



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ZAVEDENÍ MIKROPOSTŘIKU FOREM DO PODMÍNEK TLAKOVÉ SLÉVÁRNY

INTRODUCTION OF SPECIAL DIE LUBRICANT - MICRO SPRAYING INTO THE CONDITIONS OF HIGH
PRESSURE DIE FOUNDRY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Šromota

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Michal Šromota**
Studijní program: Slévárenská technologie
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

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

Zavedení mikropostříku forem do podmínek tlakové slévárny

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Použití mikropostříku jako externího chlazení tlakových forem je novým a moderním trendem, který by měl přinést úspory ekonomické, zvyšovat kvalitu finálních odlitků a prodlužovat životnosti tlakových licích forem. Jeho zavedení však představuje změnu v konceptu vnitřního chlazení forem a změnu určitých procesních parametrů. V současné době chybí metodika, která by komplexně popisovala všechny aspekty a nutné změny, se kterými slévárny při zavedení tohoto řešení musí počítat.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je zmapovat procesy, které je nutné ve slévárně tlakového lité hliníkových slitin změnit tak, aby bylo možné úspěšně realizovat použití mikropostříku. Práce bude obsahovat:

- rozbor jednotlivých procesů tlakového lité, které jsou implementací mikropostříku ovlivněny,
- rozbor teplotního pole formy pomocí numerické simulace na vytypovaném odlitku,
- vyhodnocení použití mikropostříku na vytypovaném odlitku.

Seznam doporučené literatury:

VINARCIK, E.J. High integrity die casting processes. New York: Wiley, c2003. ISBN 978-0-4712-0131-1.

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

NOVÁ, I. Tepelné procesy ve slévárenských formách. Liberec: Technická univerzita, 2002. ISBN 80-7083-662-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

.....

Ing. Jan Zouhar,
Ph.D.
ředitel ústavu

.....

doc. Ing. Jaroslav Katolický,
Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce, sestávající z teoretické a praktické části, se zabývá problematikou vysokotlakého lití, konkrétně ošetřením formy s využitím technologie mikropostřiku. Cílem diplomové práce bylo zmapovat procesy, které je nutné ve slévárně vysokotlakého lití změnit tak, aby bylo možné úspěšně realizovat použití mikropostřiku. Praktická část popisuje zavedení technologie mikropostřiku ve slévárně KOVOLIT Modřice a.s. V tomto případě se jedná o přístup, při kterém dochází k přechodu z konvenčního způsobu postřiku na již zmíněný mikropostřik. Po provedeném testování bylo na vytypovaném odlitku dosaženo jak stabilní produkce, tak i očekávaných úspor spjatých s provozováním mikropostřiku, a proto bylo rozhodnuto přejít při výrobě vytypovaného odlitku na tuto technologii.

Klíčová slova

vysokotlaké lití, dělicí prostředek, standardní postřik, mikropostřik, temperace formy, simulace teplotního pole

ABSTRACT

The master thesis, consisting of a theoretical and practical part, focuses on the issue of high pressure die casting, specifically the treatment of the die using micro spray technology. The goal of the thesis was to map the processes that need to be changed in the high pressure die casting foundry in order to successfully implement the use of micro-spraying. The practical part describes the introduction of micro spray technology in the foundry KOVOLIT Modřice a.s. In this case a transition from the conventional spraying method to the micro-spraying is made. After testing, both stable production and the expected savings associated with the operation of micro-spraying were achieved on the selected casting, and therefore it was decided to convert the production of the selected casting to this technology.

Key words

high pressure die casting, die lubricant, conventional spraying, micro-spraying, die temperature regulation, temperature field simulation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠROMOTA, Michal. Zavedení mikropostřiku forem do podmínek tlakové slévárny [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139813>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Vladimír Krutiš.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Zavedení mikropostřiku forem do podmínek tlakové slévárny vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

V Brně dne 20. května 2022

Bc. Michal Šromota

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Vladimíru Krutišovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Děkuji také celému technologickému oddělení ze slévárny KOVOLIT Modřice a.s. a pracovníkům firmy Šebesta-slужby slévárnám s.r.o. spolupracujících při zavádění mikropostřiku za poskytnuté materiály a rady. Velký dík patří také panu Ing. Zbyňku Kuzmovi za rady při tvorbě simulace. Rád bych také poděkoval své rodině, která mě podporovala jak u psaní této práce, tak během celého studia.

OBSAH

Úvod.....	9
1 Vysokotlaké lití	10
1.1 Popis vysokotlakého lícího stroje.....	11
1.2 Výrobní cyklus tlakového lití.....	13
1.2.1 Dávkování tekutého kovu.....	13
1.2.2 Lisování.....	13
1.2.3 Vyjímání odlitku	14
1.2.4 Ošetření formy a lícího pístu.....	14
2 Forma pro vysokotlaké lití	15
2.1 Materiál formy.....	15
2.2 Konstrukce formy.....	17
2.3 Výroba forem	17
2.4 Vady tlakové lící formy.....	18
2.4.1 Trhliny.....	18
2.4.2 Letování.....	19
2.4.3 Eroze.....	20
2.4.4 Koroze	20
2.5 Životnost formy.....	20
3 Tepelná bilance formy.....	21
3.1 Termoregulace formy.....	23
3.1.1 Chlazení jader.....	26
4 Ošetření formy.....	31
4.1 Leidenfrostův jev.....	32
4.2 Dělicí prostředky	33
4.2.1 Minerální oleje	34
4.2.2 Esterové oleje	34
4.2.3 Silikonové oleje.....	34
4.2.4 Vosky	34
4.2.5 Dělicí prostředky s povrchově aktivními látkami	34
4.3 Technologie postřiku.....	35
5 Mikropostřík.....	39
5.1 Zařízení pro technologii mikropostřiku.....	40
6 Praktická část.....	43
6.1 Popis technologie při konvenčním způsobu postřiku.....	43
6.2 Temperace formy	46
6.2.1 Schéma temperace pevné poloviny	46
6.2.2 Schéma temperace pojízdné poloviny	47
6.2.3 Schéma temperace tahačů jader	47
6.3 Popis technologie při mikropostřiku	48
6.3.1 Testování mikropostřiku	54
6.4 Shrnutí výsledků.....	62
6.5 Metodika zavádění technologie mikropostřiku	63
Závěr.....	64
Seznam použitých zdrojů	65
Seznam použitých symbolů a zkratk	68
Seznam příloh.....	70

ÚVOD

Technologie vysokotlakého lití patří mezi nejproduktivnější metody výroby rozměrově i hmotnostně menších odlitků z hliníkových slitin a tvoří samostatný obor slévárenské technologie, který se zásadně odlišuje od klasické výroby odlitků do pískových forem. Umožňuje vytvářet tenkostěnné a tvarově složité díly v úzké rozměrové toleranci s dobrou kvalitou povrchu. Krátké výrobní časy přispívají k vysoké produktivitě této metody, která je využívána především v automobilovém průmyslu.

Nedílnou součástí technologie vysokotlakého lití je ošetření líce formy, jehož hlavním úkolem je usnadnit vyjímání odlitku a zabránit nalepování kovu na formu během tuhnutí, dále k mazání pohyblivých částí formy (jádra, vyhazovače apod.) a při použití vodou ředitelných mazadel také k ochlazení povrchu formy. Moderním trendem je v tomto směru použití technologie mikropostřiku, která využívá k postřiku formy pouze čistý koncentrát mazadla ve velmi malé dávce. Aplikace této nové metody ošetření by měla přinést ekonomické úspory, snížit zátěž na životní prostředí absencí odpadních vod, a především prodloužit životnost tlakových licích forem. Zavedení této technologie však představuje určité změny v procesu výroby, avšak v současnosti chybí metodika, která by komplexně popisovala všechny aspekty a nutné změny, s nimiž musí slévárny při zavádění této technologie počítat.

Tato diplomová práce se v teoretické části zaměřuje na popis technologie vysokotlakého lití, výrobu a konstrukci formy včetně její vnitřní temperace, popis ošetření formy při konvenčním způsobu a při použití mikropostřiku. Praktická část práce popisuje zavedení mikropostřiku na konkrétním odlitku ve slévárně KOVOLIT Modřice a.s., kde je vyhodnocení provedeno jak z technologického hlediska, tak i vzhledem k úsporám, které tato moderní technologie přináší. Na základě poznatků z provedeného testování je poté sestavena metodika, která může být jakýmsi návodem, jak při zavádění této technologie postupovat.

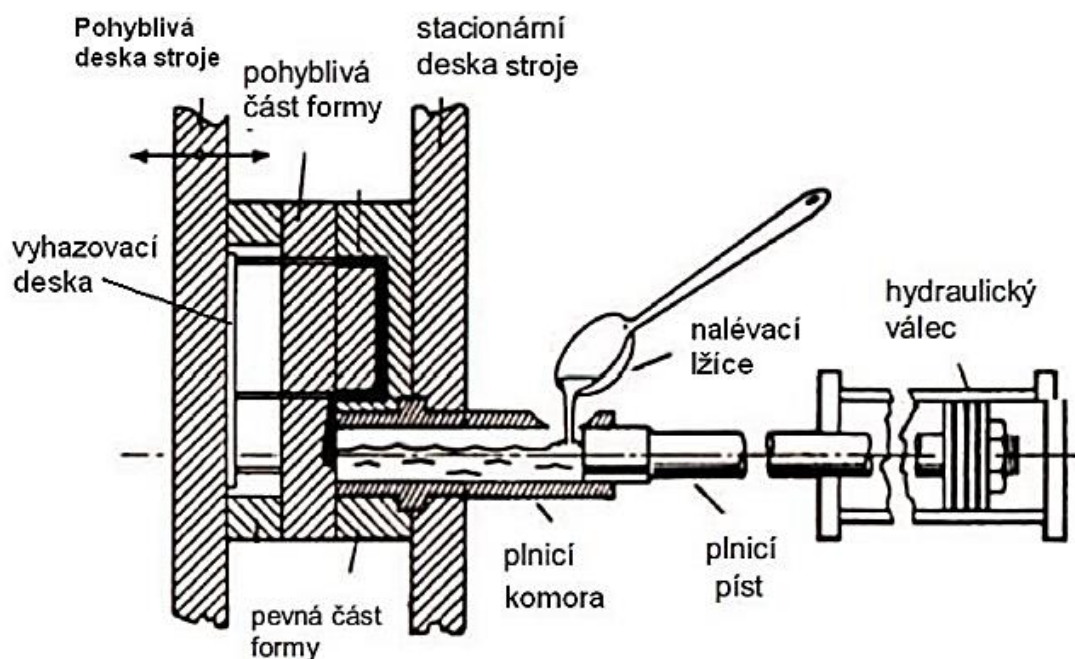
1 VYSOKOTLAKÉ LITÍ

Technologie vysokotlakého lití se řadí mezi technologie tzv. „netshape“ neboli „na hotovo“ a je jednou z nejdůležitějších způsobů výroby hliníkových odlitků. Touto metodou je možné vyrábět velké série rozměrově i hmotnostně menších odlitků s přesnými rozměry a hladkými povrchy, které mají velmi tvarově komplikovanou konstrukci a tloušťku stěn přibližně 1-2 mm. [1; 2; 3]

Princip výroby je založen na vstřikování tekutého kovu do trvalé kovové formy velkou rychlostí (10-100 m/s), které kov dosahuje díky výraznému zúžení vtoku v místě nazývaném vtokové nařiznutí, respektive zářez a dále na skutečnosti, že během krátké doby tuhnutí zůstává kov pod vysokým tlakem. Jedná se tedy o náhradu gravitačního metalostatického tlaku silovým působením pístu na taveninu v plnicí komoře tlakového lícího stroje. [4; 5]

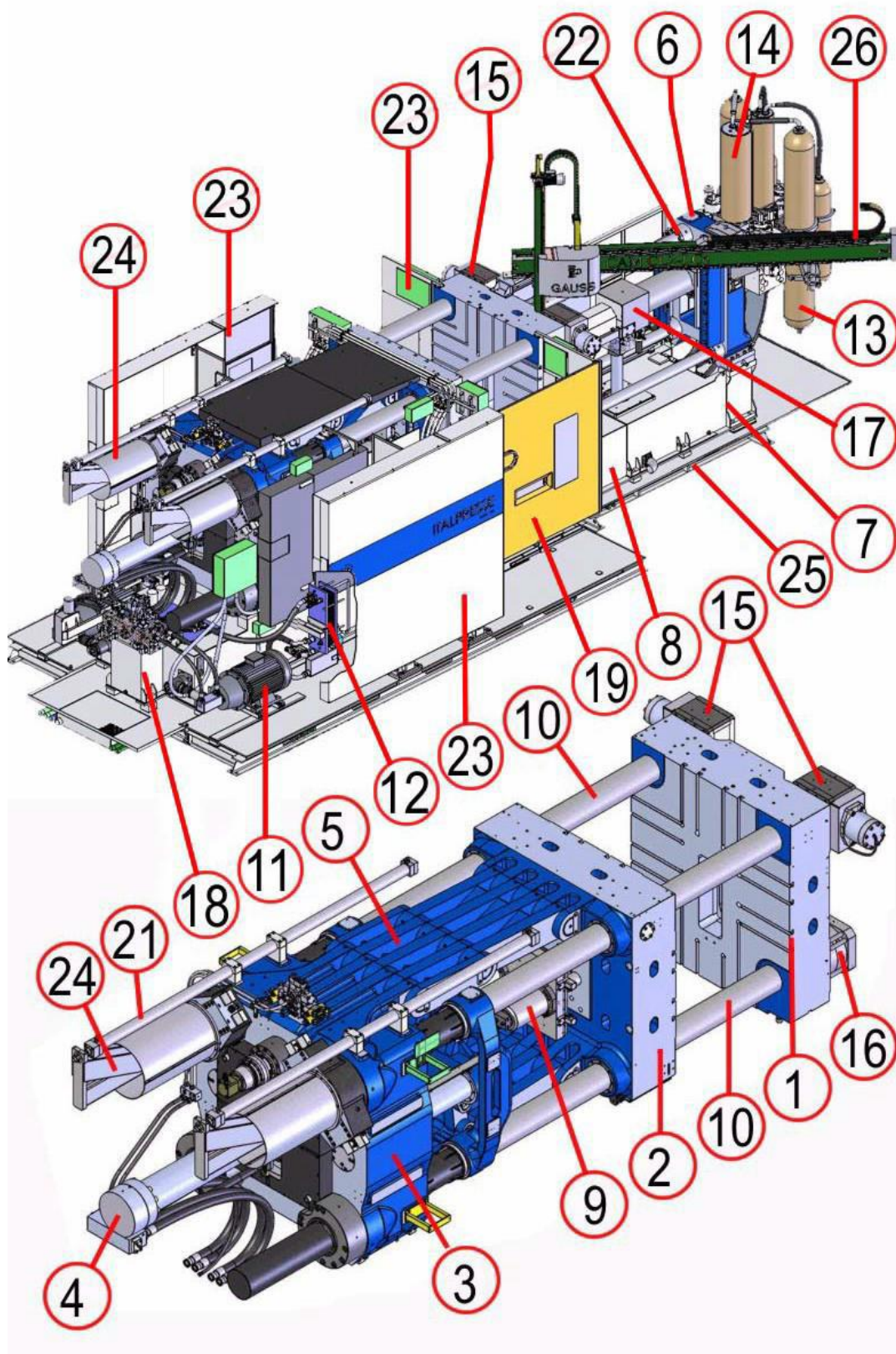
Podle konstrukce tlakového stroje rozlišujeme dva základní typy. Prvním je tlakový stroj s teplou komorou využívající se k výrobě kovů s nízkou teplotou bodu tání a k výrobě slitin s nízkou teplotou likvidu. Jedná se zejména o odlévání zinku, hořčíku a jejich slitin. Základním rysem je, že pracovní pec je součástí stroje a roztavený kov je tlačен přímo do formy. Druhým typem je tlakový stroj se studenou komorou. Rozdíl oproti stroje s teplou komorou je v tom, že dávkovací nebo udržovací pec není součástí stroje a kov se do plnicí komory dávkuje automaticky plnicí lžicí nebo pneumatickým dávkovacím zařízením. Podle směru pohybu plnicího pístu se mohou tlakové lící stroje dále dělit na stroje s vertikální nebo horizontální komorou. V současné době jsou nejrozšířenějším způsobem výroby hliníkových slitin stroje s horizontální studenou komorou viz Obr. 1. [1; 3; 6]

Maximální velikost odlitků, které lze na daném stroji vyrobit, je limitována maximální hmotností kovu a uzavírací silou stroje. Jedná se o hodnotu síly, kterou jsou obě poloviny formy pevně sevřeny. Z uzavírací síly a plnicího tlaku lze určit jaká bude maximální přípustná plocha odlitku v dělicí rovině. Velké tlakové stroje mohou disponovat uzavírací silou až 40 000 kN. [3]



Obr. 1 Schéma horizontálního tlakového stroje se studenou komorou [3].

1.1 Popis vysokotlakého licího stroje



Obr. 2 Popis vysokotlakého licího stroje [7].

Tab. 1 Popis pozic vysokotlakého licího stroje [7].

