měření povrchu formy a kontroly vnitřní kvality odlitku pomocí rentgenové tomografie. Tato část diplomové práce může posloužit jako podklad a metodika při případném návrhu další licí formy s použitou technologií Jet-Cooling a při její optimalizaci.

V době, kdy vznikala tato diplomová práce, nebyl experiment zcela ukončen, proto je možné konstatovat pouze dílčí výsledky. Ty dokazují pozitivní vliv chlazení Jet-Cooling na všechny sledované aspekty. Nesporný je účinek tohoto systému na životnost jader, kde se až na jednu výjimku dosáhlo zvýšení jejich životnosti a tato

jádra jsou v současné době stále schopná provozu. Jelikož životnost formy na jedno nasazení na licí stroj souvisí přímo s životností jednotlivých jader, byl zaznamenán velmi optimistický výsledek i zde. V tomto směru se zde projevilo jedno jádro jako limitující a proto je nutné na základě dalších výsledků rozhodnout, zda je pro implementaci technologie Jet-Cooling vhodné. V průběhu experimentu bylo dosažené zvýšení jakosti odlitků v kritických partiích, což dokazuje sledování produkce pomocí RTG a počítačové tomografie, statistiky zmetkovitosti a porovnání mikrostruktury. Všechny získané hodnoty během experimentu byly konfrontovány s výsledky bez použití systému Jet-Cooling.

Experiment představoval první zkušenost s tímto chlazením ve firmě ŠKODA AUTO a.s. Jak získané výsledky dokládají, tak použití této technologie má jistě své opodstatnění, zejména tam, kde z důvodu malých rozměrů některých jader nelze použít chlazení konvenční. Nicméně provoz tohoto systému a jeho zprovoznění si klade zvýšené nároky na čistotu a pracovní kázeň, což je ve slévárenském provozu častokrát obtížné dodržet. Další nevýhodu lze spatřovat v možné hrozbě vzniku prostojů při licím procesu zapříčiněné potencionální závadou na dalším zařízení v licí buňce – chladicím agregátu Jet-Cooling. Tento případ však dosud nastal jen zřídka. V další fázi zkoušky je nutné se zaměřit na vyhodnocení konečné životnosti jednotlivých jader a dále pokračovat ve sledování kvality odlitku, která by se měla uvádět do souvislostí s nastavenými chladicími parametry a termovizními měřeními. Jistý potenciál lze také nalézt v optimalizaci fáze postřiku, což by mohlo přinést další zkrácení licího taktu.

Pro sériové nasazení této technologie v provozu slévárny ŠKODA AUTO a.s. je nutné dovybavení každé licí buňky chladicím agregátem a příprava rozvodů chladicího média po licím stroji. Cena nové formy pro blok motoru s technologií J-C je cca o 6% vyšší a dále se zvýší náklady na speciální a tím pádem dražší spotřební materiál nutný pro provoz tohoto chlazení. Jelikož jádra chlazená systémem J-C již nyní vykazují zvýšenou životnost, předpokládá se úspora nákladů na jejich náhradní díly. Z dlouhodobého hlediska se dále očekávají úspory nákladů vzniklé snížením prostojů při licím procesu, zkrácením licího cyklu a snížením zmetkovitosti odlitků. Vzhledem k tomu, že zkouška není v současné době ukončena, nelze případné úspory zatím přesně vyčíslit.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ

- [1] ŠKODA AUTO a.s. *Firemní dokumentace pro tlakové lití hliníku*. 2015.
- [2] RAGAN, Emil. *Liatie kovov pod tlakom*. Prešov: Fakulta výrobných technológií so sídlom, 2007. ISBN 978-808-0739-799.
- [3] VALECKÝ, Jindřich. *Lití kovů pod tlakem*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963.
- [4] LAUDÁR, Ján. *Liatie pod tlakom*. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1964.
- [5] ČSN EN 1706. *Hliník a slitiny hliníku: Odlitky - Chemické složení a mechanické vlastnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [6] Metal Ravne [online]. 2014 [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: www.metalravne.com
- [7] VÚHŽ a.s. [online]. 2011 [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: www.vuhz.cz
- [8] WARMUZEK, M. *Aluminium-Silicon Casting Alloys : Atlas of Microfractography*. 1. vyd. USA: ASM International, 2004. 124 s. ISBN 0-87170-794-2.
- [9] ROLEČEK, Jakub. *Mechanické vlastnosti a struktura slitiny hliníku po tepelném zpracování*. Brno, 2012. Bakalářská práce. VUTB. Vedoucí práce Martin Juliš.
- [10] TUL - KATEDRA STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE. *Výroba odlitků ze slitin hliníku [online]*. 2012 [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/MV-cv_3.pdf
- [11] POLÁK, Josef a Jindřich TALLA. *Licí stroj* [patent]. Patentový spis, 30050. Uděleno 15.1.1929.
- [12] Tribon *Návod k obsluze zařízení Tribon: typ 2408-03-N*. 2008.
- [13] *Sdílení tepla* [online]. 2015 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <https://vscht.cz/uchi/ped/chi/chi.ii.text.k16.sdileni.tepla.pdf>

- [14] Die Cooling. *Ahresty Techno Service Corporation* [online]. 2010 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.ahresty-tec.jp>
- [15] DRÁBEK, Martin: *Teplotní režim tlakové licí formy při odlévání slitin na bázi Al-Si*. [Diplomová práce]. KSP-FS, TU v Liberci, 2005
- [16] VUTBR. *Termovizní měření* [online]. 2010 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: http://midas.uamt.feec.vutbr.cz/APV/exercises-pdf/03_Termovizni_mereni.pdf
- [17] LETHIGUEL. *Jet-Cooling* [online]. 2014 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://lethiguel.org>
- [18] NOVÁ, Iva. 2014. *Přenos tepla ve slévárenských formách*. Vyd. 1. V Liberci: Technická univerzita, 154 s. ISBN 978-80-7494-141-2.