Pozice	Popis
1	Pevná deska
2	Pohyblivá deska
3	Plocha válce
4	Válec zavírání
5	Kolenová páka
6	Příčník vstřikování
7	Základna vstřikovací jednotky
8	Základna zavírací jednotky
9	Jednotka centrální extrakce
10	Sloupky stroje
11	Silová jednotka
12	Klimatizační zařízení hydraulického oleje
13	Akumulační tlakové lahve
14	Pístový akumulátor
15	Zařízení automatického zablokování vytahovacího sloupu (volitelné)
16	Zajišťovací matice spodních sloupů
17	Vstřikovací válec
18	Hydraulická jednotka
19	Automatická dvířka zadní strany
20	Automatická dvířka přední strany
21	Válec vytažení sloupků (volitelné)
22	Sloupy vstřikování
23	Pevná ochrana
24	Jednotka vytažení horního sloupu
25	Vana pod základnou
26	Nakladač kovu

1.2 Výrobní cyklus tlakového lití

Cyklus tlakového lícího stroje probíhá v těchto na sebe bezprostředně navazujících fázích:

- uzavření lícího stroje
- nadávkování tekutého kovu
- zalisování
- otevření lícího stroje a vyjmutí odlitku
- ošetření formy a lícího pístu [8]

Optimální nastavení všech parametrů během jednotlivých částí cyklu je velmi důležité a má zásadní vliv na celkovou jakost odlitku, opotřebení formy a plnicího pístu, spotřebu materiálu, celkový čas cyklu apod. [8]

1.2.1 Dávkování tekutého kovu

Jedná se o děj, probíhající při uzavřené formě, kdy dávkovací zařízení nalije do otvoru v plnicí komoře předem stanovené množství tekutého kovu. Dávkování může být prováděno ručně nebo automaticky naběračkou z udržovací pece či za pomoci pece dávkovací. Při rozjezdu výroby je nutné před uzavřením stroje a nadávkováním kovu provést ošetření formy, a to buď grafitovou pastou ručně anebo v manuálním režimu pomocí postřikové hlavy. V následujících cyklech je ošetření formy prováděno již automaticky. Hmotnost nadávkovaného kovu musí odpovídat hmotnosti odlitku včetně vtokové soustavy a přetoků. [8]

1.2.2 Lisování

Jedná se o nejdůležitější proces tlakového lití, jelikož je možné v této fázi nastavit mnoho parametrů ovlivňujících výslednou kvalitu odlitku, opotřebení formy, rychlost cyklu apod. Plnění dutiny formy tekutým kovem lze rozdělit do tří fází: [8]

Fáze první – předplňovací

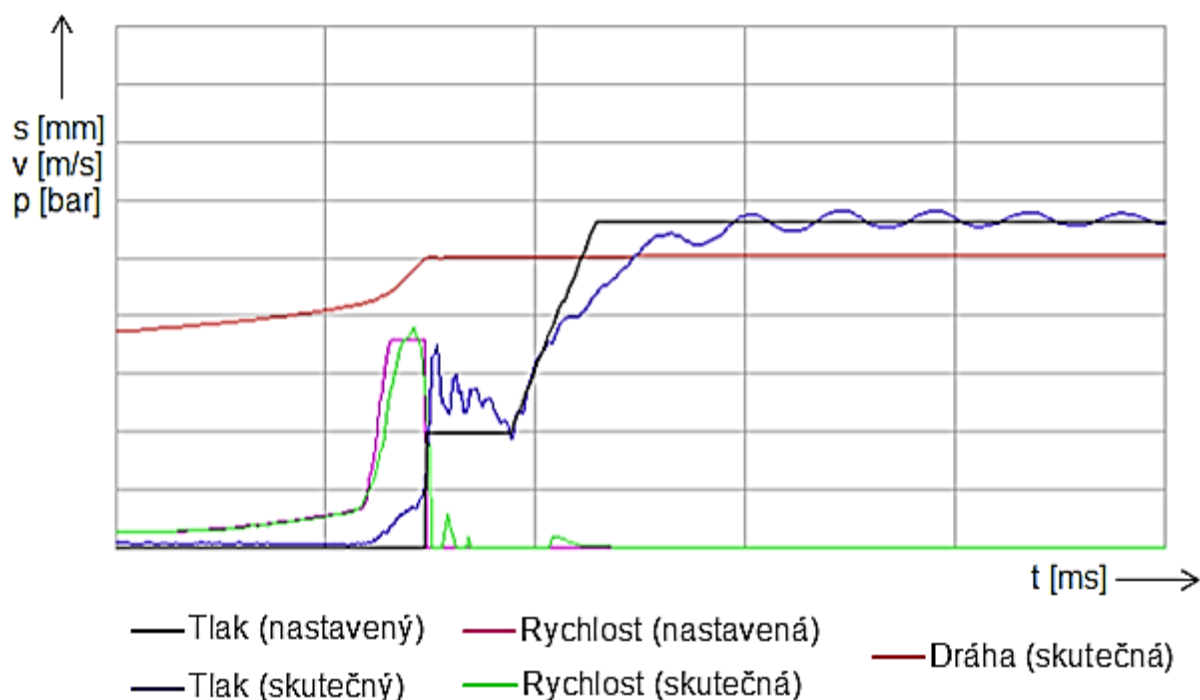
Začíná pohybem lisovacího pístu a končí v bodě, kdy se tekutý kov dostane ke vtokovému naříznutí. Po naplnění komory kovem nastává pohyb lisovacího pístu vpřed nízkou rychlostí (0,1 - 1,0 m/s). Tento pohyb trvá do doby, než píst zakryje dávkovací otvor tak, že nemůže dojít k vystříknutí kovu ven z komory. Předplňovací fáze musí zajistit, aby plnění bylo klidné, kov se nevířil a neabsorboval vzduch, který je přítomen v lící komoře. [5; 8]

Fáze druhá – plnicí

Nastává prudké zvýšení rychlosti pístu, čímž je dosaženo velké plnicí rychlosti v co nejkratším čase a tekutý kov protéká přes naříznutí do dutiny formy. Rychlost pístu je v této fázi 2 – 6 m/s. Zároveň dochází k mírnému navýšení plnicího tlaku. Tato fáze probíhá tak dlouho, dokud se dutina zcela nezaplní roztaveným kovem. Poté je píst prudce zabrzděn, jeho rychlost klesá na nulu a druhá fáze je ukončena. [5; 8; 9]

Fáze třetí – dotlak

V momentě zastavení lisovacího pístu dochází pomocí dusíkového akumulátoru k prudkému nárůstu plnicího tlaku na provozní tlak a za pomoci dusíkového multiplikátoru dále na tzv. dotlak. Ten zajišťuje konečné zhutnění odlitku, snížení porezity a výskyt ředin. Velikost dotlaku bývá v rozmezí 400 – 1000 bar. Dotlak musí nastat ihned po zaplnění dutiny, než dojde k tzv. zamrznutí neboli ke ztuhnutí vtokového kanálu a naříznutí. Tím by se hydraulický tlak nepřenášel a nedošlo by ke zhutnění odlitku. Průběh rychlosti a tlaku během lisovací fáze je znázorněn na Obr. 3. [5; 8]



Obr. 3 Průběh rychlosti a tlaku během lisovací fáze [10].

Chladnutí a tuhnutí odlitku ve formě

Poté, co je tekutý kov nalisován do dutiny formy, je potřeba ho zchladit a tím podpořit jeho tuhnutí. Pro zajištění hospodárného provozu tlakového stroje by mělo chladnutí probíhat dostatečně rychle. Pokud však chlazení probíhá příliš rychle, dochází k nebezpečnému zachlazení tenké vrstvy při povrchu formy, která vytváří na odlitku nežádoucí kůru. Při vysoké rychlosti chladnutí se zároveň zvyšuje tepelné namáhání formy vedoucí k jejímu většímu opotřebení. Pro snížení tepelného namáhání formy a podpoře dobrého chlazení, jsou uvnitř formy vyvrtány kanály, kterými proudí chladicí a temperační médium. Úkolem chladicího média, nejčastěji vody, je odvod tepla z formy a urychlení tuhnutí. Temperační médium, kterým bývá zpravidla olej, se u některých forem používá, aby se předešlo tepelným rázům při nasazení studené formy nebo při prostojích, kdy není tlakový lisovací stroj v provozu. [8]

1.2.3 Vyjímání odlitku

Podle stupně automatizace pracoviště vyjímání odlitku probíhá ručně nebo za pomoci robota. Následuje odstranění vtokové soustavy v ostříhovacích lisech, další dokončovací operace, paletizace a expedice. Je velmi důležité, aby po vyjmutí odlitku ve formě nezůstala žádná jeho část, která by mohla způsobit poškození formy a tím odstávku stroje. [8]

1.2.4 Ošetření formy a licího pístu

Po vyjmutí odlitku je nutné formu a licí píst připravit na další cyklus, a proto je na formu i píst pomocí trysek nanesen dělicí prostředek. Volba dělicího prostředku závisí na velikosti odlitku, jeho tvarové složitosti, teplotě a stavu formy. Problematika ošetření formy bude detailně popsána v kapitole 4. Po ošetření formy se píst vrací do výchozí polohy, kde dojde před opětovným nadávkováním kovu k jeho namazání pomocí mazacího prostředku ve formě kapaliny nebo granulátu, čímž je zajištěno menší opotřebení komory i samotného pístu. [8]

Uvedeným požadavkům nejlépe vyhovují tepelně zpracované vysokolegované, žáruvzdorné a žárovevné oceli viz Tab. 2. Mezi hlavní legující prvky patří chrom, molybden, vanad a další legující prvky, které mají následující vliv na vlastnosti ocelí:

- uhlík – zvyšuje pevnost a snižuje tažnost a kontrakci
- chrom – zvyšuje prokalitelnost
- molybden – má příznivý vliv na pevnost v tahu při zvýšené teplotě a zvyšuje prokalitelnost
- vanad – zvyšuje pevnost v tahu při vysokých teplotách
- křemík – zabraňuje měknutí, zvyšuje tvrdost, což snižuje obrobitelnost a tepelnou vodivost
- wolfram – zvyšuje pevnost v tahu při vysokých teplotách
- nikl – zvyšuje prokalitelnost [1; 13]

Tab. 2 Oceli na výrobu forem pro tlakové lití [14].

Označení ocelí ČSN	Hlavní slitinová přísada	Chemické složení [%]								Použití na formy pro lití slitin
		C	Mn	Si	Cr	Mo	V	W	Ni	
17 027	Cr	0,18 až 0,28	max. 0,9	max. 0,7	14,00 až 16,00					zinku hliníku hořčíku
19 430	Cr – V	0,41	0,55	0,25	2,25		0,15			zinku cínu olova
19 552	Cr – Mo	0,35	0,35	1,05	5,00	1,40	0,50			hliníku hořčíku
19 720	Cr – W – V	0,25 až 0,35	0,20 až 0,50	0,15 až 0,50	2,00 až 2,80		0,45 až 0,65	3,80 až 4,80		hliníku hořčíku mědi
19 721	Cr – W – V	0,25 až 0,35	0,20 až 0,50	0,15 až 0,50	2,00 až 2,70		0,10 až 0,30	8,50 až 10,00		mědi
19 723	Cr – W – Ni – V	0,24	0,47	0,30	2,25		0,10	9,50	1,50	mědi

Mimo typy ocelí uvedených v Tab. 2 se využívají také speciální oceli vyvinuté firmou Uddeholm ORVAR SUPREME a DIEVAR. ORVAR SUPREME je prověřená ocel třídy H13, která má následující vlastnosti:

- vysoká úroveň odolnosti proti tepelnému šoku a tepelné únavě
- dobrá pevnost za vysokých teplot
- vynikající houževnatost a tažnost ve všech směrech
- dobrá obrobitelnost a leštitelnost
- vynikající prokalitelnost
- dobrá rozměrová stálost během kalení [15]

DIEVAR je prvotřídní ocel vytvořená pro náročné aplikace vysokotlakého lití s vysokou odolností proti vzniku trhlin, kterou je možné využít i v oblasti aditivní technologie jako prášek pro zpracování metodami Laser Powder Bed Fusion (LPBF) a Laser Metal Deposition (LMD). Jedná se o vynikající materiál pro velké konstrukční odlitky a vyznačuje se následujícími vlastnostmi:

- vynikající houževnatost a tažnost ve všech směrech
- dobrá odolnost proti popouštění
- dobrá pevnost za vysokých teplot
- vynikající prokalitelnost
- dobrá rozměrová stálost během tepelného zpracování a povlakování [16]

2.2 Konstrukce formy

Konstrukce formy je z hlediska výroby kvalitních odlitků velmi důležitá, a proto jsou na ni kladeny vysoké nároky, přičemž ji ovlivňují následující faktory:

- roční a celkový požadavek odlitků
- druh odlévané slitiny
- požadovaná rozměrová přesnost, tloušťky stěn, úkosity, zaoblení, tepelné uzly, umístění značení a další technické požadavky
- násobnost formy
- zaformování kusu tak, aby byl při otevírání formy unášen pohyblivou polovinou formy a při vyjždění pohyblivých jader nebyl deformován
- volba dělicích rovin
- způsob vyhazování, umístění vyhazovačů a poloha stop po vyhazovačích
- velikost licího stroje s ohledem k potřebné uzavírací síle a licímu tlaku, velikosti formy a rozložení tahačů jader
- volba průměru plnicí komory, uspořádání vtokového systému
- umístění, nasměrování a průřez vtokového naříznutí
- způsob odvodu vzduchu, příp. vakuování formy
- návrh a dimenzování temperačního systému formy
- umístění a zabudování případných zařízení pro lokální dotlak
- způsob ošetření formy a nanesení dělicího prostředku
- volba materiálu a zpracování tvarových částí s ohledem na požadovanou životnost
- náročnost čištění, údržba a rychlá vyměnitelnost některých dílů formy [5; 13; 17]

2.3 Výroba forem

Využívá se dvou druhů forem, formy zhotovené z jednoho kusu nebo formy vložkové. Tyto vložky, ve kterých je vypracován negativní tvar odlitku jsou potom vloženy do objímky. Formy vyrobené z jednoho kusu se většinou využívají pro choulivé odlitky menších rozměrů a pro složité odlitky vyžadující více postranních jader. Naopak vložkové formy se využívají hlavně tehdy, kdy se po formě vyžaduje dlouhá provozní doba. Jsou-li vložky již opotřebovány a odlitky neodpovídají požadované kvalitě, dojde k jejich výměně. [5]

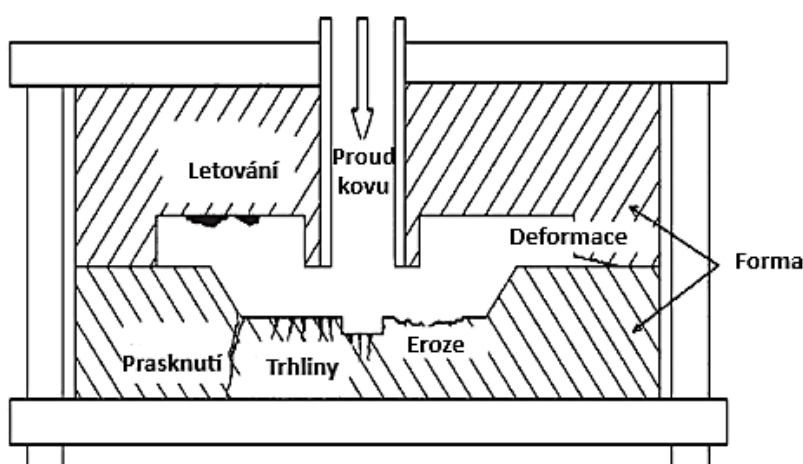
Po vytvoření technické dokumentace formy a po jejím odsouhlasení odběratelem či koncovým zákazníkem následuje vlastní výroba formy. Výroba probíhá pomocí klasických technologií frézování, soustružení, vrtání, broušení, drátového řezání a CNC obrábění, které umožňuje rychlý průběh výroby při zachování vysoké přesnosti. Nedílnou součástí je tepelné zpracování formy. Po žíhání ke snížení vnitřního pnutí následuje kalení v komorové peci s ochranou atmosférou, zakončené třístupňovým popouštěním. Hlubší tvary se vytvářejí za pomoci elektrojiskrového obrábění grafitovou elektrodou. Kvalita formy je zabezpečena důkladnou

kontrolou po každé operaci na 3D měřicích strojích. Pro urychlení výroby jsou některé díly, jako např. rámy, normalizované vyhazovače, pouzdra, kolíky, příp. jádra se speciální chemicko-tepelnou úpravou povrchu proti zadírání a nalepování kovu, nakupovány nebo vyráběny v kooperaci. [4; 12; 13; 17]

Po nasazení formy na stroj a dokončení její kompletace se provádí první vzorkování a následné měření vzorových odlitků opět na 3D měřicích strojích. Pokud jejich rozměry nejsou v toleranci, provádí se úprava tvarů formy. Toto doladění je zpravidla nutné provést vždy, jelikož je velmi obtížné předem odhadnout, jak se forma bude chovat při ohřátí a během své činnosti v hromadné výrobě, a také jakých skutečných rozměrů dosáhnou odlitky po svém vychlazení. Podle potřeby se po optimalizaci formy provádí povrchové úpravy, které vedou ke zvýšení tvrdosti povrchu formy a odolnosti proti opotřebení, jako např. nitridace nebo sulfonitridace. [4; 12; 13; 17]

2.4 Vady tlakové licí formy

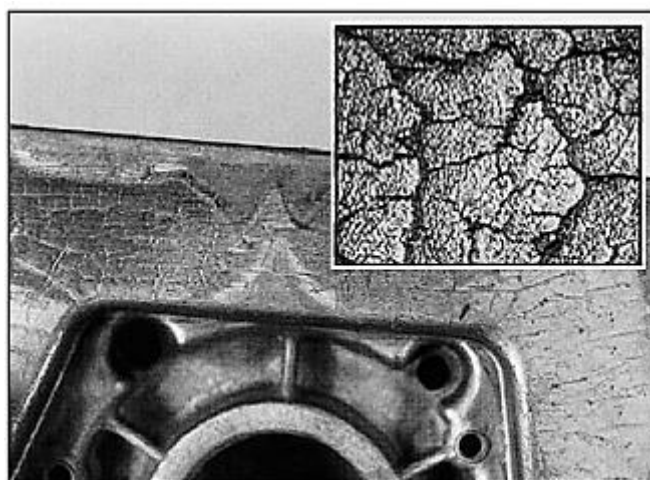
Během plnění dutiny formy roztaveným kovem je forma vystavena vysokému mechanickému, tepelnému a chemickému zatížení, které po určité době způsobuje různé povrchové vady, jako jsou trhliny, eroze způsobená proudícím kovem, koroze, letování hliníku na povrch formy, deformace tvaru, netěsnost formy a v nejhorším případě prasknutí formy viz Obr. 5. Tyto vady se poté projevují na vzhledu a vlastnostech odlitků. [18]



Obr. 5 Vady a jejich výskyt na formě [18].

2.4.1 Trhliny

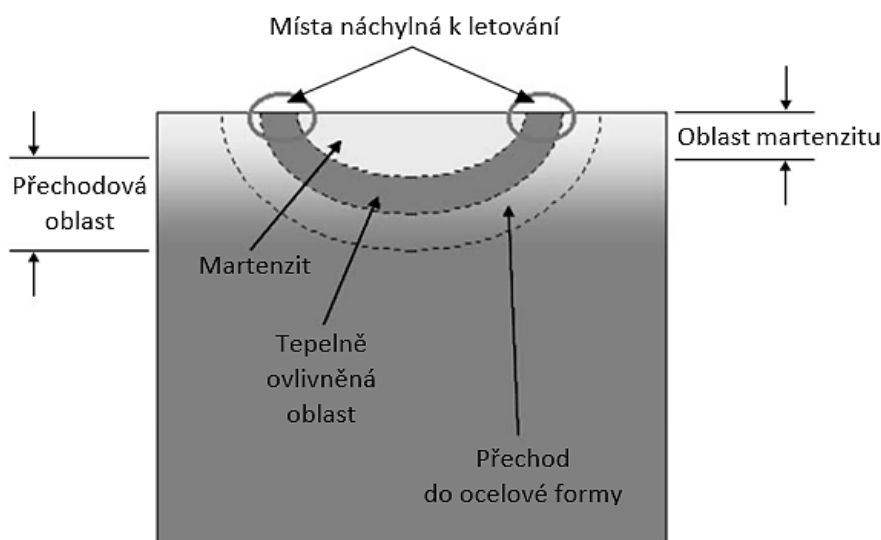
Tvrdá martenzitická struktura na povrchu formy je odolná proti opotřebení, ale zároveň i křehká. Při používání je forma vystavena střídavému zahřívání a ochlazování, což vede k silnému namáhání povrchové vrstvy, které vyvolává střídající se tahová a tlaková napětí. Tahové napětí vznikající v době chladnutí formy postupně vytváří síť povrchových trhlin známou jako tzv. „mapování“ formy viz Obr. 6. Tyto drobné trhliny se postupem času zvětšují, kov do nich může začít penetrovat a vytvářet na povrchu odlitku drobné žilky. Většinou se nejedná o závažnou vadu, ale pokud je požadována vysoká kvalita povrchu odlitku, je následná oprava velmi nákladná a je nutné provést sekundární dokončovací operace nebo leštění. [2; 19; 20]



Obr. 6 "Mapování" formy [19].

2.4.2 Letování

Další častou vadou je letování, což je nalepování hliníku na horká místa povrchu formy a k němuž dochází během tuhnutí mezi odlitkem a povrchem formy. Většinou se jedná o malá jádra, která jsou nedostatečně chlazená pomocí vnitřního chlazení formy a místa vystavená přímému proudu taveniny. Tato vada vede k trvalému poškození jak odlitku, tak povrchu formy. K letování jsou také náchylné oblasti forem opravených svařováním. Při svařování totiž dochází v tepelně ovlivněné oblasti k přeměně tvrdé martenzitické struktury na měkký žíhaný povrch viz Obr. 7. Tyto žíhané oblasti jsou mnohem náchylnější k letování. [2]



Obr. 7 Struktura formy po svařování [2].

K zabránění letování lze dosáhnout různými způsoby podle náročnosti odlitku. Jedním ze způsobů je prodloužení cyklu, čímž dojde k většímu ochlazení pomocí vnitřního chlazení. Častější způsob je delší doba nanášení dělicího prostředku, zaměření trysky na konkrétní místo nebo použití mazadla s jiným chemickým složením. Letování je také možné se vyvarovat změnou chemického složení kovu, konkrétně přidáním železa, přestože negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti. V praxi musí tavenina vždy obsahovat minimální množství železa právě kvůli zabránění výraznějšímu lepení hliníku na povrch formy. Příklad letování na jádra je znázorněn na Obr. 8. [2]



Obr. 8 Letování na jádře [19].

2.4.3 Eroze

Erozivní opotřebení je definováno jako postupné odstraňování materiálu z povrchu formy proudem roztaveného kovu. Dochází k němu v důsledku pohybu taveniny, která může v oblasti nařiznutí dosáhnout rychlosti až 60 m/s. Hlavními mechanismy eroze jsou:

- náraz taveniny a následné vytváření důlků na erodovaném povrchu
- kavitace způsobená tvorbou a zánikem bublin (dutin) v tavenině v důsledku lokálních výkyvů tlaku
- pevná eroze způsobená ztuhlými částicemi (primární částice Si, částice oxidů a nečistot nebo intermetalické částice), které dopadají na povrch formy během plnění. [19; 20]

2.4.4 Koroze

Korozivní opotřebení je definováno jako rozpouštění materiálu formy v roztaveném hliníku a následná tvorba intermetalických sloučenin mezi povrchem formy a taveninou. Koroze je způsobena následujícími skutečnostmi:

- železo a většina legujících prvků ocelové formy jsou více či méně rozpustné v roztaveném hliníku
- vysoká teplota formy může způsobit oxidaci jejího povrchu
- na povrchu formy se mohou vytvářet intermetalické sloučeniny [19; 20]

2.5 Životnost formy

Forma pro vysokotlaké lití je poměrně složitý a drahý nástroj, jehož pořizovací cena se pohybuje řádově ve statisících až milionech korun. Je proto důležité, aby měla dlouhou životnost, což je v dnešní době jedním z největších problémů v tlakovém lití. Měřítkem životnosti je počet odlevů, kterých lze dosáhnout až do jejího vyřazení. To nastává tehdy, pokud trhlinky způsobují již podstatné problémy v plynulosti lití, anebo znehodnocují povrch odlitku natolik, že neodpovídá požadované jakosti. Použití technologie mikropostřiku je jednou z cest, jak zvýšit životnost formy. Forma pracuje v menším intervalu teplot, nedochází k tak velkým teplotním výkyvům, což oddaluje tvorbu trhlinek. Uvádí se, že použitím mikropostřiku je možné zvýšit životnost formy 2x – 4x. [5; 21]

3 TEPELNÁ BILANCE FORMY

Tepelné poměry v soustavě tavenina – forma závisí jak na tepelně fyzikálních vlastnostech formy, tak i na vlastnostech odlévaného materiálu, stejně jako na podmínkách sdílení tepla na tomto rozhraní. Jednou z důležitých vlastností formy je schopnost akumulovat a odvádět teplo z taveniny a následně i z odlitku. Akumulační schopnost formy je vyjádřena součinitelem tepelné akumulace b_F , který komplexně charakterizuje ochlazovací účinek slévárenské formy vzhledem ke konkrétnímu odlitku z příslušného materiálu. Vyjadřuje množství tepla, které při rozdílu teplot 1 K projde z odlitku do formy za jednotku času a připadá na jednotku plochy. Tento součinitel lze vyjádřit pomocí vztahu: [22; 23]

$$b_F = \sqrt{c_F \cdot \rho_F \cdot \lambda_F}, \quad (3.1)$$

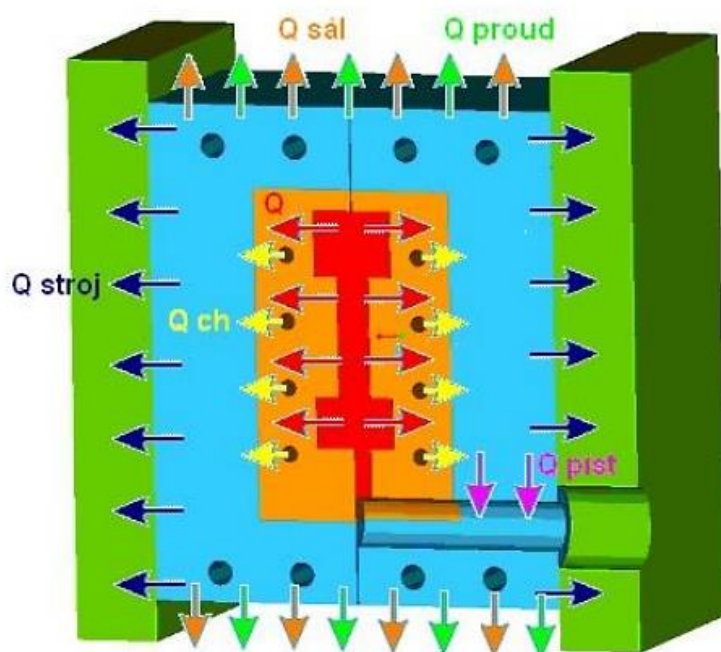
kde: c_F - měrná tepelná kapacita formy [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],

ρ_F - hustota materiálu formy [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

λ_F - tepelná vodivost formy [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].

Zásadním procesem při tvorbě odlitku ve slévárenské formě je přenos energie mezi odlitkem a formou. Tento proces lze rozdělit do několika fází, které během výrobního cyklu probíhají současně. Jedná se o přestup tepla z odlévaného materiálu přes vrstvu mazadla do lící formy, přestup tepla z formy do temperačního systému a přestup tepla z formy do okolí a rámu stroje. Z obecného pohledu tak dochází mezi odlitkem a formou k výměně tepla:

- **vedením** (kondukcí) – teplo přechází od částice k částici jejich přímým stykem. Tímto způsobem se teplo šíří především v tuhé fázi (v odlitku a formě).
- **prouděním** (konvekci) – teplo je převáděno mezi fázovým rozhraním a hlavním proudem taveniny, a to vedením v hraniční vrstvě a pohybem větších shluků molekul, které předávají teplo od hraniční vrstvy do vzdálenějších míst.
- **sáláním** (radiací) – energie se šíří ve formě elektromagnetického vlnění, přičemž se na rozdíl od vedení a proudění tepelná energie přeměňuje v energii sálavou a naopak. [22; 23]



Obr. 9 Tepelná bilance formy [23].

Tepelnou bilanci formy lze vyjádřit pomocí vztahu: [23]

$$Q_O = Q_T + Q_{SÁL} + Q_{PROUD} + Q_{STR} + Q_{PÍSTU} + Q_P, \quad (3.2)$$

- kde: Q_O - celkové teplo uvolněné odlitkem [J],
 Q_T - teplo odvedené temperačním systémem [J],
 $Q_{SÁL}$ - teplo odvedené do okolí sáláním [J],
 Q_{PROUD} - teplo odvedené do okolí prouděním [J],
 Q_{STR} - teplo odvedené rámem stroje [J],
 $Q_{PÍSTU}$ - teplo odvedené pístem stroje [J],
 Q_P - teplo odvedené odpařováním kapalné fáze z postřiku [J].

Celkové teplo uvolněné odlitkem je dáno vztahem: [23]

$$Q_O = Q_{PŘ} + Q_{KR} + Q_{CHL} + Q_{TŘ}, \quad (3.3)$$

- kde: $Q_{PŘ}$ - teplo vzniklé přehřátím taveniny [J],
 Q_{KR} - teplo uvolněné při krystalizaci [J],
 Q_{CHL} - teplo uvolněné při chladnutí odlitku [J],
 $Q_{TŘ}$ - teplo vzniklé třením tlakového pístu [J].

Teplo vzniklé třením pístu je malé a lze ho proto zanedbat. Množství tepla vzniklého přehřátím taveniny lze stanovit pomocí vztahu: [23]

$$Q_{PŘ} = m \cdot c_L \cdot (T_{LITÍ} - T_{KR}), \quad (3.4)$$

- kde: m - hmotnost taveniny [kg],
 c_L - měrná tepelná kapacita taveniny [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$],
 $T_{LITÍ}$ - teplota lití [$^{\circ}C$],
 T_{KR} - teplota krystalizace taveniny [$^{\circ}C$].

Množství tepla uvolněného taveninou při její krystalizaci vyjadřuje rovnice: [23]

$$Q_{KR} = m \cdot L_{KR}, \quad (3.5)$$

- kde: L_{KR} - latentní krystalizační teplo tuhnoucí taveniny [$J \cdot kg^{-1}$].

Množství tepla uvolněného při chladnutí odlitku popisuje rovnice: [23]

$$Q_{CHL} = m \cdot c_S \cdot (T_{KR} - T_V), \quad (3.6)$$

- kde: c_S - měrná tepelná kapacita materiálu odlitku v tuhém stavu [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$],
 T_V - teplota odlitku při vyjmutí [$^{\circ}C$].

Celkové teplo odlitku Q_O je předáno formě, která ho transportuje dále do svého okolí. Teplo odvedené z formy lze tedy rozdělit do několika skupin, jak vyjadřuje rovnice (3.2). Teplo odvedené pístem je malé a lze ho zanedbat. Množství tepla odvedeného temperačním systémem prostřednictvím cirkulujícího temperačního média lze vyjádřit vztahem: [23]

$$Q_T = m_T \cdot c_T \cdot (T_{VÝST} - T_{VST}), \quad (3.7)$$

- kde: m_T - množství temperačního média [kg],
 c_T - měrná tepelná kapacita temperačního média [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$],
 $T_{VÝST}$ - výstupní teplota temperačního média [$^{\circ}C$],
 T_{VST} - vstupní teplota temperačního média [$^{\circ}C$].

Množství tepla odvedeného sáláním do okolí lze vypočítat pomocí rovnice: [23]

$$Q_{SAL} = \alpha_{SAL} \cdot (T_{PF} - T_{OK}) \cdot S \cdot t_{cyklu}, \quad (3.8)$$

- kde: α_{SAL} - součinitel přestupu tepla sáláním z vnějšího povrchu formy do okolí [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],
 T_{PF} - teplota vnějšího povrchu formy, která je ve styku s okolním prostředím [$^{\circ}\text{C}$],
 T_{OK} - teplota okolí [$^{\circ}\text{C}$],
 S - plocha styku formy s okolím [m^2],
 t_{cyklu} - doba cyklu [s].

Množství tepla odvedeného prouděním do okolí vychází z předpokladu, že mezi povrchem formy a okolím je velký teplotní spád, který je hybnou silou pro odvod tepla a lze ho stanovit rovnicí: [23]

$$Q_{PROUD} = \alpha_{PROUD} \cdot (T_{PF} - T_{OK}) \cdot S \cdot t_{cyklu}, \quad (3.9)$$

- kde: α_{PROUD} - součinitel přestupu tepla prouděním z vnějšího povrchu formy do okolí [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$].

Množství tepla odvedeného rámem stroje je přímo úměrné teplotnímu spádu, času a průtokové ploše kolmé na směr teplotního toku a lze jej vypočítat rovnicí: [23]

$$Q_{STR} = \alpha_{STR} \cdot (T_{PFS} - T_{PS}) \cdot S_V \cdot t_{cyklu}, \quad (3.10)$$

- kde: α_{STR} - součinitel přestupu tepla z formy do rámu stroje [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],
 T_{PFS} - teplota vnějšího povrchu formy, která je ve styku s rámem [$^{\circ}\text{C}$],
 T_{PS} - teplota povrchu stroje, který je ve styku s formou [$^{\circ}\text{C}$],
 S_V - plocha styku formy s rámem stroje [m^2].

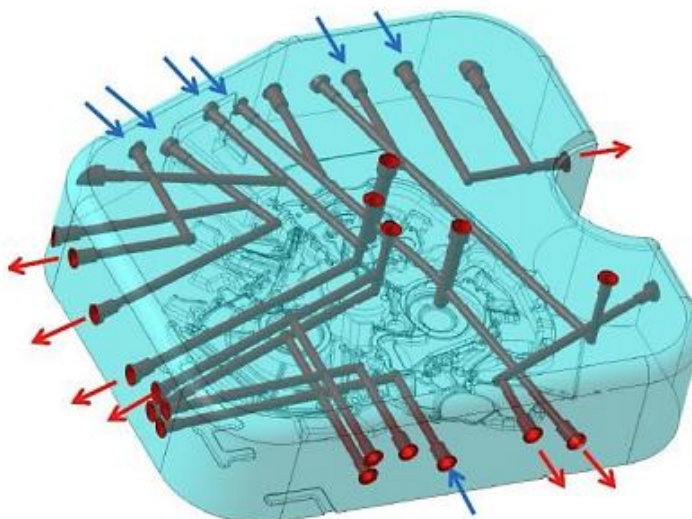
Množství tepla odvedené odpařováním kapalně fáze z postřiku určuje vztah: [23]

$$Q_P = m_K \cdot [c_K \cdot (T_{PP} - T_V) + L_K], \quad (3.11)$$

- kde: m_K - hmotnost odpařené kapaliny [kg],
 c_K - měrná tepelná kapacita kapaliny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 T_{PP} - počáteční teplota postřiku [$^{\circ}\text{C}$],
 T_V - teplota vypařování kapalně fáze postřiku [$^{\circ}\text{C}$],
 L_K - skupenské teplo vypařování kapalně fáze postřiku [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$].

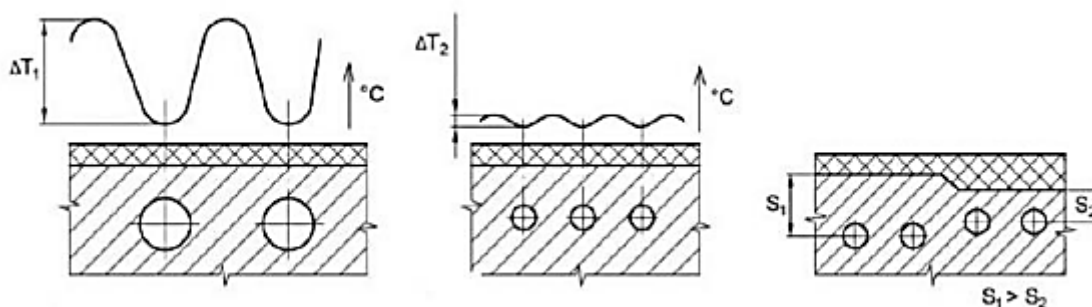
3.1 Termoregulace formy

Forma je po celou dobu od nalití taveniny do její dutiny až po vyjmutí odlitku jedním z rozhodujících faktorů vlastností budoucího odlitku, a je proto důležité dodržovat optimální teplotu jejího povrchu. Teplota formy závisí na odlévaném materiálu, na poměru objemu odlitku k jeho povrchu, na délce cyklu, na materiálu formy, na použitém dělicím prostředku, způsobu temperování formy a ovlivňuje dobu tuhnutí odlitku, zabíhavost taveniny, schopnost mazadla ulpívat na povrchu formy a zejména životnost formy. Správná teplota formy je zajištěna temperačním systémem. Temperačním systémem se rozumí systém kanálů, umožňujících ohřev nebo ochlazení formy pomocí temperačního média. U konvenčního temperačního systému se využívají kruhové kanály vrtané rovnoběžně s dělicí rovinou formy. Tyto kanály jsou poté pomocí hadic spojeny do jednotlivých temperačních okruhů. K usměrnění toku se využívají různé přepážky, ucpávky a zátky. Účinnost temperačního systému je poté dána velikostí a průměrem vrtání temperačních kanálů, vzdáleností kanálů od povrchu formy, druhu použitého média, jeho průtoku a době chlazení. Na Obr. 10 je znázorněn příklad rozmístění temperačních kanálů. [2; 22; 23; 24]



Obr. 10 Schéma temperačních kanálů [24].

Při návrhu temperačního systému je důležité dodržovat určitá pravidla, která vedou k jeho správné funkci. Temperační systém by neměl obsahovat tzv. mrtvá místa, kde médium neproudí a tím dochází k zanášení nečistotami nebo usazování vodního kamene. Průměr kanálu se volí podle tloušťky stěny odlitku v daném místě formy. Temperační kanály do průměru 6 mm je nutné provozovat s upravenou vodou či adekvátním temperačním médiem z důvodu rychlejšího zanášení vodním kamenem. Vzdálenost kanálů od povrchu formy by měla být přibližně jeden a půl násobek průměru daného kanálu. Je-li vzdálenost kanálu příliš velká, snižuje se jeho účinnost. Pokud je naopak kanál umístěn příliš blízko, vzniká pnutí, které může vést k prasknutí a tím ke snížení životnosti formy. Z důvodu tepelné bilance je výhodnější, aby forma obsahovala větší počet kanálů s menším průřezem viz Obr. 11. Temperační médium by mělo při ohřevu formy kanálem protékat od nejchladnějšího místa k nejteplejšímu a při chlazení naopak. [24; 25; 26]



Obr. 11 Vliv rozložení temperačních kanálů na povrchovou teplotu formy [24].

Pro lepší odvod tepla je možné využít tzv. konformní chlazení. Jedná se o soustavu kanálů přesně kopírujících jakýkoliv tvar výrobku, čímž je docíleno nejlepšího odvodu tepla. Využitím konformního chlazení lze dosáhnout zkrácení času chladicího cyklu, snížit deformaci odlitku a v neposlední řadě zajistit homogenní odvod tepla. Výroba se provádí využitím 3D tisku pomocí technologie DMLS (Direct Metal Laser Sintering), kdy je možné vytvořit libovolný tvar kanálu. Při použití technologie mikropostřiku může být využití konformního chlazení vhodným řešením pro lepší odvod tepla z přehřátých míst formy. Příklady konformního chlazení viz Obr. 12. [27]



Obr. 12 Příklady použití konformního chlazení [27].