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr. 1 Schéma licího stroje z patentového spisu Ing. Poláka [11]	13
Obr. 2 Vlevo – Lisování kovu pístem; vpravo – Lisování kovu vzduchem [2].....	15
Obr.3 Vlevo – S vertikální komorou; Vpravo – S horizontální komorou [2].....	16
Obr.4 Schéma licího stroje s horizontální studenou komorou [2]	16
Obr.5 Příklad lisovací křivky [1]	17
Obr.6 Licí cyklus – krok 1[10].....	18
Obr.7 Licí cyklus – krok 2[10].....	18
Obr.8 Licí cyklus – krok 3[10].....	18
Obr.9 Licí cyklus – krok 4[10].....	19
Obr.10 Licí cyklus – krok 5[10].....	19
Obr.11 Licí cyklus – krok 6[10].....	19
Obr.12 Konstrukce tlakové licí formy pro blok motoru [1].....	21
Obr.13 Síťové trhliny a nalepený hliník na licí formě	22
Obr.14 Závislost mechanických veličin na teplotě materiálu 1.2343 [6]	24
Obr.15 Přehled vlastností, chem. složení a pracovních teplot povlaků VÚHŽ [7]....	25
Obr.16 Blok motoru – místa lokálního dotlaku[1]	26
Obr.17 Vložka a razník lokálního dotlaku[1]	26
Obr.18 Binární fázový diagram Al-Si [8]	27
Obr. 19 Vnitřní chlazení tvarové části formy	32
Obr. 20 Chlazení sondami s přepážkou.....	33
Obr. 21 Chlazení sondami s trubičkou	33
Obr. 22 Chlazení sondami se spirálou.....	33
Obr. 23 Rozvody chladícího media[1]	34
Obr. 24 Chlazení jádra	35
Obr. 25 Intenzita ochlazování při těsném styku odlitku a formy[18]	38
Obr. 26 Intenzita ochlazování při styku odlitek– mezera - forma[18].....	38

Obr. 27 Schema formy s vyznačením tepelné bilance[15]	39
Obr. 28 Příklady modulů softwaru ProCAST	40
Obr. 29 Průtoky používanými kapilárami [14]	44
Obr. 30 Závislost součinitele přestupu tepla α a intenzity přestupu tepla q_w při varu na rozdílu teplot varného povrchu α vroucí kapaliny Δt ve dvojtých logaritmických souřadnicích [13].....	45
Obr. 31 Příklady výběru vhodných jader pro zkoušku technologie Jet-Cooling	48
Obr. 32 Zařízení HDK 4-20	48
Obr. 33 Jádro a cooler	49
Obr. 34 CT měření dodaných jader – pos. 8.10	50
Obr. 35 Porovnání koncepce jádra Jet-Cooling s konvenčním jádrem.....	50
Obr. 36 Schéma zapojení systému Jet-Cooling.....	51
Obr. 37 Termovizní měření.....	53
Obr. 38 Graf teploty jádra 4.14 (dolní-spojka)před nanesením separátoru v závislosti na změně parametrů chlazení J-C	57
Obr. 39 Graf teploty jádra 8.10 před nanesením separátoru v závislosti na změně parametrů chlazení J-C.....	57
Obr. 40 Stav jádra posice 8.10 po 9 500 cyklech.....	59
Obr. 41 Ulomené jádro J-C pos. 8.10 po 10500 cyklech	59
Obr. 42 CT snímky odlitku s vyznačenými kritickými partiemi a jádry J-C.....	62
Obr. 43 Tvrdost slitiny v závislosti vzdálenosti od povrchu otvoru	64
Obr. 44 Mikrostruktura odlitku při použití nechlazeného jádra a jádra J-C.....	65
Obr. 45 Detail mikrostruktury.....	65
Obr. 46 Snímky odlitku z rentgenové tomografie – oblast jádra 6.31	67
Tab.1 Materiály pro výrobu tlakové licí formy[1]	23
Tab.2 Chemické složení materiálu 1.2343 [6]	24
Tab. 3 Mechanické vlastnosti slitiny AlSi9Cu3(Fe) [5]	28
Tab. 4 Chemické složení slitiny AlSi9Cu3(Fe)	29
Tab.5 Přivedená a odvedená tepelná energie ze soustavy forma - odlitek.....	39

Tab.6 Technické parametry zařízení HDK 4-20	49
Tab. 7 Rozdělení jader do okruhů a první nastavení parametrů chlazení	54
Tab. 8 Průběh optimalizace chladících parametrů J-C.....	55
Tab. 9 Přepojení chladících okruhů pro zlepšení teplotního pole jader.....	56
Tab. 10 Přehled nasazení formy s technologií J-C.....	58
Tab. 11 Přehled životností jader bez a s J-C	61
Tab. 12 Zmetkovitost produkce odlitku s technologií J-C a bez ní	63

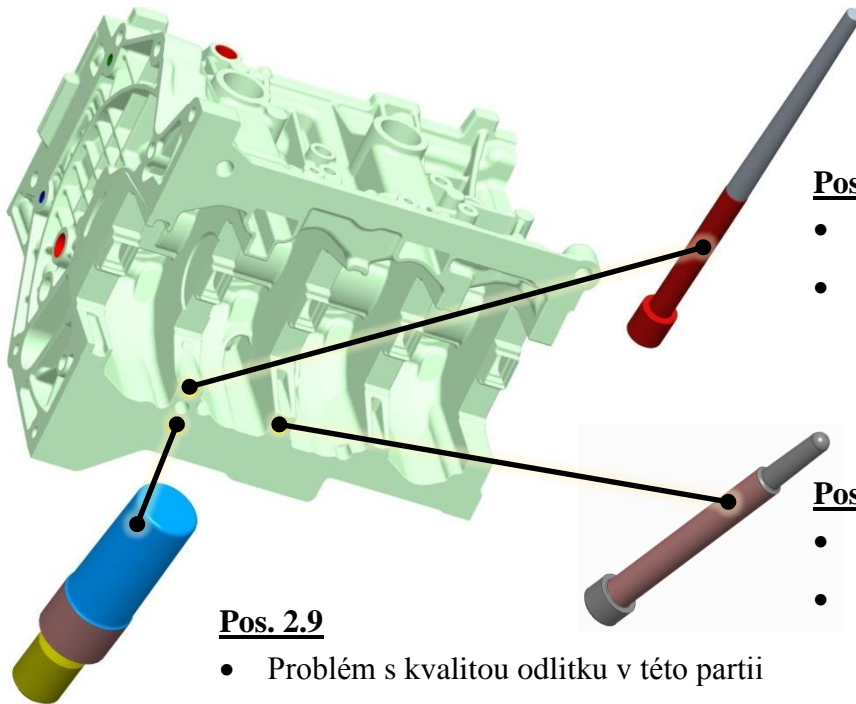
SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Výběr jader pro provedení zkoušky chlazení Jet-Cooling
- Příloha 2 Termovizní měření formy před aplikací technologie J-C
- Příloha 3 Naměřené teploty jader během optimalizace parametrů chlazení
- Příloha 4 Termovizní měření formy po aplikaci J-C a optimalizaci parametrů

PŘÍLOHY K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Příloha 1

Výběr jader pro provedení zkoušky chlazení Jet-Cooling 1/2



Pos. 2.13

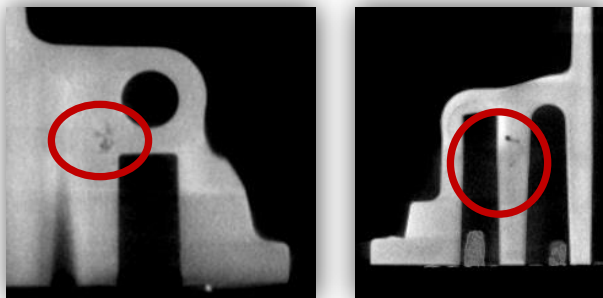
- Problém s nízkou životností jádra
- Průměrná životnost = 10000 cyklů

Pos. 2.8

- Problém s nízkou životností jádra
- Průměrná životnost = 14500 cyklů

Pos. 2.9

- Problém s kvalitou odlitku v této partii
- Průměrná životnost se nesleduje

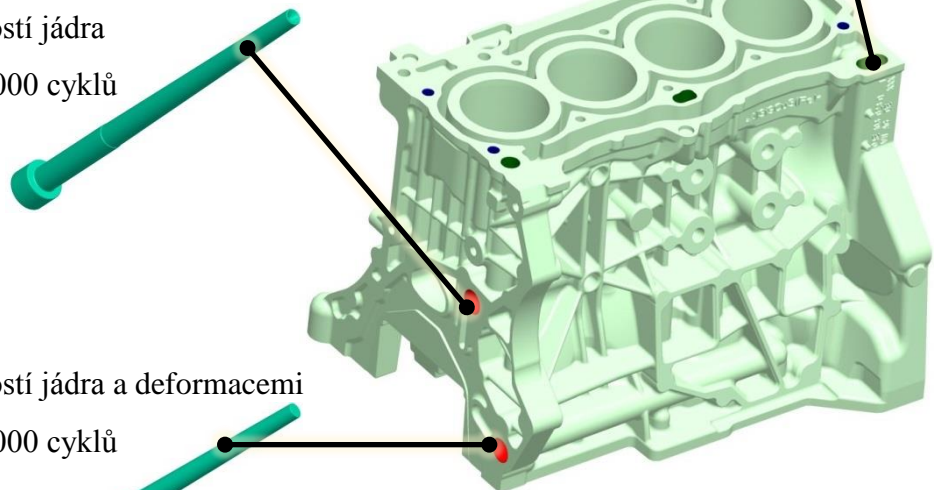


Pos. 4.10

- Problém s velkými deformacemi jádra

Pos. 8.9

- Problém s nízkou životností jádra
- Průměrná životnost = 12000 cyklů

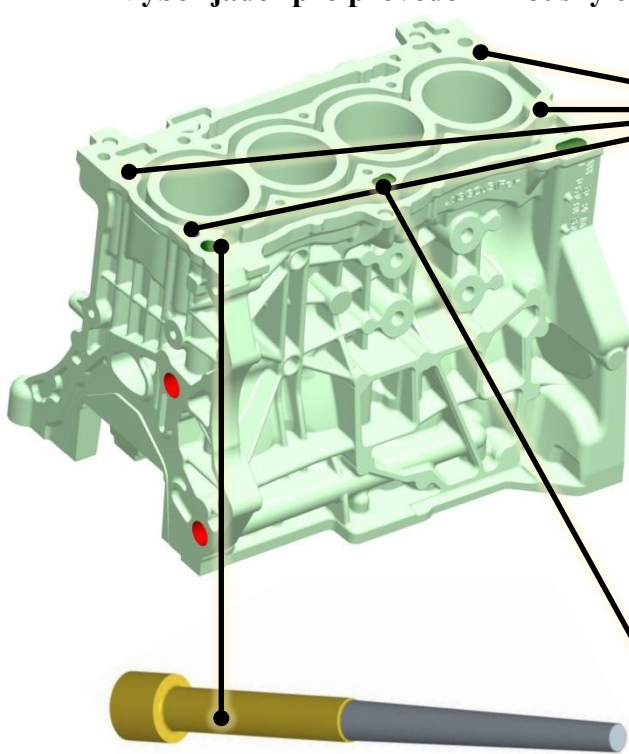


Pos. 8.10

- Problém s nízkou životností jádra a deformacemi
- Průměrná životnost = 17000 cyklů