Temperování formy probíhá třemi způsoby:

- chlazení vodou (bez regulace)
- temperace olejem
- temperace vodním ohřevem

Při chlazení vodou se využívá voda z řádu o teplotě okolí. Používá se k chlazení formy u silnostěnných odlitků, pro chlazení jader a pro chlazení oblastí kolem vtoku. Voda není nijak chemicky ošetřena a nelze regulovat její teplotu. Následky způsobené chlazením bez regulace jsou tepelné zatížení formy, vysoká zmetkovitost na začátku každého rozjezdu stroje, zanášení chladících kanálů a nestejně teploty vody v průběhu roku. Moderní stroje umožňují, aby chlazení vodou bylo zapnuté po celou dobu cyklu nebo jen po určitý zadaný čas, případně lze přívod vody zcela zastavit, zejména na začátku výroby, kdy ještě není forma dostatečně předehtřátá. [24; 28]

Při temperaci formy olejem se využívá temperačních přístrojů, kde se obvykle pracuje s teplotou média 180 °C až 220 °C. Olej se používá pro ohřev formy u tenkostěnných odlitků a k ochlazení formy u silnostěnných odlitků. Chlazení olejem je pro formu jemnější a forma nedostává takové teplotní šoky, což vede k prodloužení životnosti. [24]

Temperace vodním ohřevem se využívá pro chlazení formy u silnostěnných odlitků a k ochlazení jader. Oproti chlazení vodou (bez regulace) se v tomto případě dá teplota vody regulovat pomocí temperačních přístrojů. Teplota média se pohybuje obvykle mezi 80 °C a 160 °C. U modernějších zařízení lze za vyššího tlaku použít vodu až o teplotě 180 °C. [24; 28]

V praxi se často využívá kombinace všech tří způsobů temperování formy podle složitosti odlitku. Olej se v tomto případě použije na partie s tenčí stěnou odlitku a na předehtřev rámu formy. Voda se využije na partie se silnější stěnou odlitku. Příklad temperačních přístrojů je znázorněn na Obr. 13. [28]



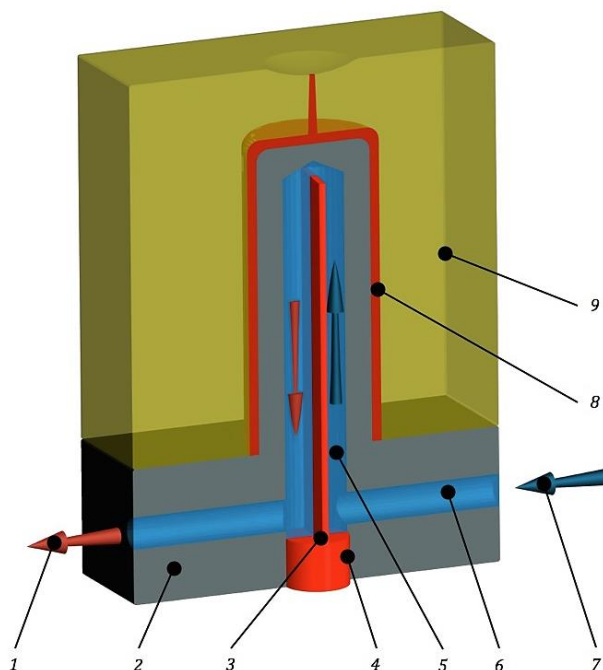
Obr. 13 Temperační přístroje firmy Thermobiehl [28].

3.1.1 Chlazení jader

Konstrukční provedení jader často nedovoluje provést jejich chlazení standardními temperačními kanály. Tavenina proudící vysokým tlakem a rychlostí do dutiny formy je příčinou ohybového a smykového namáhání jádra a zvětšující se poměr mezi podélným a příčným průřezem jádra zvyšuje nároky na jeho pevnost, která je limitujícím faktorem pro minimální rozměry jader. Je nutné teplo přivedené taveninou odvádět mnohem intenzivněji, a proto se jádra osazují různými temperačními prostředky, kterými lze nejen zrychlit odvod tepla, ale i zajistit kontrolu nad teplotním polem. Jedná se o přepážkové systémy, kde lze na základě typu přepážky dosáhnout různého temperačního efektu. Princip spočívá v navrtání otvoru do jádra, kam je následně vložena chladicí vložka s plochou přepážkou, se spirálovou přepážkou nebo s tzv. fontánkou. Nejúčinnějším způsobem chlazení jader je v dnešní době patentovaná technologie Jet-Cooling od německé firmy Lethiguel. [24; 25]

Systém ploché přepážky

Sestává z hlavního a vedlejšího kanálu. Vedlejší kanál je plochou přepážkou rozdělen na dva menší a zároveň přepažuje hlavní kanál. Nevýhodou tohoto systému je citlivost na přesné umístění přepážky tak, aby rozdělovala vedlejší kanál přesně na polovinu a tím bylo docíleno stejných podmínek toku temperačního média v obou částech vedlejšího kanálu. Pokud není tato podmínka dodržena, dochází k rozdílu temperačního efektu a tím i k rozdílné distribuci tepla v jádru. Další méně významnou nevýhodou tohoto systému, která vychází z jeho konstrukčního provedení, je postupně se zvyšující teplota temperačního média od vstupu k výstupu. Se zvětšující se délkou přepážky a zmenšujícím se průřezem chladicího kanálu se tento rozdíl zvyšuje. Výhoda tohoto systému spočívá především v jeho jednoduchosti, která převažuje výše zmíněné nevýhody, a proto se velmi často využívá zejména u výrobků, u nichž není požadována vysoká rozměrová přesnost. Samotná přepážka je obvykle nakupovaným dílem, který je pomocí závitové vkládací plochy ukotven do předem obrobeného závitového otvoru příslušného dílu formy nebo je ukotven mezi desky tvořící těleso formy a opatřen těsníci pryžovými „O“ kroužky. Schéma systému ploché přepážky viz Obr. 14. [25]

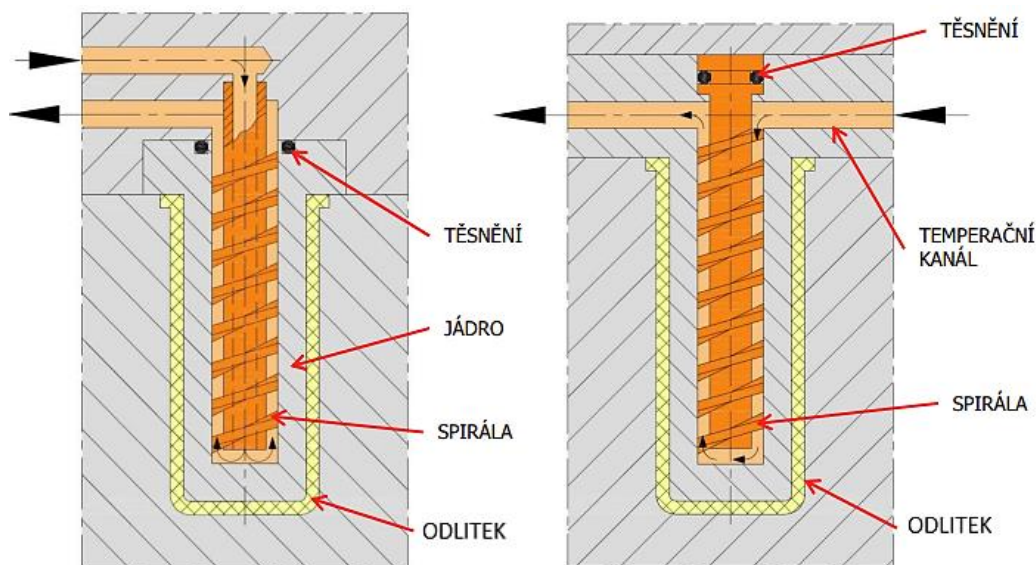


Obr. 14 Systém ploché přepážky

1 – výstup temperačního média, 2 – pojízdná polovina formy, 3 – plochá přepážka, 4 – úložná plocha přepážky, 5 – vedlejší temperační kanál, 6 – hlavní temperační kanál, 7 – vstup temperačního média, 8 – odlitek, 9 – pevná polovina formy [25].

Systém spirálové přepážky

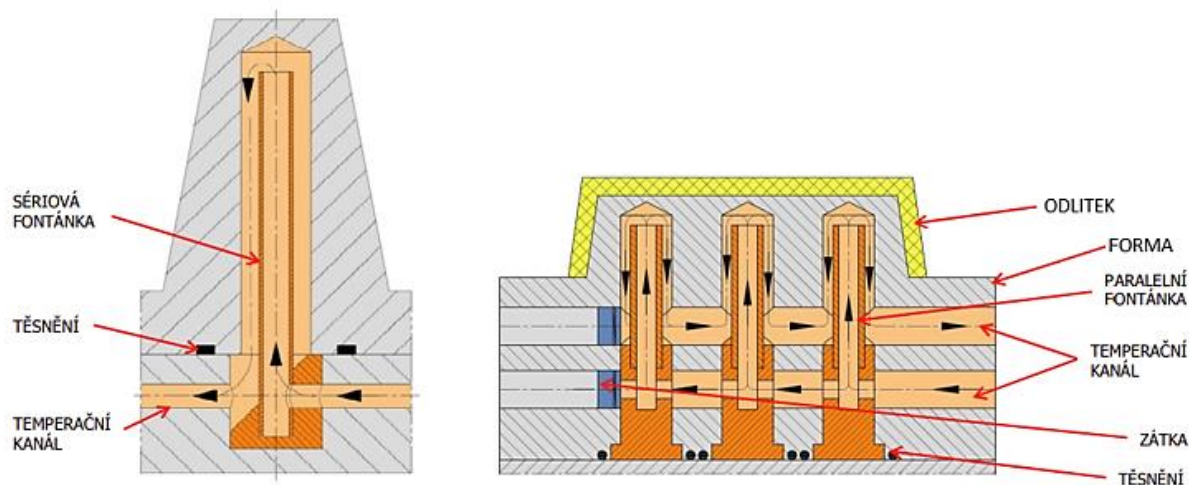
Jedná se o stejný princip jako v případě systému s plochou přepážkou, pouze tvar přepážky je spirálovitý. Využívají se dva typy provedení přepážek. První typ je přepážka s vnitřním otvorem, který zajišťuje přívod média k vrcholu a jedním vnějším závitem pro odvod média. Druhým typem je pak přepážka se dvěma závity, kde jeden závit slouží pro přívod média a druhý pro jeho odvod. Oproti systému s plochou přepážkou lze dosáhnout rovnoměrnějšího, skoro homogenního teplotního pole. Limitujícím je rozměr vedlejšího kanálu, který by dle dosavadních zkušeností a doporučení výrobců neměl být menší než 6 mm. Schéma systému spirálové přepážky viz Obr. 15. [24; 25]



Obr. 15 Systém spirálové přepážky – vlevo první typ, vpravo druhý typ [26].

Systém fontánky

V podstatě se jedná o stejný princip jako v předcházejících případech, ovšem přepážku zde představuje malá trubička. Temperační médium proudí trubičkou k vrcholu otvoru a po stěnách vedlejšího temperačního kanálu teče zpět. Provedení fontánek může být sériové nebo paralelní. Při použití sériové fontánky protéká médium postupně jednotlivými fontánkami. Do paralelních fontánek je médium přiváděno současně a temperace je tak účinnější, nevýhodou jsou však vyšší zástavbové nároky. Schéma systému fontánky viz Obr. 16. [25; 26]



Obr. 16 Systém fontánky - vlevo sériová fontánka, vpravo paralelní fontánka [26].

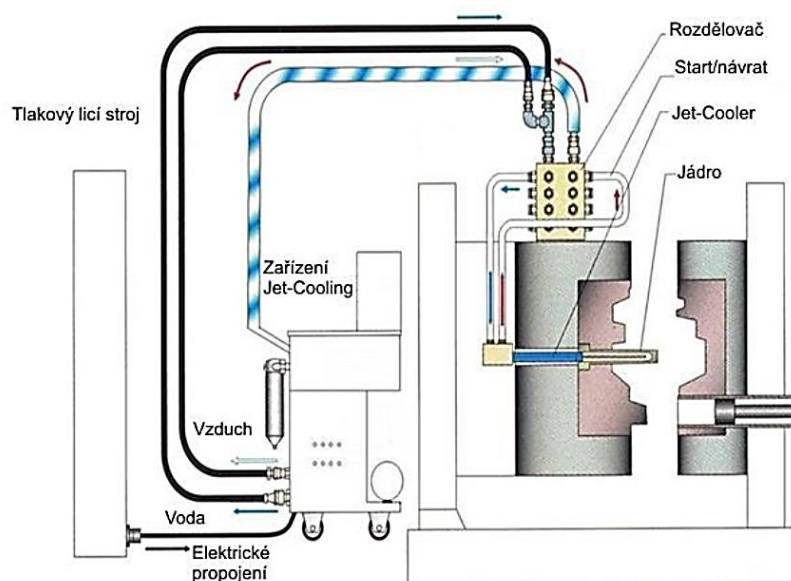
Jet-Cooling

Technologie Jet-Cooling se využívá pro efektivní chlazení jader malých průřezů a její schéma je znázorněno na Obr. 17. Do chlazeného jádra se navrtá přesně vycentrovaný otvor, do kterého se jako jehla injekční stříkačky zavede tzv. jet-cooler, pomocí něhož se po dobu několika málo vteřin přivádí pod vysokým tlakem až 0,2 MPa pečlivě upravená chladicí voda. Systém proto disponuje demineralizačním a deionizačním zařízením, jež obsahuje náplň na bázi pryskyřice, přes kterou voda protéká do zařízení Jet-Cooling a tím je zbavována minerálů. Hlavní výhody této technologie jsou: [7; 29]

- intenzivní odvod tepelné energie
- možnost zachladit jádra od průměru 4 mm
- čištění chladících okruhů od zbytkové vody stlačeným vzduchem po každém cyklu
- kontrola těsnosti chladících okruhů po každém cyklu, kdy lze včas detekovat porušené jádro, které by mohlo způsobit produkci zmetkovitých odlitků
- malé rozměry chladících elementů a rozvodů média

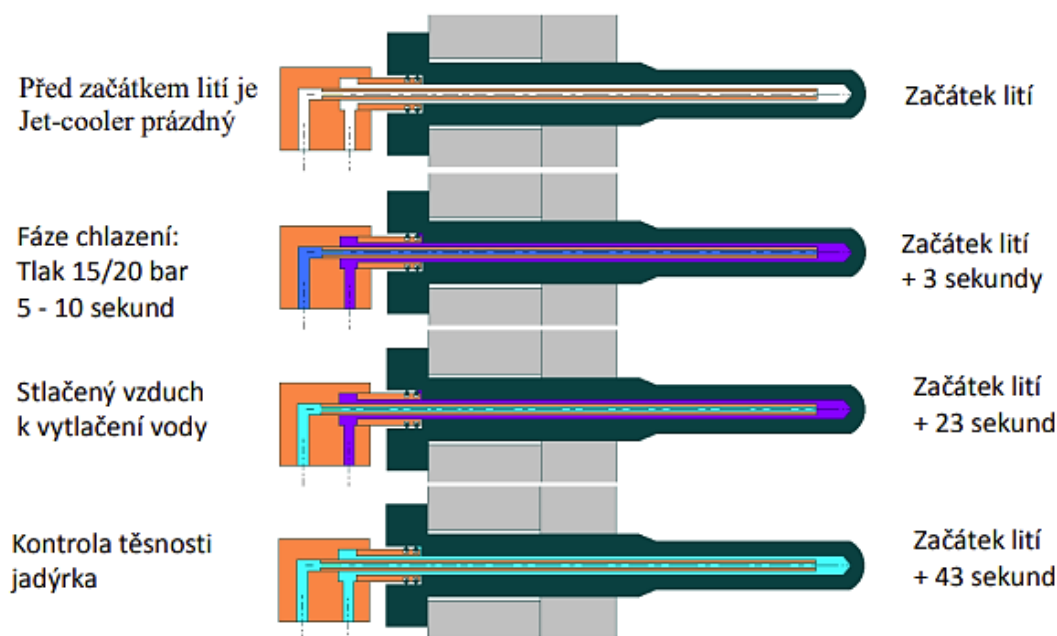
Nevýhodou této technologie jsou:

- vysoké nároky na přesnost a kvalitu výroby jader
- vyšší vstupní náklady na výrobu formy
- nutnost kvalitně upravené vody



Obr. 17 Schéma Jet-Cooling chlazení [28].

Chladicí cyklus Jet-Cooling probíhá ve stanovených krocích. Signálem od lícího stroje v okamžiku zahájení pohybu pístu je zahájen start cyklu. Je definován čas, za jak dlouho má čerpadlo začít vhánět do formy chladicí vodu a časový interval pro samotné chlazení jádra. Následuje prodleva před vyfukováním a následně samotné vyfukování prostřednictvím stlačeného vzduchu o tlaku 0,6 MPa. Pro správnou činnost systému totiž nesmí zůstat v okruzích žádná zbytková voda. Po ukončení každého cyklu probíhá automatický test těsnosti. Dojde k uzavření každého okruhu, do kterého je poté vháněn vzduch o tlaku 0,6 MPa. Na konci okruhu se nachází membránový tlakový snímač, jehož hystereze je nastavena na rozdíl tlaku 0,3 MPa. Pokud tlak v okruhu klesne pod tuto hodnotu, lící stroj obdrží impuls k přerušení lícího cyklu a zahlásí alarm. K testu těsnosti by mělo docházet až po vyjmutí odlitku z formy, a proto by chladicí cyklus nikdy neměl přesahovat dobu lícího cyklu. Popis chladicího cyklu viz Obr. 18. [29]

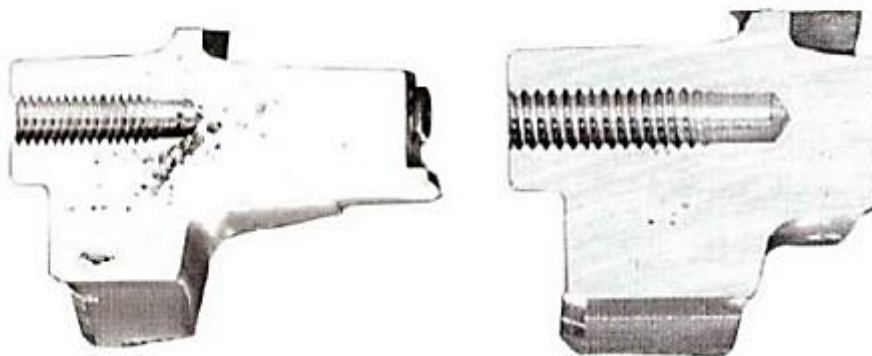


Obr. 18 Popis chladicího cyklu Jet Cooling [30].