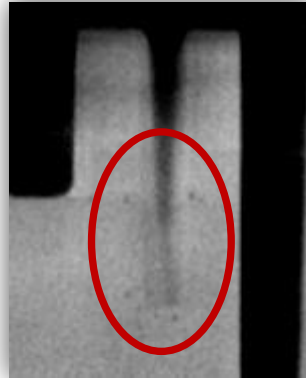
Příloha 1

Výběr jader pro provedení zkoušky chlazení Jet-Cooling 2/2



Pos. 4.14

- Problém s kvalitou odlitku v této partii
- Problém s nalepováním hliníku



Pos. 4.12

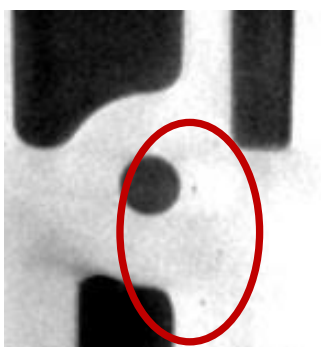
- Problém s kvalitou odlitku v této partii
- Problém nízkou životností = 18000 cyklů

Pos. 4.11

- Problém s kvalitou odlitku v této partii

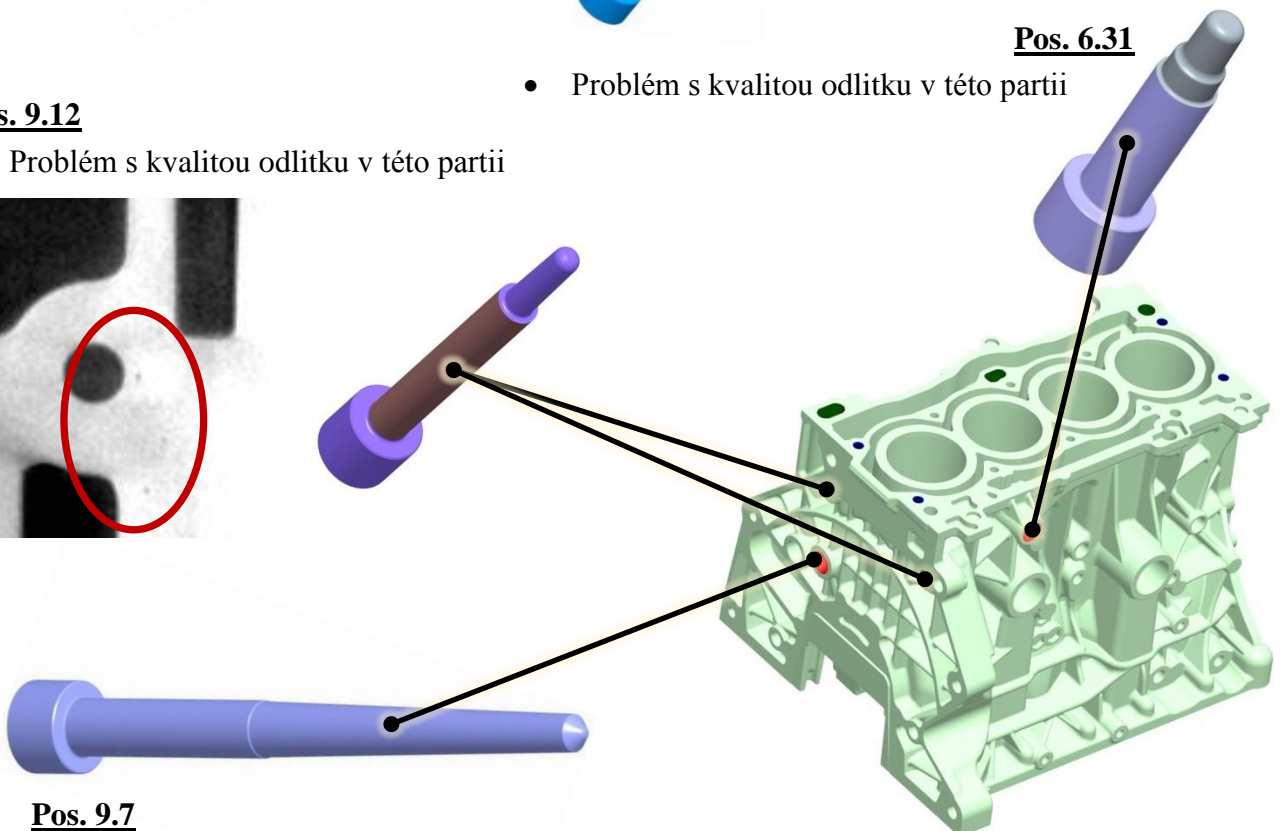
Pos. 9.12

- Problém s kvalitou odlitku v této partii



- Problém s kvalitou odlitku v této partii

Pos. 6.31



Pos. 9.7

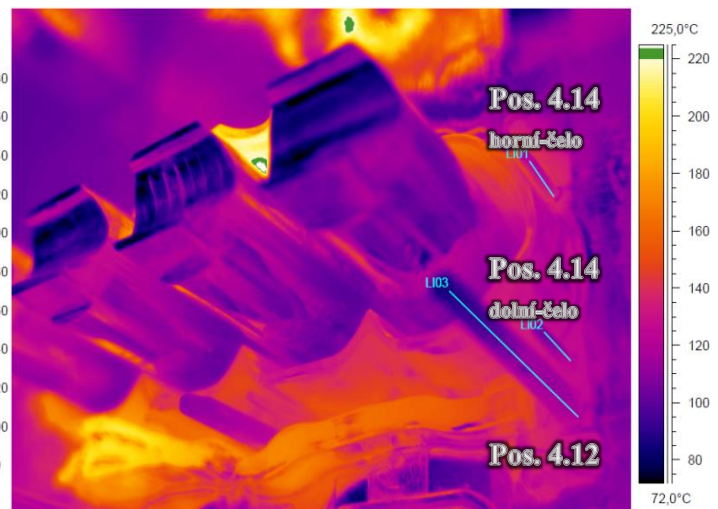
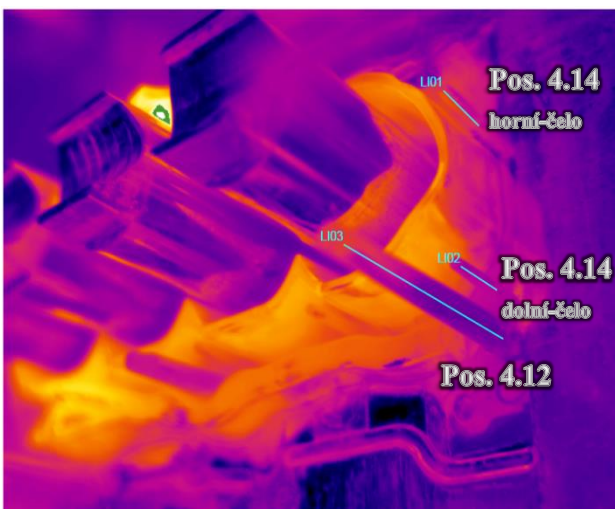
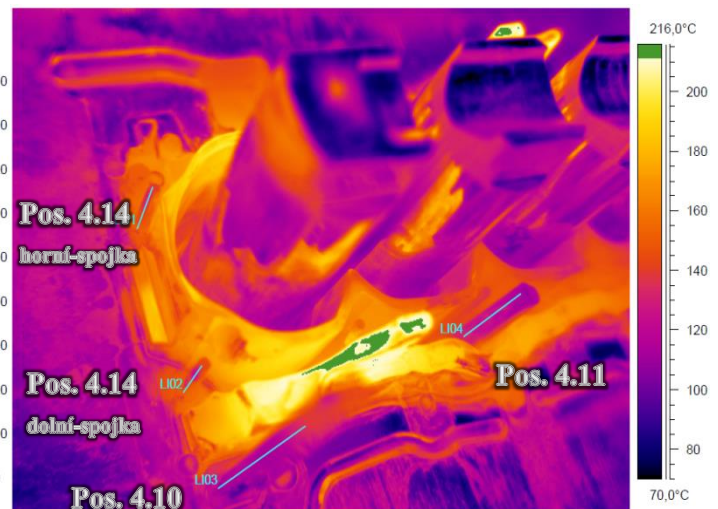
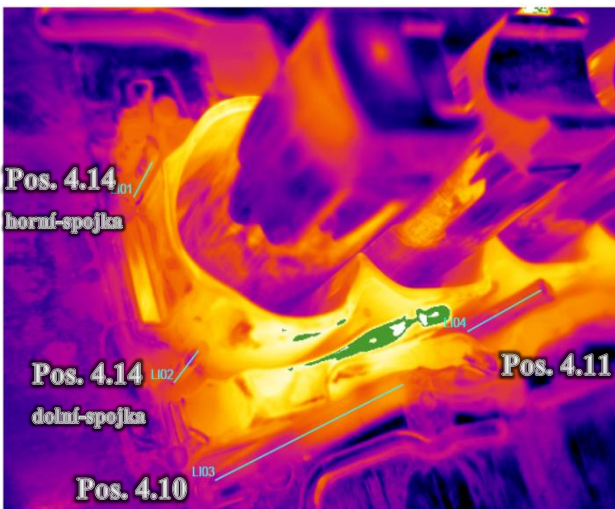
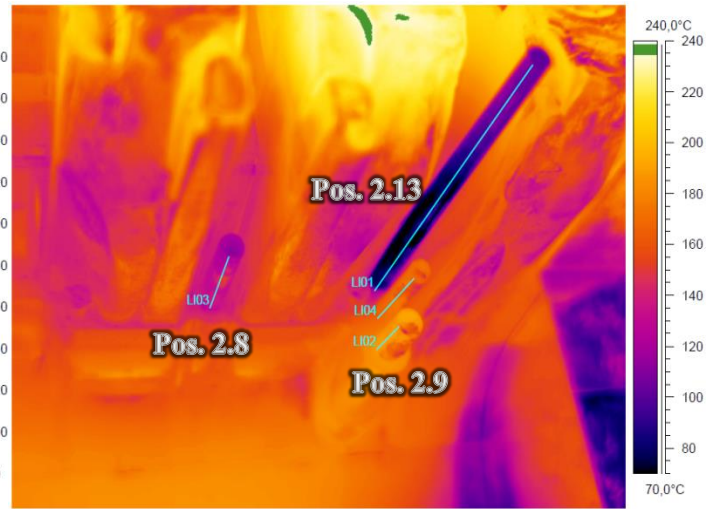
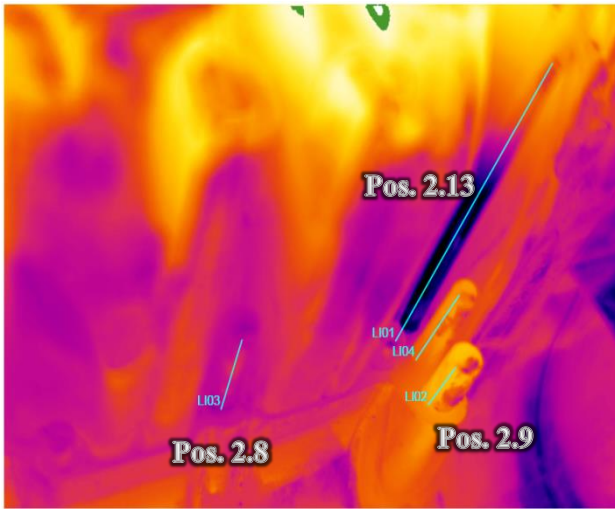
- Problém s nízkou životností a s nalepováním hliníku
- Problém s nízkou životností = 17500 cyklů