Jádra chlazená pomocí technologie Jet-Cooling mají delší životnost, jelikož nedochází k letování hliníku jako u konvenčních jader. Na Obr. 19 lze vidět konvenční jádro po pouhých 50 licích cyklech v porovnání s jádrem chlazeným Jet-Cooling po 5000 cyklech. Z toho lze usoudit, že konvenční jádro je mnohem více vystaveno mechanickému a tepelnému namáhání, při kterém se materiál rychleji unavuje a tím se snižuje i jeho životnost. Přestože je delší životnost pozitivní přínos, největší výhodou je výrazné zvýšení kvality odlitku, a to především zlepšením vnitřní porezity viz Obr. 20. [7; 24]



Obr. 19 Životnost Jet Cooling jádra a konvenčního jádra [7].

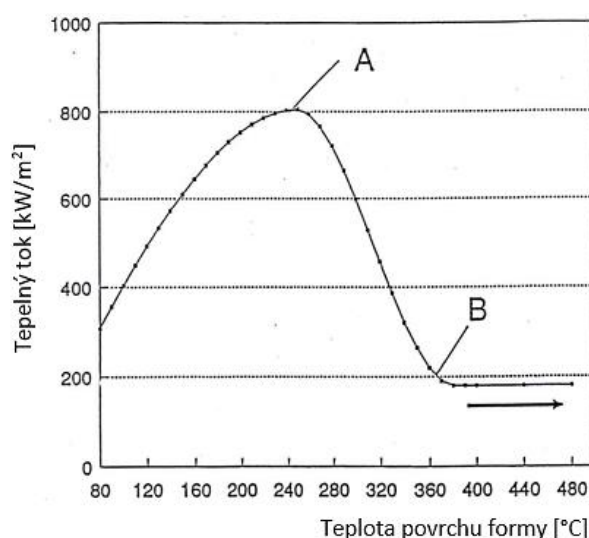


Obr. 20 Vnitřní kvalita odlitku při použití konvenčně chlazeného jádra a jádra chlazeného Jet Cooling [24].

4 OŠETŘENÍ FORMY

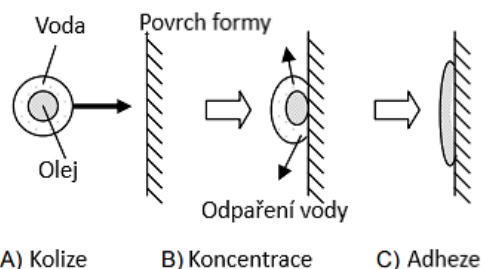
Ošetření formy je velmi důležitým krokem v procesu tlakového lití, který přímo ovlivňuje celkový cyklus a tím spojené výrobní náklady. Po vyjmutí odlitku je na formu za pomoci trysek nanesen separační prostředek na bázi vodního roztoku nebo prášku, jehož hlavním úkolem je usnadnit vyjímání odlitku a zabránit nalepování kovu na formu během tuhnutí. Dále slouží k mazání pohyblivých částí formy (jádra, vyhazovače apod.) a při použití vodou ředitelných mazadel také k ochlazení povrchu formy. Po postřiku následuje ofuk formy proudem vzduchu, který zajistí odstranění přebytečného separátoru a vytvoří tenký film s požadovanými vlastnostmi. [8; 31]

Nejčastěji používané dělicí prostředky ve slévárnách tlakového lití jsou dělicí prostředky na vodní bázi. Z obecně přijímaného modelu odvodu tepla z povrchu formy nanesením mazadla znázorněného na Obr. 21 vyplývá, že schopnost odvádět teplo je ovlivněna teplotou formy. Při nízkých teplotách formy je tepelný tok nízký vzhledem k malému rozdílu teplot mezi povrchem formy a mazadlem a skutečností, že dochází k malému odpařování vody. S rostoucí teplotou formy se zvyšuje i rozdíl teplot mezi povrchem formy a mazadlem a zároveň roste rychlost odpařování. Tím se zvyšuje i tepelný tok a dochází k ochlazení povrchu formy až do okamžiku, kdy se na povrchu formy začne tvořit pára, čímž je dosaženo teploty vyhoření. Při teplotách vyšších, než je tato teplota, tepelný tok klesá, jelikož se mazadlo obtížně dostává přes vrstvu páry k povrchu formy. Teplota, při níž vrstva páry vytvoří souvislou bariéru zabráňující proniknutí mazadla, se nazývá Leidenfrostova teplota. [32]

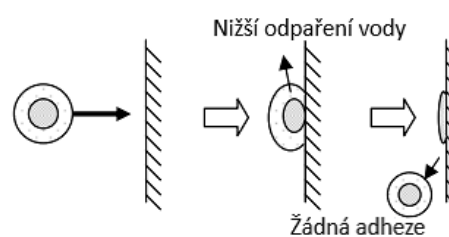


Obr. 21 Graf znázorňující odvod tepla z povrchu formy mazadlem. Bod A) teplota vyhoření, bod B) Leidenfrostova teplota [32].

Základní podmínka pro úspěšné nanesení dělicího prostředku je stejnoměrné rozložení teplot formy. Optimální teplota formy by měla být v rozmezí 150 – 350 °C, kdy při kontaktu dělicího prostředku s povrchem formy dojde k odpaření vody nesoucí mazadlo a tím k uchycení mazadla na povrchu formy viz Obr. 22. Tento požadavek je primárně zajištěn konstrukcí formy a její teplotou. Pokud je teplota nižší než 150 °C nedochází k odpaření vody na povrchu formy a mazadlo stéká po formě, aniž by se vytvořila tenká ochranná vrstva viz Obr. 23. Ke stejnému jevu dochází také při použití velkého množství mazadla nebo při nadměrně dlouhém postřiku. Pokud nedojde k nanesení dělicího prostředku, dochází při pohybu vyhazovačů nebo jader k deformaci odlitku, případně ke vzniku trhlin. Při nízké teplotě formy se při jejím plnění tekutým kovem odpařuje zbytková voda v ní uzavřená. To vede k tvorbě vzduchových bublin a k zmetkovitosti odlitku. [33; 34; 35]



Obr. 22 Nanesení mazadla při optimální teplotě formy [34].



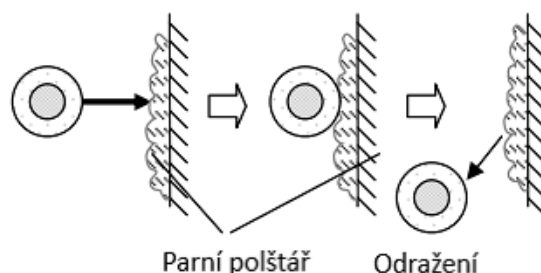
Obr. 23 Nanesení mazadla při teplotě nižší než 150 °C [34].

4.1 Leidenfrostův jev

Díky neustálým inovacím v oblasti hliníkových slitin a technologii tlakového lití dochází k zvyšování pevnosti a ke zlepšování dalších vlastností, které umožňují vyrábět větší a složitější díly. Složitost těchto velkých dílů způsobuje obtížnější navržení vnitřního chlazení tak, aby byly dostatečně a rovnoměrně chlazeny všechny tvarové části formy. Přírozeným důsledkem je zvyšování teploty formy. Jak bylo uvedeno v předešlém odstavci, optimální teplota formy by měla ležet v rozmezí 150-350 °C, avšak u velkých dílů může maximální teplota dosahovat až 400 °C. [35]

V důsledku vyšších teplot formy nastávají problémy s lokálním přehřátím a následným letováním materiálu, a proto jsou tato místa mnohem více závislá na správně navrženém vnitřním chlazení formy nebo místním ochlazení pomocí postřiku. Nanesení mazadla při vyšších teplotách formy je však obtížné kvůli Leidenfrostovu jevu a vede ke spotřebě většího množství mazadla, což prodlužuje dobu cyklu a zvyšuje náklady. [35]

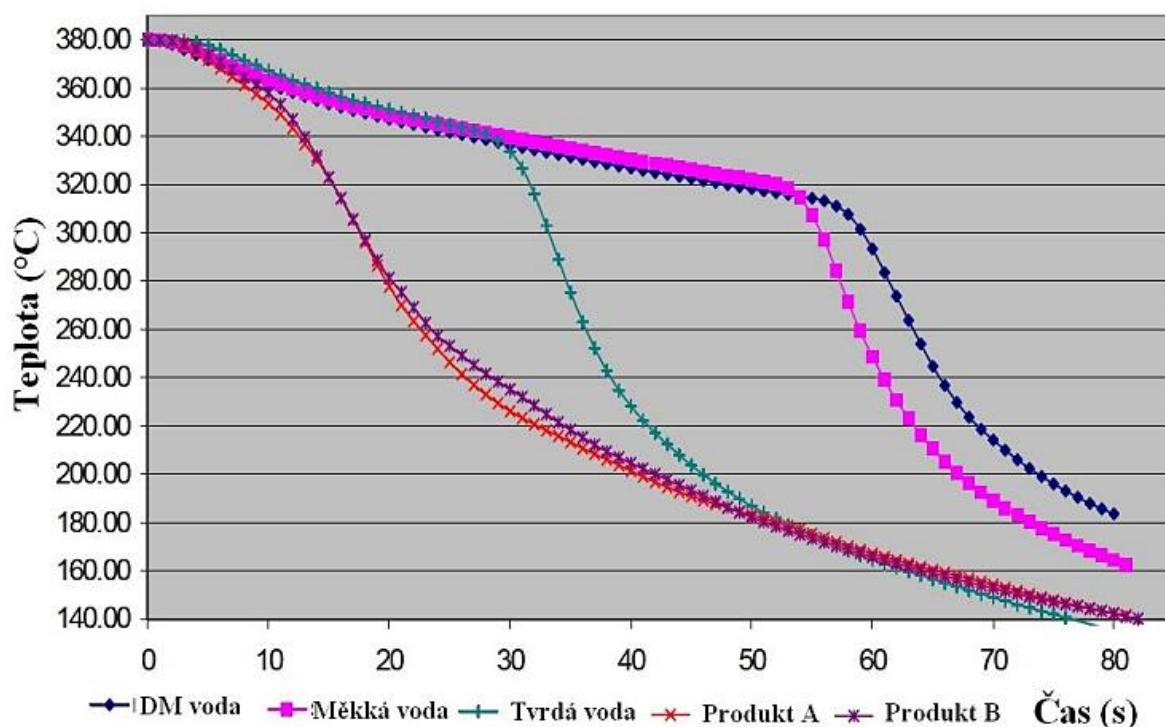
Pokud tedy přijde mazadlo na vodní bázi do přímého kontaktu s povrchem formy, jejíž teplota je výrazně vyšší než teplota varu vody, vytvoří se tzv. parní polštář, který zabrání mazadlu dostat se k povrchu formy viz Obr. 24. Voda se poté odpařuje mnohem pomaleji než pod Leidenfrostovou teplotou a v důsledku povrchového napětí se vytváří kuličky kapaliny, které jakoby poskakují na polštáři vodní páry, protože se mezi formou a mazadlem nemohou uplatnit adhezní síly. [35]



Obr. 24 Nanesení mazadla při teplotě vyšší než Leidenfrostova teplota [34].

Vývoj dělicích prostředků se proto zaměřil na dva samostatné přístupy. Prvním z nich byla snaha zvýšit Leidenfrostovu teplotu, čímž by se docílilo smáčení povrchu formy mazadlem i při vyšších teplotách. Tím by se zkrátil čas postřiku a výrazně snížili náklady. Druhým přístupem byla snaha vyvinout materiály, které by rychle vytvořili film na povrchu formy i při zvýšených teplotách. Studie zaměřená na vliv rozpuštěných solí přítomných ve vodě ukázala, že s jejich rostoucím množstvím se Leidenfrostova teplota zvyšuje viz Obr. 25. Za experimentálních podmínek měla demineralizovaná voda Leidenfrostovu teplotu 315 °C, měkká voda 320 °C

a tvrdá voda 340 °C. Produkt A a produkt B představují moderní dělicí prostředky umožňující vytvoření filmu i při zvýšených teplotách. Použitím těchto materiálů lze dosáhnout při ochlazení formy z teploty 380 °C na teplotu 250 °C úspory času postřiku o 20 – 30 %. [35]



Obr. 25 Graf znázorňující ochlazovací účinek v závislosti na minerálním složení vody [35].

4.2 Dělicí prostředky

Na začátku tlakového lití se jako dělicí prostředky využívaly těžké minerální oleje obsahující parafín a polycyklické aromatické sloučeniny, které byly vyráběny přímo z ropy po její první destilaci. V následujících letech se díky technologickému vývoji přestaly těžké oleje používat a byly nahrazeny přírodními rafinovanými minerálními oleji a syntetickými produkty, z nichž nejdůležitější jsou silikony. Pryskyřičné syntetické polymery není možné v tomto odvětví uplatnit, jelikož je nelze dobře roztavit, zůstávají v polotuhém stavu nebo procházejí další polymerizací. Dochází k jejich usazování na formě, kde tvoří překážku pro správné namazání, a proto jsou v praxi nepoužitelné. [36]

Dělicí prostředky lze rozdělit do pěti skupin:

- minerální oleje
- esterové oleje
- silikonové oleje
- vosky
- dělicí prostředky s povrchově aktivními látkami [36]

4.2.1 Minerální oleje

Dnes jsou využívány minerální oleje, které jsou více rafinované než v minulosti, ale obsah parafinů a aromatických látek je stále vysoký. Mají nižší viskozitu. [36]

4.2.2 Esterové oleje

Esterové oleje jsou přírodní a syntetické. Mezi přírodní řadíme rostlinné oleje sójové, slunečnicové nebo ricinové. Syntetické oleje jsou monofunkční estery, jako např. estery mastných kyselin s alkoholy nebo trifunkční estery kyseliny akrylové. Nejpoužívanější mastnou kyselinou je kyselina olejová. Esterové oleje jsou při mazání široce využívány, ale najdeme je pouze v několika dělicích prostředcích. Důvodem může být obtížnější emulgace než u minerálních olejů. [36]

4.2.3 Silikonové oleje

Silikonové oleje pro tlakové lití se nazývají alkyl aryl polysiloxany. Mají specifické vlastnosti oproti běžně známým polydimethylsiloxanům. Především se jedná o lepší mazací vlastnosti a snadnou natíratelnost. Tepelná odolnost je velmi vysoká jako u všech typů silikonů. [36]

4.2.4 Vosky

Moderní technologie nabízí zajímavou skupinu syntetických polyethylenových vosků, kterými lze nahradit minerální oleje. Využívají se vosky s bodem tání 100 °C s velmi nízkou viskozitou po roztavení. Při vysokých teplotách se chovají jako oleje, ale neobsahují škodlivé látky. Nevýhodou tohoto typu materiálu je, že při nízkých teplotách formy dojde k jejich ztuhnutí a zanesení formy. [36]

4.2.5 Dělicí prostředky s povrchově aktivními látkami

Povrchově aktivní látky jsou nezbytné k emulgaci účinných složek, kde tvoří vazbu mezi vodou a oleji či vosky, a proto jsou nezbytnou součástí dělicích prostředků na vodní bázi. Kvalita a stabilita emulze závisí zejména na výběru povrchově aktivních látek. Lze je rozdělit do tří skupin:

- **neiontové povrchově aktivní látky** – mají vysokou univerzálnost a účinnost. Jsou nejpoužívanější, i přesto že jejich biologická rozložitelnost je nízká a jejich rozkladu se dosahuje pouze u velmi účinných zařízení na úpravu vody.
- **aniontové povrchově aktivní látky** – jsou méně, ale stále využívány pro svou větší biologickou rozložitelnost. Mají menší univerzálnost než neiontové a jsou výrazně citlivé na změnu pH a tvrdost vody.
- **kationtové povrchově aktivní látky** – mají nízkou účinnost a jsou kyselé. V kyselém prostředí by mohlo snadno dojít ke korozi, a proto se kationtové emulze v tlakovém lití nevyužívají. [36]

4.3 Technologie postřiku

Postřik forem se v současnosti provádí především automaticky, jelikož ruční postřik formy je značně závislý na zkušenostech, postřehu a individuální výkonnosti obsluhujícího pracovníka. Automatický postřik forem snižuje spotřebu mazadla a zajišťuje konstantní kvalitu odlitků v krátkém čase. Nanášení dělicího prostředku se provádí pomocí postřikové hlavy opatřené tryskami. Nejvýhodnějším řešením je tzv. stavebnicový systém, např. od firmy Wollin GmbH viz Obr. 26, kdy lze nástroj velmi rychle sestavit a přizpůsobit ho geometrii formy tak, aby každá část formy byla ošetřena vlastní tryskou. [31; 33]

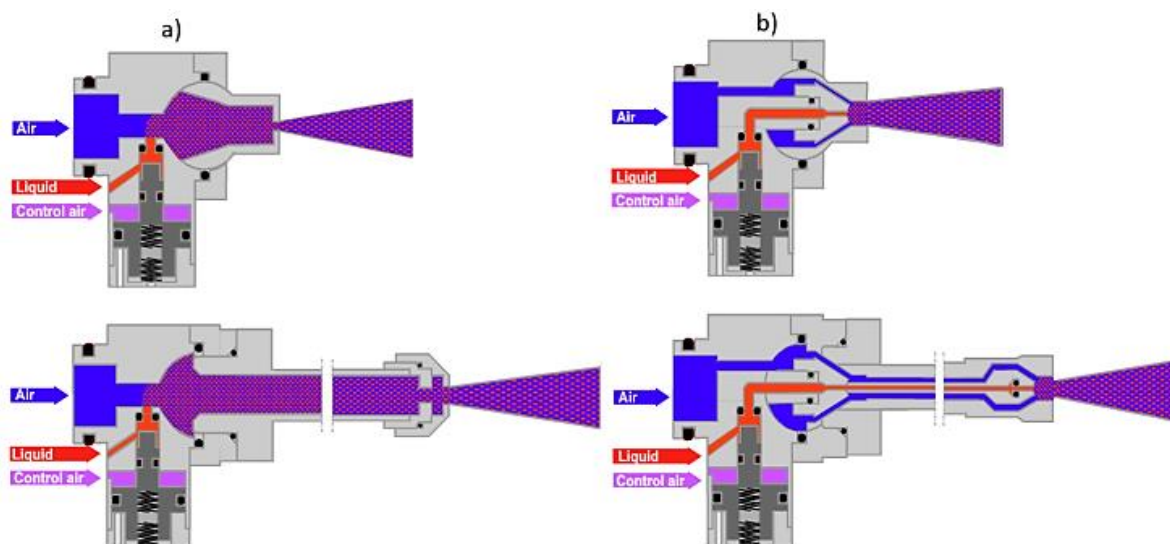


Obr. 26 Stavebnicový systém postřikové hlavy firmy Wollin GmbH [28].