Příloha 2

Termovizní měření formy před aplikací technologie J-C 1/2

Před postřikem

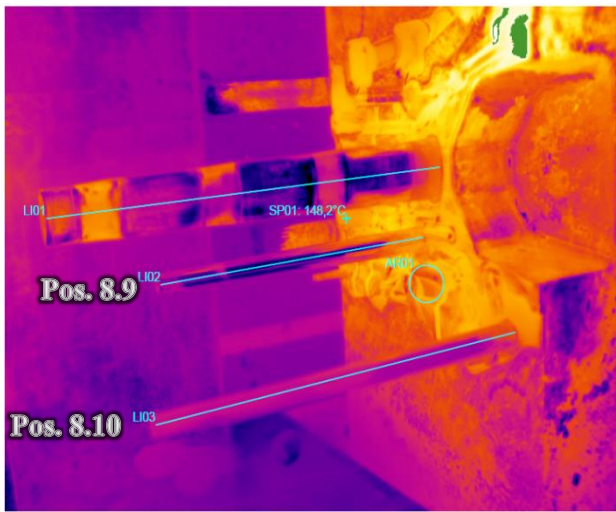
Po postřikem



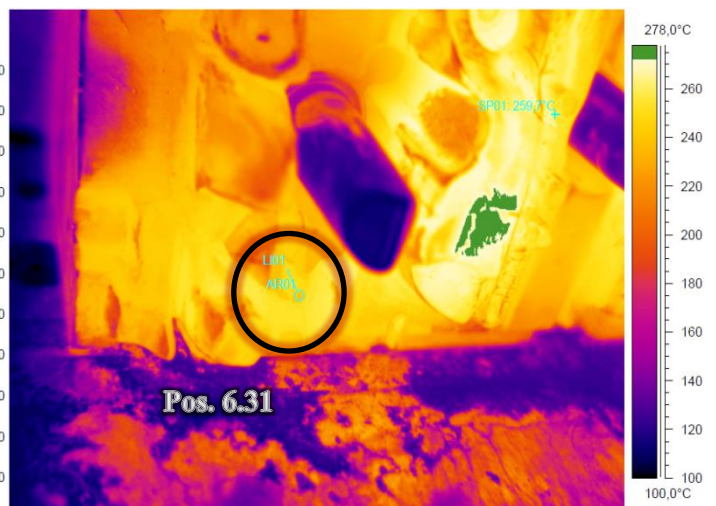
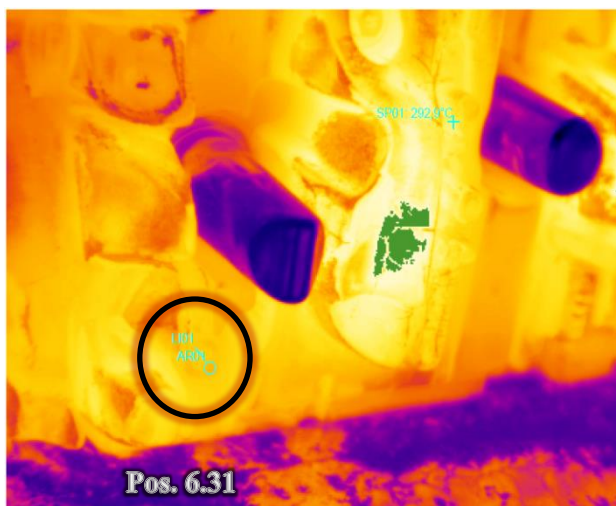
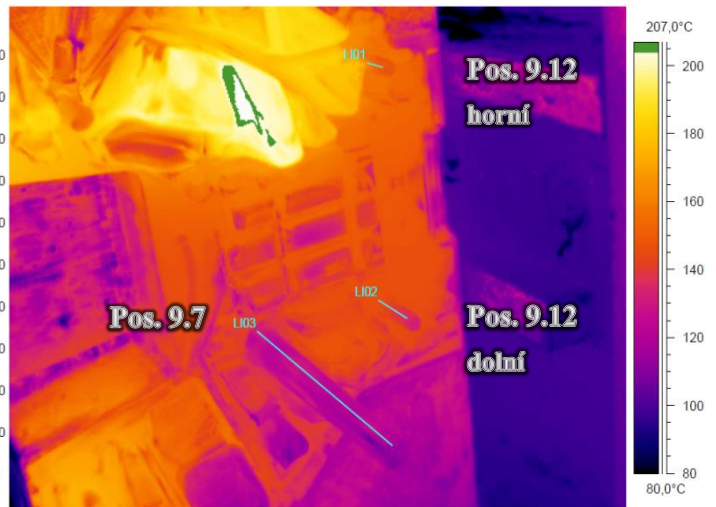
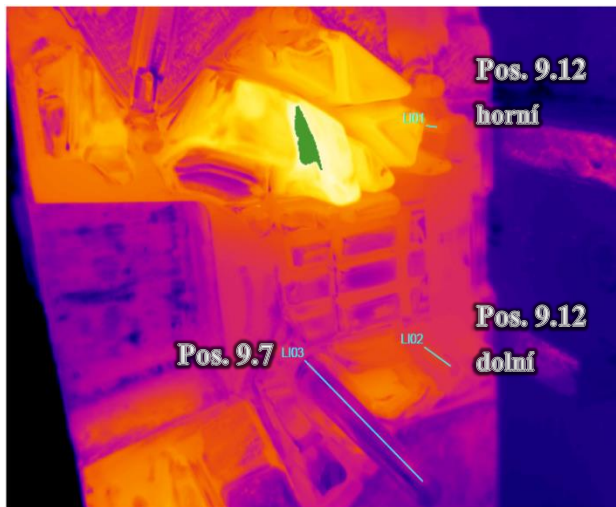
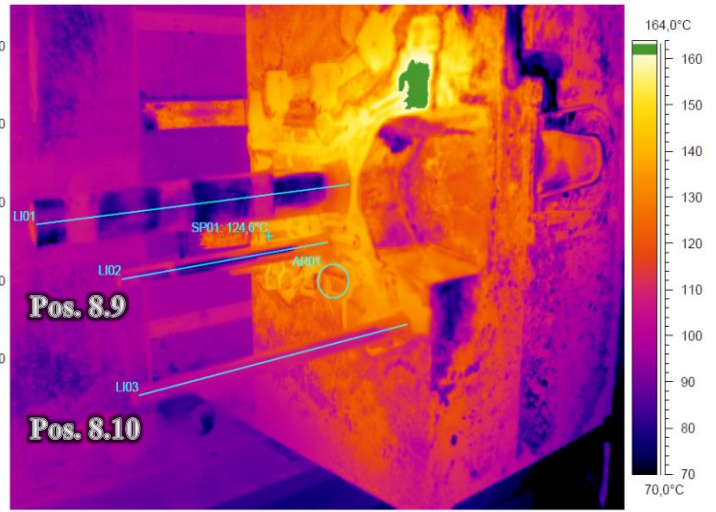
Příloha 2

Termovizní měření formy před aplikací technologie J-C 2/2

Před postřikem



Po postřiku



Příloha 3

Naměřené teploty jader během optimalizace parametrů chlazení

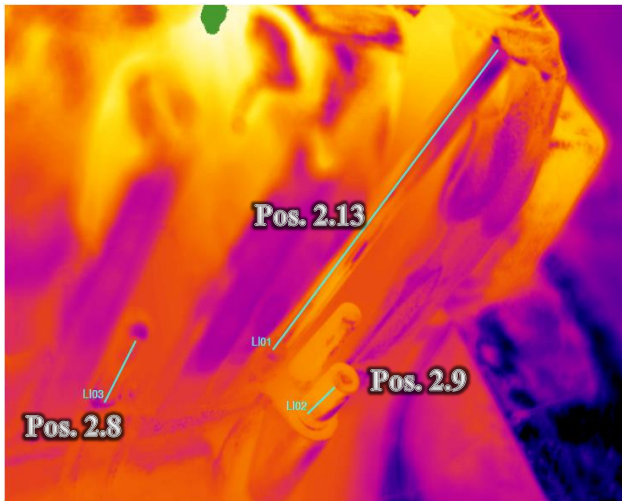
Pos. Jádra	Postfix	Bez J-C		1.nastavení		2.nastavení		3.nastavení		4.nastavení	
		min. [°C]	max. [°C]	min. [°C]	max. [°C]	min. [°C]	max. [°C]	min. [°C]	max. [°C]	min. [°C]	max. [°C]
28	před	160	180	neměřeno	neměřeno	160	180	180	190	170	190
	po	140	140	neměřeno	neměřeno	150	170	150	160	120	150
29	před	220	240	100	130	180	190	190	200	200	210
	po	180	180	95	120	150	160	145	160	145	155
213	před	80	200	100	160	120	160	160	170	160	200
	po	70	125	80	110	80	120	85	125	100	140
4.14 (horní-želo)	před	160	180	110	115	130	130	140	155	150	170
	po	130	140	100	110	100	105	100	110	100	110
4.14 (horní-spojka)	před	180	210	100	120	125	140	120	155	140	170
	po	130	150	90	115	100	110	105	110	120	120
4.14(dolní-želo)	před	140	140	90	110	115	125	110	130	115	140
	po	110	130	neměřeno	neměřeno	90	105	95	105	100	105
4.14(dolní-spojka)	před	180	200	115	120	120	130	110	160	110	150
	po	140	140	90	105	100	115	100	120	110	120
4.10	před	160	210	140	160	140	170	160	180	160	200
	po	110	140	90	120	90	110	90	110	100	110
4.11	před	160	180	160	175	230	250	240	250	240	260
	po	120	130	110	125	110	120	120	130	115	145
4.12	před	120	180	95	115	140	140	130	130	135	150
	po	90	120	95	115	85	100	95	100	100	110
8.9	před	100	150	80	140	120	170	160	180	160	180
	po	90	130	70	120	80	120	90	130	105	140
8.10	před	110	130	60	95	120	155	130	160	130	160
	po	100	120	50	100	60	120	90	130	90	110
9.7	před	140	150	130	130	160	180	180	220	200	245
	po	115	130	100	120	110	130	140	140	140	150
9.12(horní)	před	200	200	150	160	170	180	190	210	190	200
	po	150	160	140	150	140	140	145	145	140	140
9.12(dolní)	před	170	180	100	140	135	145	155	160	150	160
	po	135	150	100	120	120	125	125	130	140	140
6.31	před	250	270	150	170	220	230	245	245	250	255
	po	240	250	140	150	180	190	190	200	200	210

Po přepojení jader	Pos. Jádra	Postfix	Bez J-C		5.nastavení		6.nastavení	
			min. [°C]	max. [°C]	min. [°C]	max. [°C]	min. [°C]	max. [°C]
			28	před	160	180	130	150
	po	140	140	105	120	110	120	
29	před	220	240	150	155	150	160	
	po	180	180	120	125	120	130	
213	před	80	200	100	150	130	150	
	po	70	125	100	120	100	130	
4.14 (horní-želo)	před	160	180	120	150	140	155	
	po	130	140	110	115	100	110	
4.14 (horní-spojka)	před	180	210	130	175	140	155	
	po	130	150	110	115	110	120	
4.14(dolní-želo)	před	140	140	130	150	120	150	
	po	110	130	100	100	85	115	
4.14(dolní-spojka)	před	180	200	135	160	130	150	
	po	140	140	115	120	105	110	
9.12(dolní)	před	170	180	150	160	145	150	
	po	135	150	120	130	120	130	
6.31	před	250	270	290	300	260	279	
	po	240	250	200	220	200	210	
4.12	před	120	180	140	185	150	185	
	po	90	120	90	110	90	110	
8.9	před	100	150	170	230	210	240	
	po	90	130	120	140	140	150	
8.10	před	110	130	160	190	150	185	
	po	100	120	100	120	120	135	
9.7	před	140	150	200	240	170	210	
	po	115	130	140	150	120	135	
4.10	před	160	210	140	180	140	175	
	po	110	140	85	105	90	110	
4.11	před	160	180	240	270	200	230	
	po	120	130	155	155	125	140	
9.12(horní)	před	200	200	180	190	155	170	
	po	150	160	130	140	135	140	