Samotné nanesení dělicího prostředku na formu se provádí pomocí trysek, ve kterých dochází ke smíšení mazadla se vzduchem. V tlakovém lití se podle způsobu smíšení využívají dva základní typy trysek:

- **tryska s vnitřním směřováním** – pomocí řídicího vzduchu je ovládáno množství dělicího prostředku přivedeného do směšovací komory, ve které se mazadlo mísí s konstantně přiváděným tlakovým vzduchem a pomocí trysky je rozprašováno na povrch formy. Takto použitá tryska má jednodušší konstrukci a je cenově přijatelnější. Dále lze dosáhnout větší dopadové energie.
- **tryska s vnějším směřováním** – pomocí řídicího vzduchu je opět ovládáno množství mazadla, které je v tomto případě přivedeno až k samotnému vyústění trysky, kde je pomocí tlakového vzduchu rozprašeno na povrch formy. Při použití tohoto typu trysky jsou kapky dělicího prostředku konstantnější a jemnější. Tlak dělicího prostředku a tlak vzduchu jsou nezávisle nastavitelné.

Jednotlivé typy trysek nelze na postřikové hlavě kombinovat z důvodu rozdílného přívodu tlaku. Schématické zobrazení viz Obr. 27. [7; 24]



Obr. 27 Konstrukce trysky a) tryska s vnitřním směřováním, b) tryska s vnějším směšováním [7].

Takto sestavená postřiková hlava se poté nasadí na dvouosý manipulátor PSM (Power Spray Machine) viz Obr. 28 nebo na ošetřovacího robota viz Obr. 29. Výhodou manipulátoru je jeho snadná obsluha, uživatelsky příjemné programování, jednoduchá údržba a dlouhá životnost. Limitem manipulátoru je práce pouze ve dvou osách. Ošetřovací robot se využívá u forem s častou změnou projektů, a proto je výhodný spíše pro malé série. Výhoda robota je práce v šesti osách, díky které dokáže ošetřit i hůře přístupná místa. Pro velké lící stroje a nadměrné odlitky se využívá portálový systém pracující ve třech osách umožňující i výkyv postřikové hlavy viz Obr. 30. [37]



Obr. 28 Dvouosý manipulátor [37].



Obr. 29 Ošetřovací robot [37].



Obr. 30 Portálový systém [38].

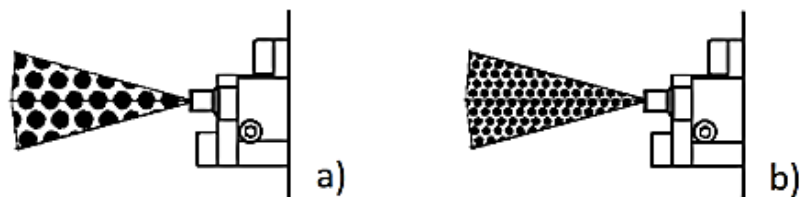
Součástí pracoviště vysokotlakého licího stroje je také dávkovací stanice, která zároveň slouží jako zásobník mazadla. Používají se nejčastěji dva typy dávkovacích stanic. První z nich je zásobník mazadla MDA 20 s integrovaným směšovacím zařízením s kapacitou 100 litrů, kde dochází k neustálému míchání mazadla s vodou dle předem nastavené koncentrace. Druhý typ dávkovací stanice je MDA 100, kde je množství přimíchávané vody systémem odměřováno prostřednictvím digitálního vodoměru k dosažení požadovaného množství vody pro daný směšovací poměr. Zařízení tak vždy namíchá čerstvou směs pro každý cyklus. Navíc obsahuje digitální snímač průtoku pro měření a ukládání spotřeby namíchané směsi. Jednotlivé typy dávkovacích stanic jsou znázorněny na Obr. 31. [28]



Obr. 31 Dávkovací stanice MDA 20 a MDA 100 [39].

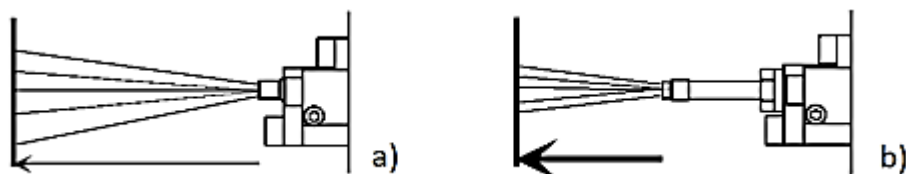
Jak bylo popsáno na začátku této kapitoly, základní podmínka pro úspěšné nanesení dělicího prostředku je správný rozsah teplot formy. Další podstatnou podmínkou pro výrobu vysoce kvalitních dílů je úplné odpaření vody. To souvisí s vlastnostmi postřikového proudu, mezi něž patří hustota postřiku, která je definovaná jako objem mazadla dopadajícího za jednotku času na jednotku plochy, dále velikost a rychlost kapek dělicího prostředku, a nakonec velikost plochy na níž je postřik aplikován. Tyto vlastnosti jsou ovlivněny těmito procesními parametry:

- **tlak vzduchu** – zajišťuje rozprášení mazadla a urychlení kapek ve směru povrchu formy. Kapky jsou tím jemnější a rychlejší, čím větší je tlak tlakového vzduchu.



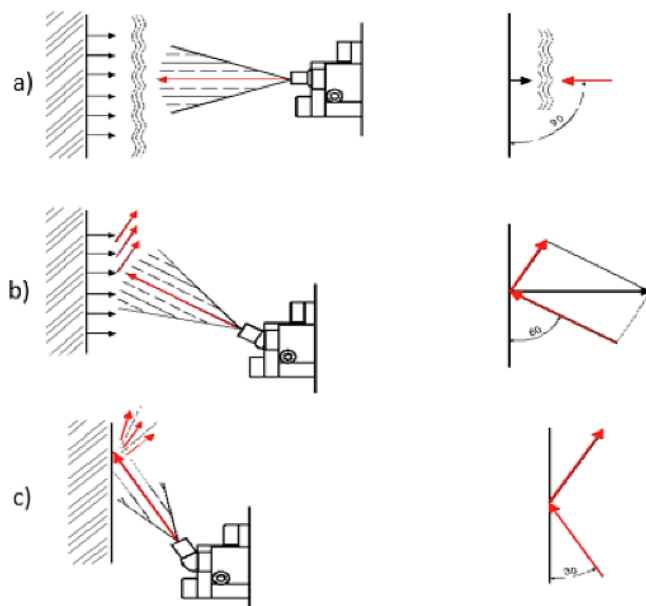
Obr. 32 Vliv tlaku vzduchu na jemnost rozprášení mazadla a) nízký tlak vzduchu – hrubé rozprášení, b) vysoký tlak vzduchu – jemné rozprášení [24].

- **tlak dělicího prostředku** – udává objemový průtok mazadla tryskou a tím hustotu postřiku.
- **doba postřiku** – společně s tlakem dělicího prostředku určuje jeho spotřebu
- **vzdálenost mezi tryskou a formou** – má vliv na velikost postřikované plochy, hustotu postřiku, velikost a rychlost kapek mazadla. Pro místa s vyšší teplotou se volí kratší vzdálenost než pro studenější místa. [33]



Obr. 33 Vzdálenost trysek od formy a) velká vzdálenost - malá energie dopadu, větší plocha postřiku, b) menší vzdálenost - vysoká energie dopadu, menší velikost postřikované oblasti [7].

- **úhel mezi osou trysky a rovinou formy** – nastavení úhlu trysky je důležité pro správné nanesení mazadla. Při kolmém dopadu mazadla na formu dochází k zachycení par uvnitř postřiku, které nemohou odcházet z formy a vytváří se tak parní polštář, jenž brání dalšímu nánosu mazadla. Při nastavení trysky pod příliš malým úhlem dochází k odrazu mazadla od povrchu formy. [7; 24; 33]



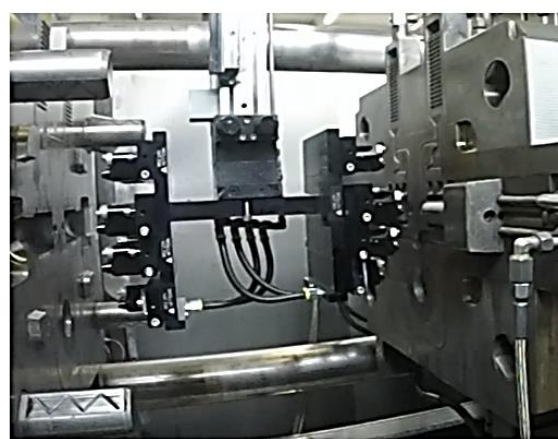
Obr. 34 Nastavení směru trysky a) úhel trysky 90° - pára nemůže odcházet a tvoří se parní polštář, b) úhel trysky 60° - pára může stoupat nahoru, c) úhel trysky 30° - mazadlo se odráží od formy [24].

5 MIKROPOSTŘÍK

Jak bylo uvedeno v předešlé kapitole, ošetření formy je důležitým krokem licího cyklu, který usnadňuje vyjímání odlitku a zabraňuje nalepování kovu na formu během tuhnutí. Stále rostoucí tlak na ekologii procesu a snižování nákladů při odlévání odlitků vedl firmy a instituty k vývoji technologie mikropostřiku, dnes patřící mezi moderní způsoby nanášení dělicího prostředku. Přímé a vedlejší přínosy mikropostřiku jsou:

- minimální výkyvy tepelného zatížení formy
- vyšší životnost formy (2x - 4x)
- snížená zmetkovitost
- kratší doba cyklu
- úspora nákladů na energie
- minimalizace nákladů na likvidaci odpadních vod
- snížení spotřeby separátoru [21]

Použití technologie mikropostřiku tedy přináší značné výhody, ale s jeho zavedením jsou spojena jistá úskalí, na která je třeba se zaměřit. Základním rozdílem mezi mikropostřikem a konvenčním způsobem ošetření formy je použití čistého koncentrátu ve velmi malé dávce a tím absolutní eliminace vody při nanášení postřiku na formu viz Obr. 35. Při použití čistého koncentrátu odpadá schopnost postřiku ochladit povrch formy a mazadlo slouží pouze k vytvoření separačního filmu. Z tohoto důvodu je nutné v některých případech u tvarově složitějších odlitků změnit konstrukci formy a mít co nejvíce optimalizovanou její vnitřní termoregulaci. Dalším důležitým aspektem je také potřeba kvalifikovaného personálu, jelikož oproti konvenčnímu způsobu ošetřování je technologie mikropostřiku velmi citlivá na nastavení. Společně s tím je také velmi důležité udržovat zařízení a periferie licího stroje ve velmi dobrém technickém stavu. Jakýkoliv technický problém se při provozu s mikropostřikem může ihned negativně projevit např. odstávkami stroje nebo špatnou kvalitou odlitků. Slévárna, která dokáže všechna tahle úskalí zvládnout, může lití pomocí technologie mikropostřiku značně zefektivnit a stát se tak konkurenceschopnější. [21; 40; 41]



Obr. 35 Rozdíl mezi standardním postřikem a mikropostřikem [38].

5.1 Zařízení pro technologii mikropostřiku

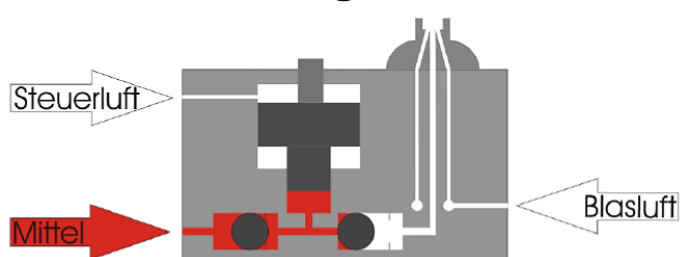
Zařízení pro technologii mikropostřiku se zásadně neliší od zařízení využívaného při standardním postřiku. Opět je navržena postřiková hlava, která je opatřena speciálními tryskami určenými pro mikropostřik a ofukovacími tryskami. Ofuk formy v tomto případě probíhá nejen po postřiku, ale i před ním, a to z důvodu odstranění nečistot a mírného ochlazení formy. Pro technologii mikropostřiku se používají 2 typy trysek viz Obr. 36:

- **DD tryska** – jedná se o tzv. objemovou dávkovací trysku, která obsahuje komůrku, díky níž je na každý cyklus použito vždy stejné množství mazadla. Na začátku nasazení postřikové hlavy je nezbytně nutné odvzdušnit trysku. To se provádí ručně pomocí vyšroubování šroubku, a proto je tato tryska vhodná pro menší stříkací stroje.
- **DDV tryska** – také se jedná o objemovou dávkovací trysku, která se od DD trysky liší tím, že je samo-odvzdušňovací a je proto určena pro složitější aplikace. Pro použití těchto speciálních trysek je potřeba tlaku >8 bar. Pokud tohoto tlaku nedosahuje standardní rozvod vzduchu, je potřeba použít maximátor neboli stanici na zvýšení tlaku připojenou na tento rozvod viz Obr. 38. Do zásobníku se natlakuje dostatečný objem vzduchu, který se poté pustí o tlaku 8-10 bar do systému. Použitím maximátoru se výrazně sníží spotřeba mazadla při nasazení nové postřikové hlavy. Doba odvzdušnění se zkrátí na cca 10 s. Alternativním řešením může být klasický kompresor se vzdušníkem. Konstrukce trysek je znázorněna na Obr. 37. [21; 38]

Oba typy trysek se dále dělí podle maximálního objemu, který je možné snižovat přiškrcením proudu pomocí šroubu. Maximálního průtoku je dosaženo vždy při 6 otáčkách. Rozdělení trysek je znázorněno v Tab. 3. [21]

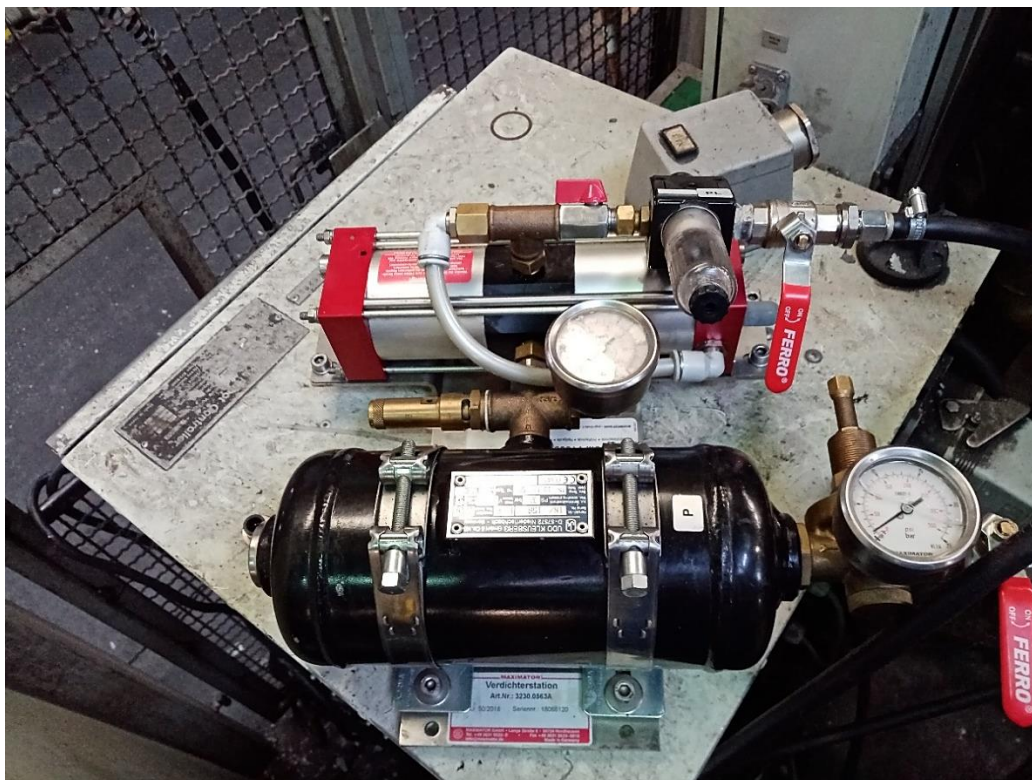
Tab. 3 Rozdělení trysek podle maximálního objemu [42].

Typ trysky	Maximální objem [ml]	Objem na jednu otáčku [ml]
DD/DDV 3	0,043	0,0072
DD/DDV 4	0,076	0,0127
DD/DDV 5	0,119	0,0198



Obr. 36 DD a DDV tryska [38].

Obr. 37 Konstrukce DD a DDV trysek [21].



Obr. 38 Stanice pro zvýšení tlaku.

Mezistupněm mezi standardními tryskami a tryskami pro mikropostřik jsou FSD trysky viz Obr. 39, které se využívají při výrobě odlitků, u nichž není možné provést maskovou hlavu. Jedná se o optimalizovanou konvenční trysku s nízkou spotřebou mazadla umožňující postřik v pohybu. Dochází tedy ke kontinuálnímu nanášení mazadla. Nevýhodou tohoto typu trysek je jejich náchylnost na nečistoty kvůli příliš jemnému vrtání. [21; 38]



Obr. 39 FSD tryska [38].

Sestavená postřiková hlava se stejně jako v případě standardního postřiku nasadí na dvouosý manipulátor nebo na ošetrovacího robota, kde je separátně natažený okruh určený pouze pro mikropostřik, který je zapojen z postřikové hlavy až k samotnému dávkovací koncentrátu. Pomocí speciálního adaptéru je pak možná snadná změna technologie z mikropostřiku na standardní postřik a naopak. Tím odpadá potřeba čistit vedení manipulátoru nebo ošetrovacího robota při změně technologie, která standardně trvá cca 3-4 hod. Pro dávkování mazadla se využívají speciální dávkovací stanice určené přímo pro technologii mikropostřiku s pneumatickým ovládáním umožňující jemné nastavení tlaku mazadla 0,15 – 3 bar. Jedná se o tyto základní typy:

- **TOP 14** – 15 l tlakový zásobník mazadla, který obsahuje signální lampu k zobrazení nízké hladiny mazadla. Zařízení sleduje netěsnosti v systému. Nevýhodou je manuální doplňování mazadla.
- **OSA 1** – 50 l tlakový zásobník mazadla obsahující signální lampu k zobrazení nízké hladiny mazadla se signálem k zastavení stroje. Umožňuje digitální odměřování výšky hladiny. Při rychlém poklesu hladiny dojde k uzavření magnetického ventilu a tím se zabrání úniku mazadla na pracoviště.
- **OSA 2** – dvě tlakové nádoby každá o kapacitě 15 l. Umožňuje automatické doplňování mazadla ze sudu. Vždy pracuje pouze jedna nádoba a druhá se v ten moment může doplnit, a tudíž není nutné zastavovat stroj. [21; 28]



Obr. 40 Dávkovací stanice zleva TOP 14, OSA 2 a OSA 1 [28].

Pro technologii mikropostřiku je možné použít různá mazadla. Jednou z možností je řada separátorů Metal Cast firmy Lubrochem. Jedná se o novou koncepci separátorů pro mikropostřik bez mísení s vodou na bázi oleje nebo vody, jejichž přínosem je:

- snížení spotřeby vody
- zvýšení produkce a životnosti formy
- snížení porezity v odlitcích [43]

Firma Šebesta-slужby slévárnám s.r.o. doporučuje ověřený separátor od společnosti Chem-Trend HERATM (High Efficiency Release Agent), který byl vyvinut právě pro technologii mikropostřiku. Jedná se o koncentrát na vodní bázi, který se neředí a díky svému chemickému složení je ideální pro provoz při nízkých i vysokých teplotách a přináší řadu výhod:

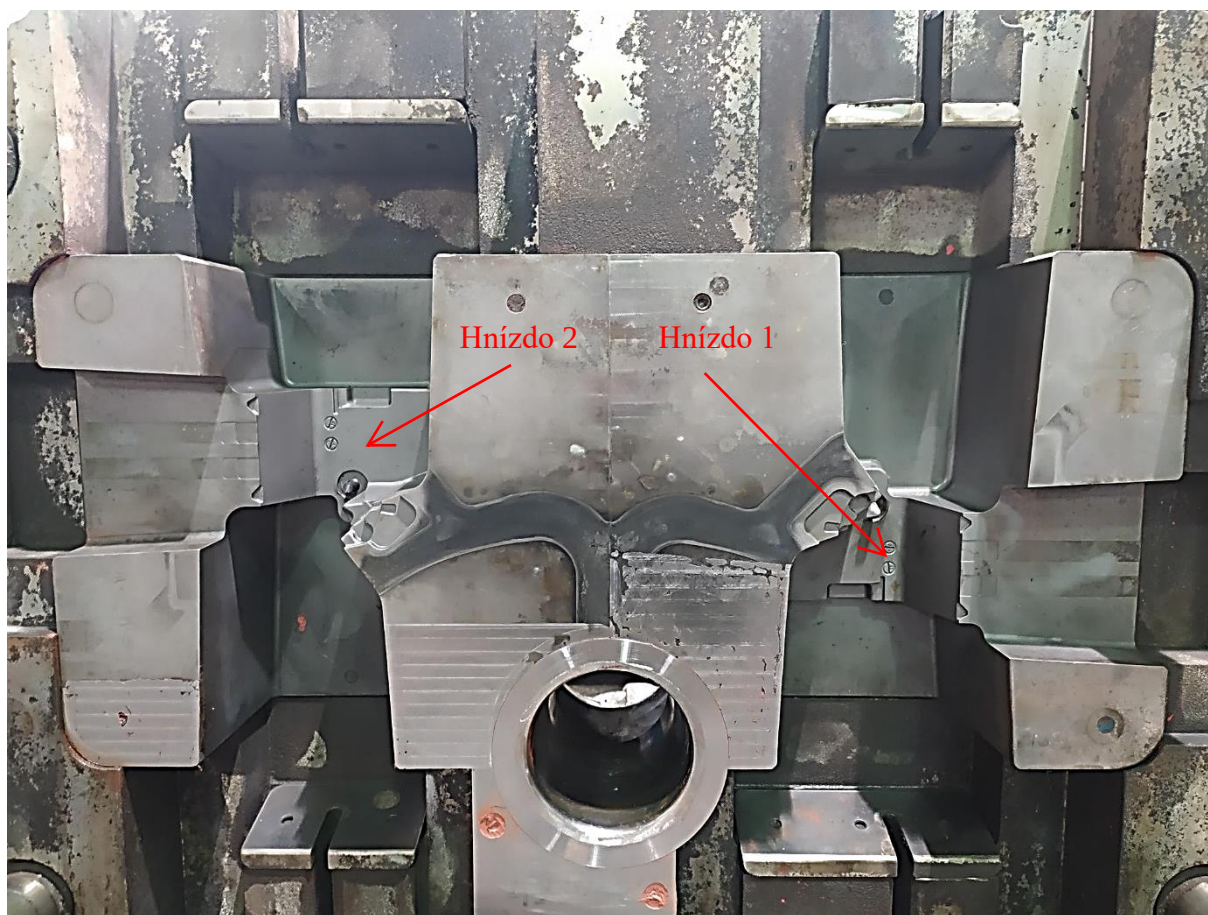
- výborné oddělovací vlastnosti
- vhodné pro složité odlitky a strukturální díly
- snížení rychlosti pístu z důvodu teplejší formy
- snížení zmetkovitosti odstraněním vnitřní porezity z důvodu absence vody
- minimalizuje nebo eliminuje odpadní vody
- eliminuje problémy spojené s aktivitami biologického růstu [21; 44]

6 PRAKTICKÁ ČÁST

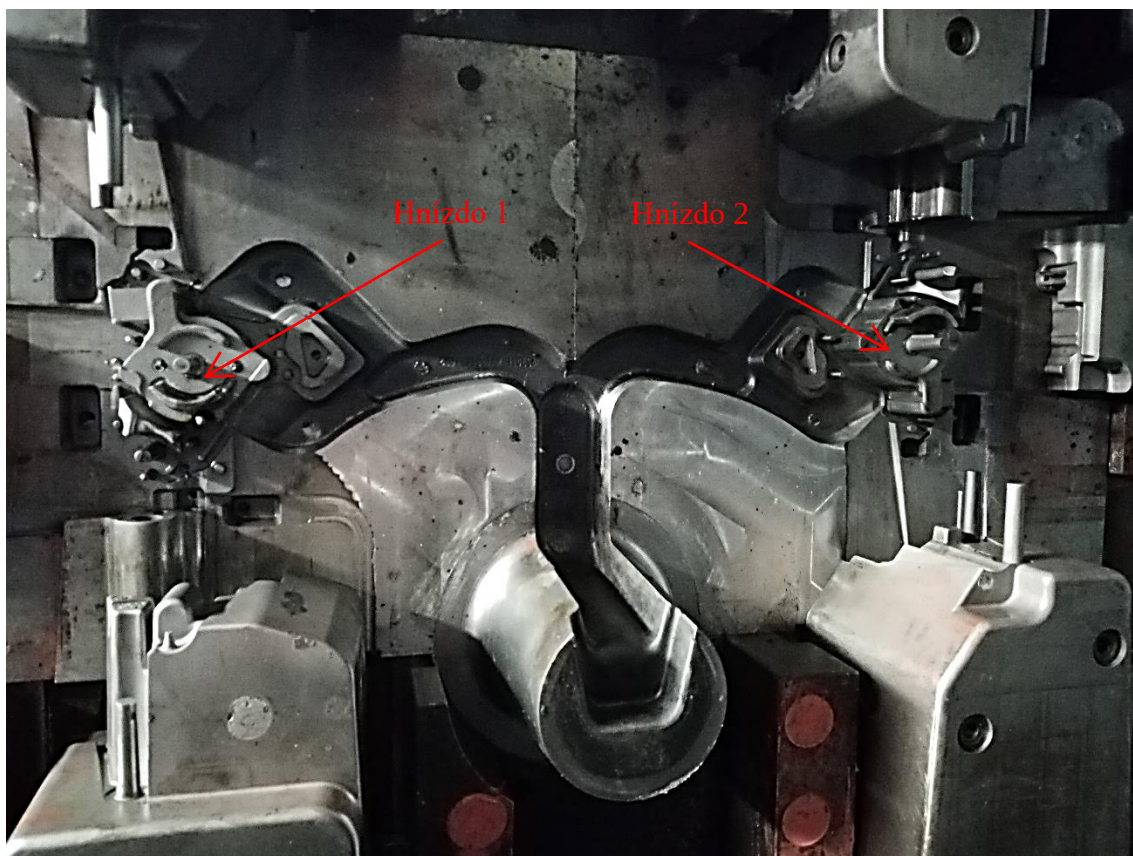
V rámci praktické části bylo úkolem zanalyzovat ve slévárně KOVOLIT Modřice a.s. na vytypovaném odlitku zavedení technologie mikropostřiku a na základě poznatků zpracovat metodiku zavádění této technologie do podmínek slévárny vysokotlakého lití. V tomto případě se jednalo o přechod z konvenčního způsobu postřiku na již zmíněný mikropostřik. Hlavními důvody k zavedení technologie mikropostřiku bylo zvýšení životnosti formy a úspora energií, dále snížení zátěže na životní prostředí absencí odpadních vod a v neposlední řadě technologický posun firmy. Pro tento účel byl vybrán odlitek ze slitiny $AlSi9Cu3(Fe)$, který slouží jako těleso olejového čerpadla. Jedná se o tvarově složitý odlitek s množstvím předlitých děr.

6.1 Popis technologie při konvenčním způsobu postřiku

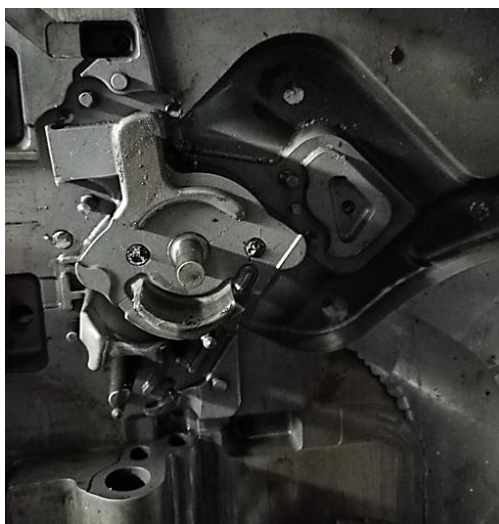
Při standardním způsobu postřiku byla použita forma s indexem F, která byla nasazena na vysokotlaký stroj se studenou komorou Bühler Evolution 66 D, pozice 11 s uzavírací silou 6600 kN. Jedná se o dvojnásobnou formu, v níž jsou odlitky zrcadlově převráceny. Forma se skládá z pevné a pojízdné poloviny viz Obr. 41 a Obr. 42. Na pojízdné polovině je hlavní tvarová část odlitku, včetně vtokového kanálu zaústějícího do každého odlitku dvěma zářezy, a dále posuvná jádra pro předlití otvorů ovládaná pomocí tahačů.



Obr. 41 Pevná polovina formy.



Obr. 42 Pojízdná polovina formy.



Obr. 43 Detail tvarové části formy.

Pro pozdější porovnání s technologií mikropostríku byly prověřeny následující parametry:

- Spotřeba vody s mazadlem a koncentrátu mazadla viz Tab. 4
- Množství odpadní vody viz Tab. 5
- Spotřeba el. energie temperačních zařízení a celého pracoviště viz Tab. 6
- Čas cyklu a parametry lití viz Obr. 44

Tab. 4 Spotřeba vody s mazadlem a koncentrátu mazadla při standardním postřiku.

Čas cyklu stroje [s]	Cyklů/h	Spotřeba vody s mazadlem na cyklus [ml]	Spotřeba 2 % koncentrátu mazadla na cyklus [ml]	Typ mazadla
55	65,45	600	12	Metal Cast DL 950 KX

Tab. 5 Množství odpadní vody při standardním postřiku.

Cyklus stroje [s]	Cyklů/h	Objem odpadní vody/h [l]	Objem odpadní vody na cyklus [ml]
55	65,45	8	122

Tab. 6 Spotřeba el. energie temperačních zařízení při standardním postřiku.

Plný automatický režim stroje					
	Typ temperace	Spotřeba el. energie [kW/h]			
		Měření č. 1	Měření č. 2	Měření č. 3	Měření č. 4
	vodní ohřev 2 x 120 °C (Poj A+Poj B)	2,78	2,56	2,69	2,49
	vodní ohřev 2 x 120 °C (Poj C+Poj D)	4,03	4,90	5,00	4,70
	olej 100 + 150 °C (Poj A+Poj B)	2,72	2,5	2,53	2,42
	olej 180 + 150 °C (Pev A+Kom)	9,87	9,63	9,5	9,61
Celkem		19,40	19,59	19,72	19,22
Průměr		19,48			
Celé pracoviště		75,69			

Doba tuhnutí + dotlak		Doba cyklu	KC –	Otevření formy	Zdvih vyhazovačů	Vyhazovače vpřed	Vyhazovače vzad	
13 ± 1 [s]		55 ± 2 [s]		780 ± 0 [mm]	30 ± 3 [mm]	0 ± 0 [s]	0,5 ± 0,1 [s]	
Parametry stroje								
1. Fáze -- předplňovací	Pohyb lis. pístu	[mm]	[m/s]	Přepnutí dotlaku			Dotlak - 3 fáze	
	1. rychlost	140 ± 10	0,2 ± 0,1	Skutečný plnicí tlak (orientační hodnota)				
				~	–	[bar]		
				[bar]		[s]		
2. rychlost	265 ± 10	0,2 ± 0,1	Dráha	350 ± 10 [mm]	1	400 ± 30	0 ± 0	
3. rychlost	305 ± 10	0,6 ± 0,2	Rychlost	999 ± 0 [%]	2	400 ± 30	0,05 ± 0,02	
2. Fáze -- plnicí	4. rychlost	330 ± 10	4,0 ± 0,3	Tlak	180 ± 10 [bar]	3	850 ± 30	0,08 ± 0,03
	Brzda	445 ± 5	1,5 ± 0,1	Tlak dusíku v akumulátoru (nastavení)		Tlak dusíku v multiplikátoru (nastavení)		
				190 ± 0 [bar]		150 ± 0 [bar]		

Obr. 44 Parametry stroje při standardním postřiku.

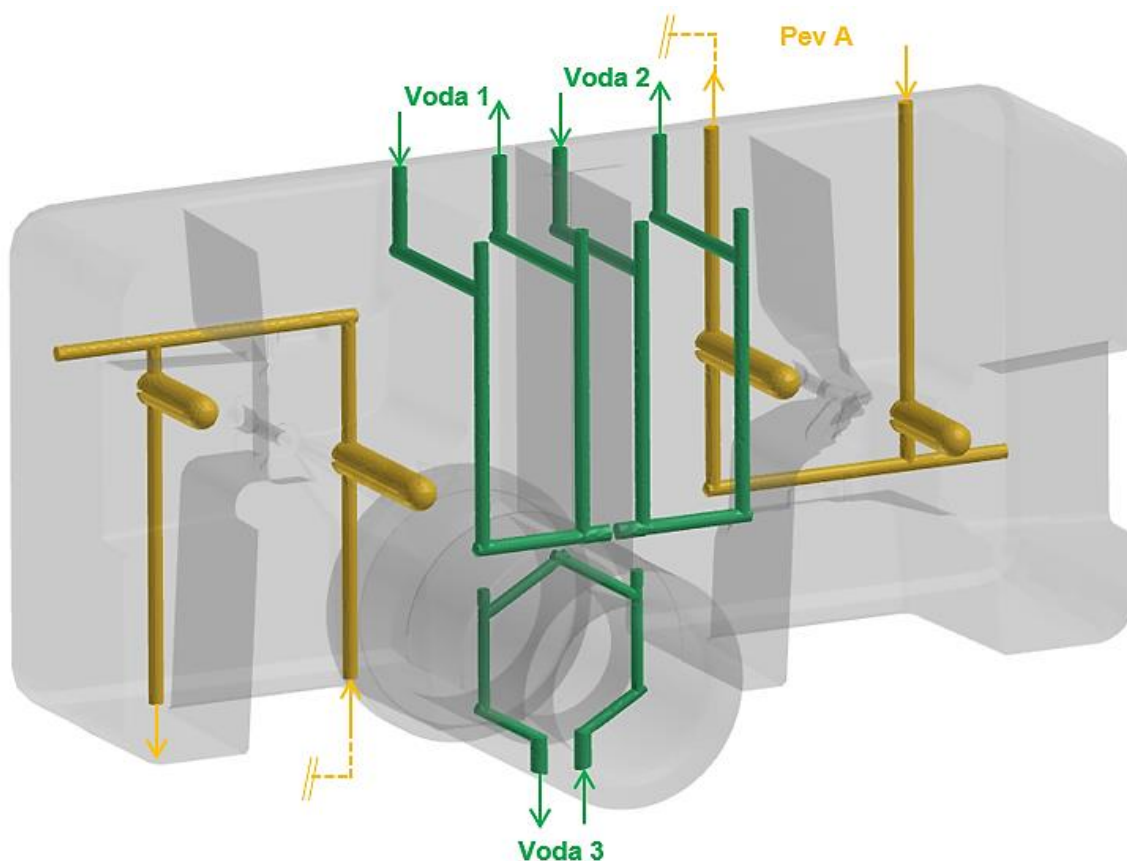
6.2 Temperace formy

Temperace formy je provedena pomocí čtyř temperačních zařízení od firmy Thermobiehl. Při standardním postřiku temperace formy slouží k ohřevu i chlazení a je zajištěna olejem, vodním ohřevem a vodou z rozvodu o teplotě okolí. Jelikož při použití mikropostřiku slouží temperace výhradně k chlazení, byla olejová temperační zařízení převedena na vodní ohřev, ostatní okruhy zůstaly stejné jako při standardním postřiku. V průběhu zkoušky byla teplota vody na pevné polovině nastavena na teplotu 100 °C a na pojízdné polovině nejprve na teplotu 80 °C a poté z důvodu nedostatečného chlazení byla následně snížena na teplotu 50 °C. Jednotlivé okruhy jsou znázorněny na následujících schématech:

6.2.1 Schéma temperace pevné poloviny

Zelené okruhy – chlazení vodou z rozvodu o teplotě okolí. **Voda 1** a **Voda 2** slouží k chlazení vtokového kanálu. Při standardním postřiku nejsou zapojeny, při mikropostřiku ano. **Voda 3** slouží k chlazení komory.

Žlutý okruh – slouží k ohřevu pevných vložek pomocí oleje o teplotě 180 °C. Při mikropostřiku převeden na vodní ohřev o teplotě 100 °C.



Obr. 45 Schéma jednotlivých temperačních okruhů pevné poloviny.