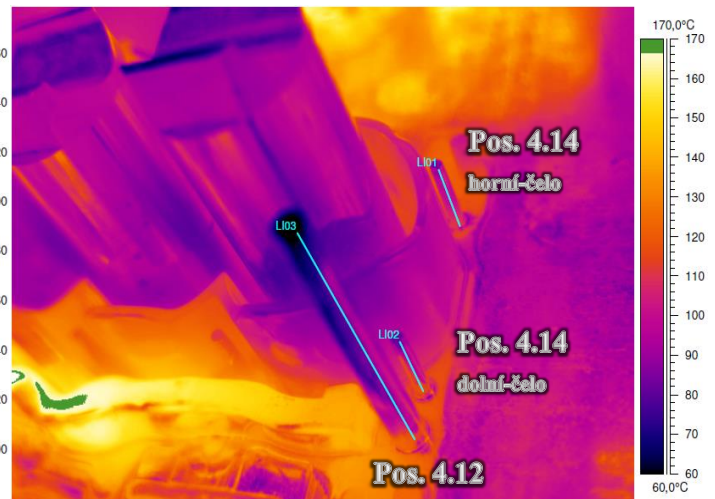
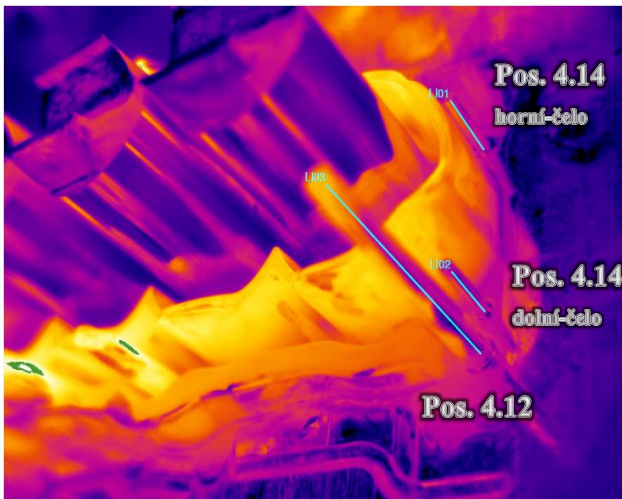
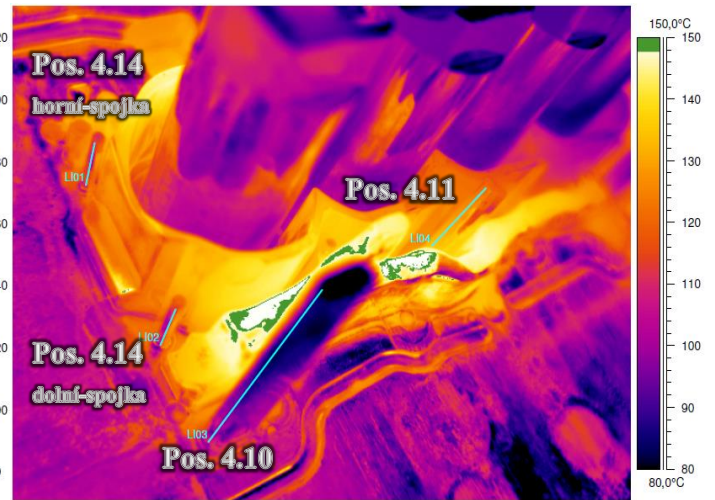
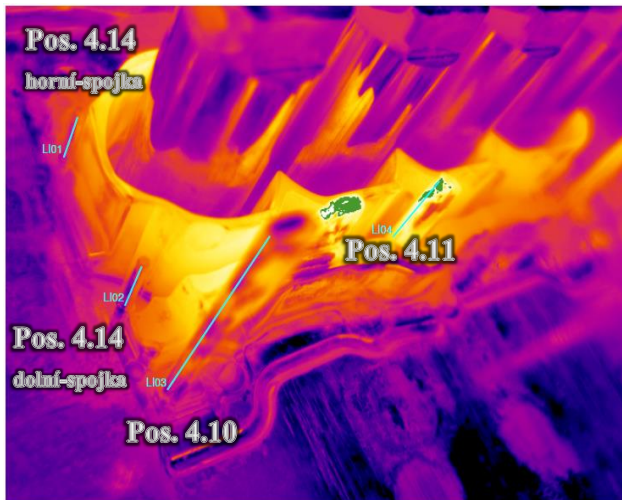
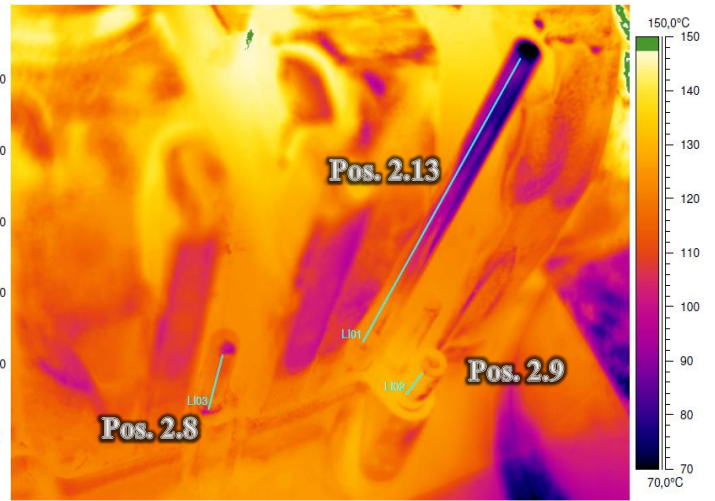
Příloha 4

Termovizní měření formy po aplikaci J-C a optimalizaci parametrů 1/2

Před postřikem



Po postřiku



Příloha 4

Termovizní měření formy po aplikaci J-C a optimalizaci parametrů 2/2

Před postřikem

Po postřiku