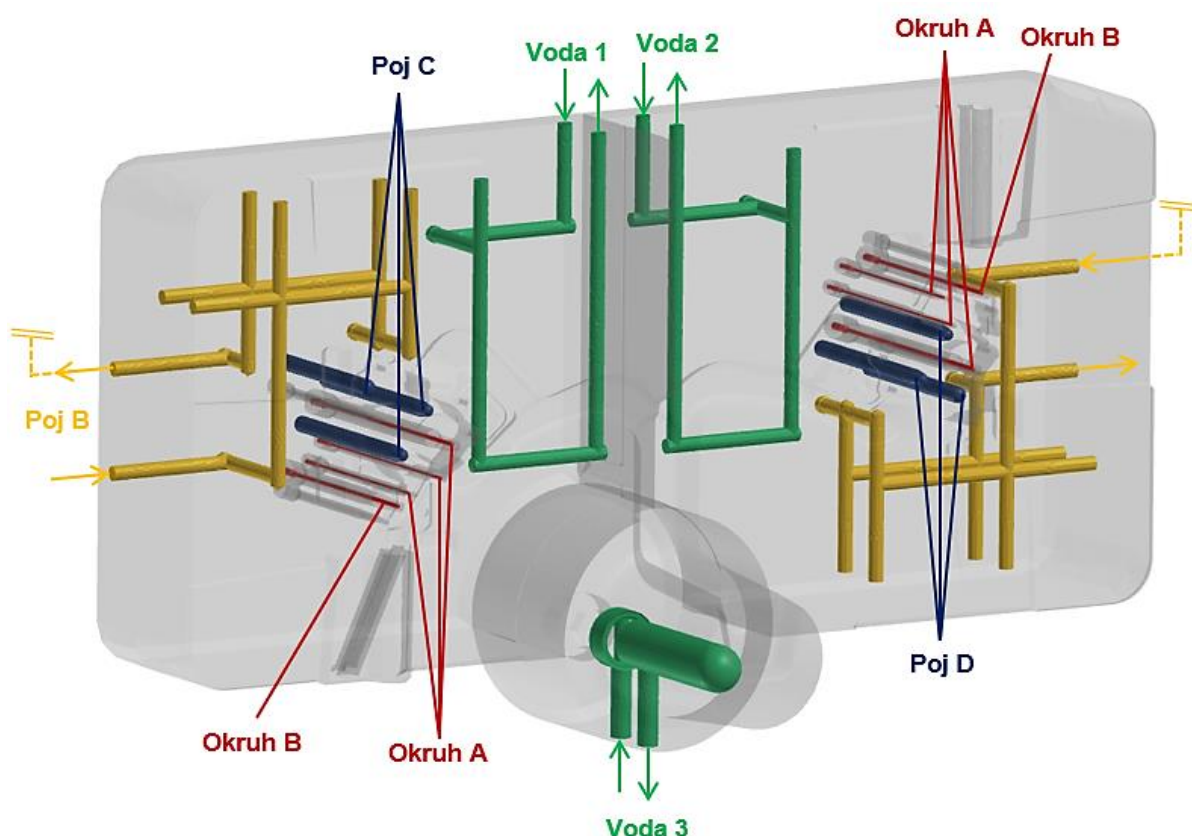
6.2.2 Schéma temperace pojízdné poloviny

Zelené okruhy – chlazení vodou z rozvodu o teplotě okolí. **Voda 1** a **Voda 2** slouží k chlazení vtokového kanálu. **Voda 3** slouží k chlazení tzv. „protinosu“.

Žlutý okruh – slouží k chlazení pojízdných vložek pomocí oleje o teplotě 100 °C. Při mikropostřiku převeden na vodní ohřev o teplotě 50 °C a označen jako **Poj G**.

Modré okruhy – systém paralelních fontánek, které slouží k chlazení pomocí vodního ohřevu o teplotě 120 °C. Při mikropostřiku teplota snížena na 50 °C.

Červený okruh – chlazení jader pomocí Jet-Cooling.



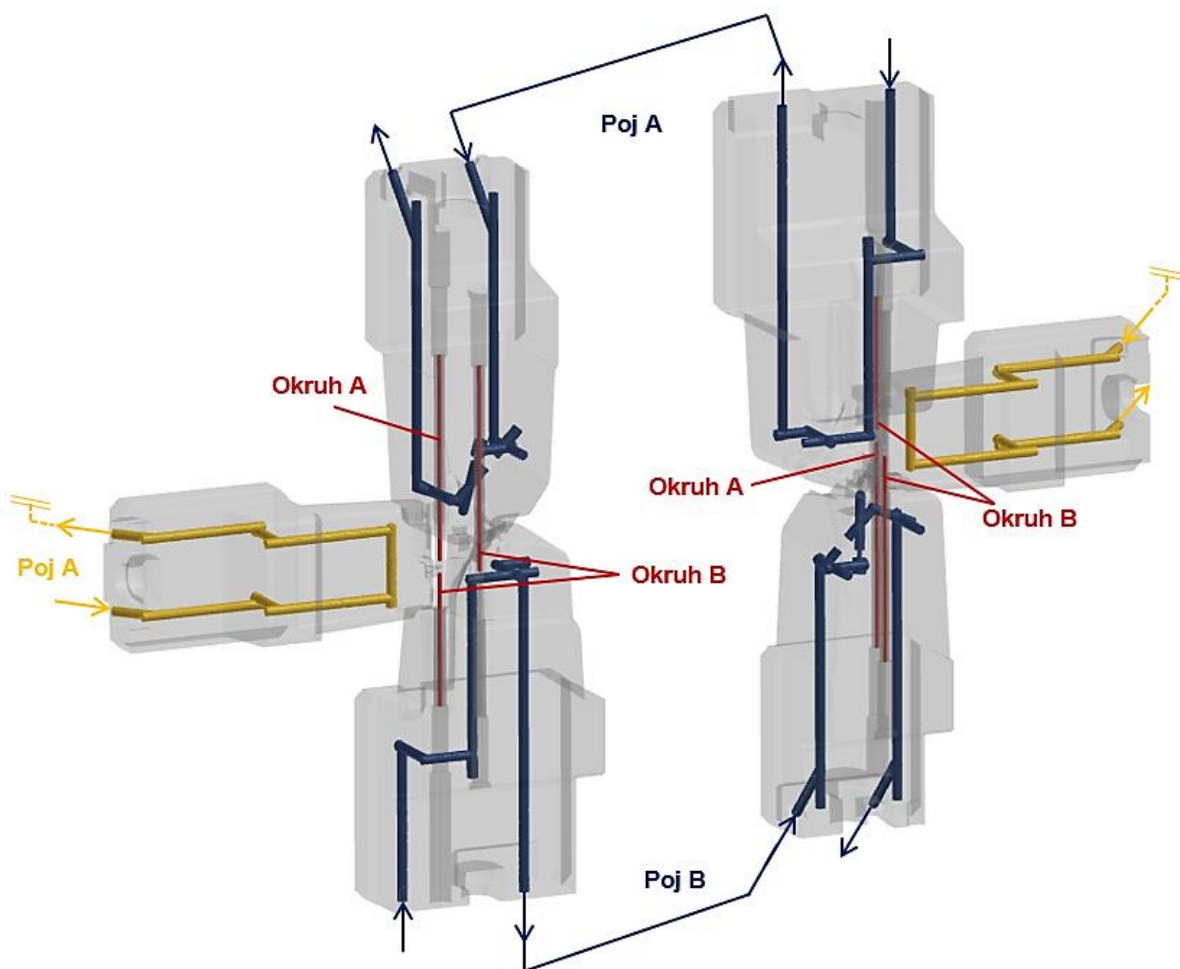
Obr. 46 Schéma jednotlivých temperačních okruhů pojízdné poloviny.

6.2.3 Schéma temperace tahačů jader

Žlutý okruh – slouží k chlazení bočních tahačů jader pomocí oleje o teplotě 150 °C. Při mikropostřiku převeden na vodní ohřev o teplotě 50 °C a označen jako **Poj E**.

Modré okruhy – **Poj A** a **Poj B** slouží k chlazení horních a spodních tahačů jader pomocí vodního ohřevu o teplotě 120 °C. Při mikropostřiku teplota snížena na 50 °C.

Červený okruh – chlazení jader pomocí Jet-Cooling.

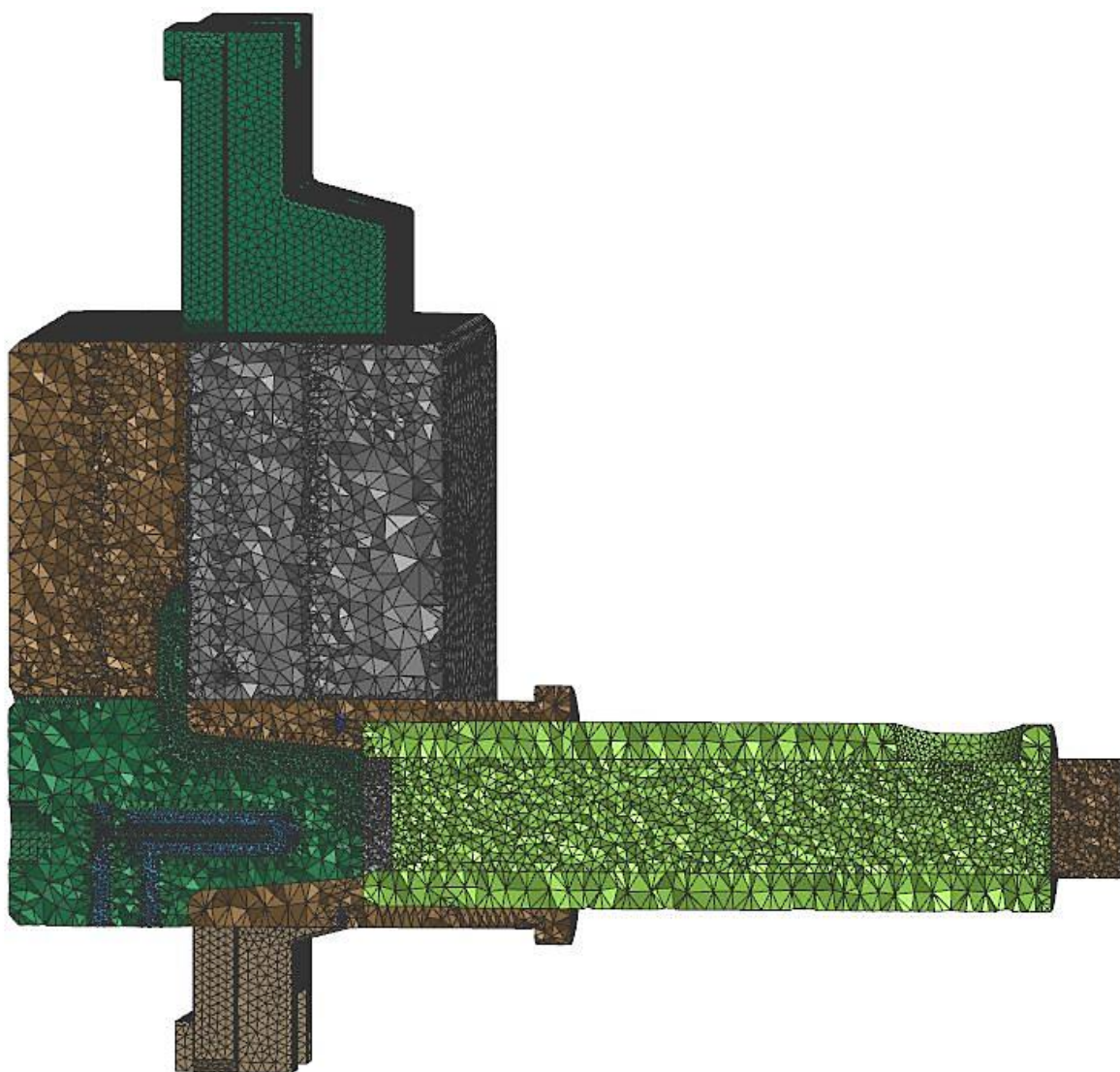


Obr. 47 Schéma jednotlivých temperačních okruhů tahačů jader.

6.3 Popis technologie při mikropostřiku

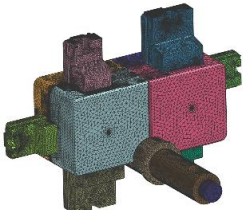
Při přechodu z konvenčního způsobu postřiku na mikropostřik je výhodné provést testování nejprve na stávající formě, zde vyladit všechny parametry a po získání stabilní produkce aplikovat na novou formu. Před testováním mikropostřiku je doporučeno provést simulaci teplotního pole k odhalení přehřátých míst. Nejprve při konvenčním způsobu postřiku, kdy se simulace porovná s termo snímkami pořízenými v reálném provozu, na základě kterých se poté upravuje zejména koeficient přestupu tepla mezi odlitkem a formou a koeficient přestupu tepla vyjadřující velikost odvodu tepla pomocí postřiku tak, aby se simulace co nejvíce přiblížila k realitě. Simulace byla provedena v programu ProCAST v těchto postupných krocích:

- Importování CAD dat formy
- Metodou konečných prvků vytvoření povrchové (2D) sítě s počtem 1 116 719 elementů a objemové (3D) sítě s počtem 7 577 402 elementů viz Obr. 48.
- Nastavení počátečních podmínek simulace uvedených v Tab. 7.
- Pro jednotlivé temperační kanály nastavení druhu média a jejich vstupní teploty dle schémat temperace.
- Nastavení koeficientů přestupu tepla na jednotlivá rozhraní
- Nastavení parametrů cyklu viz Obr. 49.
- Spuštění simulace



Obr. 48 Povrchová a objemová síť.

Tab. 7 Počáteční podmínky simulace.

Model	Obrázek	Materiál	Teplota [°C]
Odlitek		AlSi9Cu3(Fe)	600
Forma		ORVAR SUPREME	80 před prvním cyklem

Simulation Parameters

File Category Unit

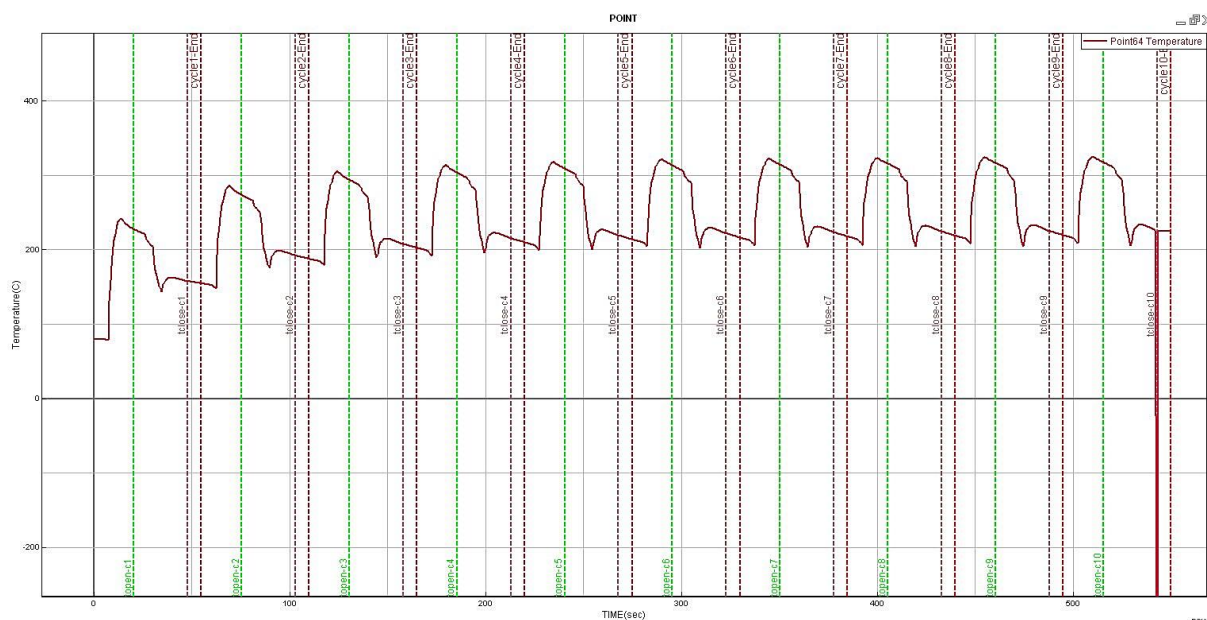
Pre-defined Parameters: ☒ Show String Selection

General Cycles Thermal Flow Miscellaneous +

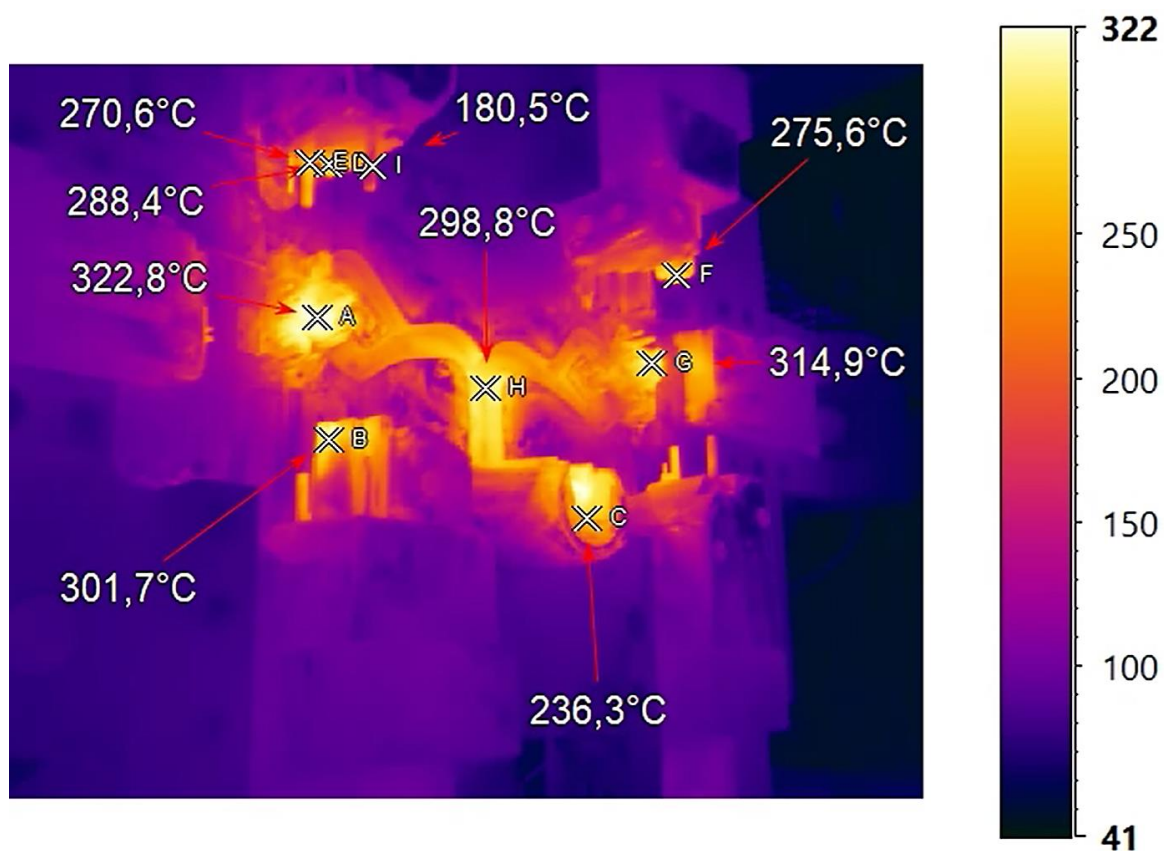
Parameter	Type	Value	Value Unit
NCYCLE Number of cycles	Const.	10	
TOPEN Mold opening time	Const.	2.0500e+01	sec
TEJECT Part ejection time	Const.	2.6200e+01	sec
TBSPRAY Start time of the die spraying	Const.	3.0300e+01	sec
TESPRAY End time of the die spraying	Const.	3.4800e+01	sec
TBBLOW Start time of blow phase	Const.	3.4900e+01	sec
TEBLOW End time of blow phase	Const.	4.6800e+01	sec
TCLOSE Mold closing time	Const.	4.8000e+01	sec
TCYCLE Duration of the cycle	Const.	5.5000e+01	sec
CYCLEF Run flow calculation at last ...	Const.	OFF	
UFSPRAY Activate user function for di...	Const.	OFF	

Obr. 49 Parametry cyklu při standardním postřiku.

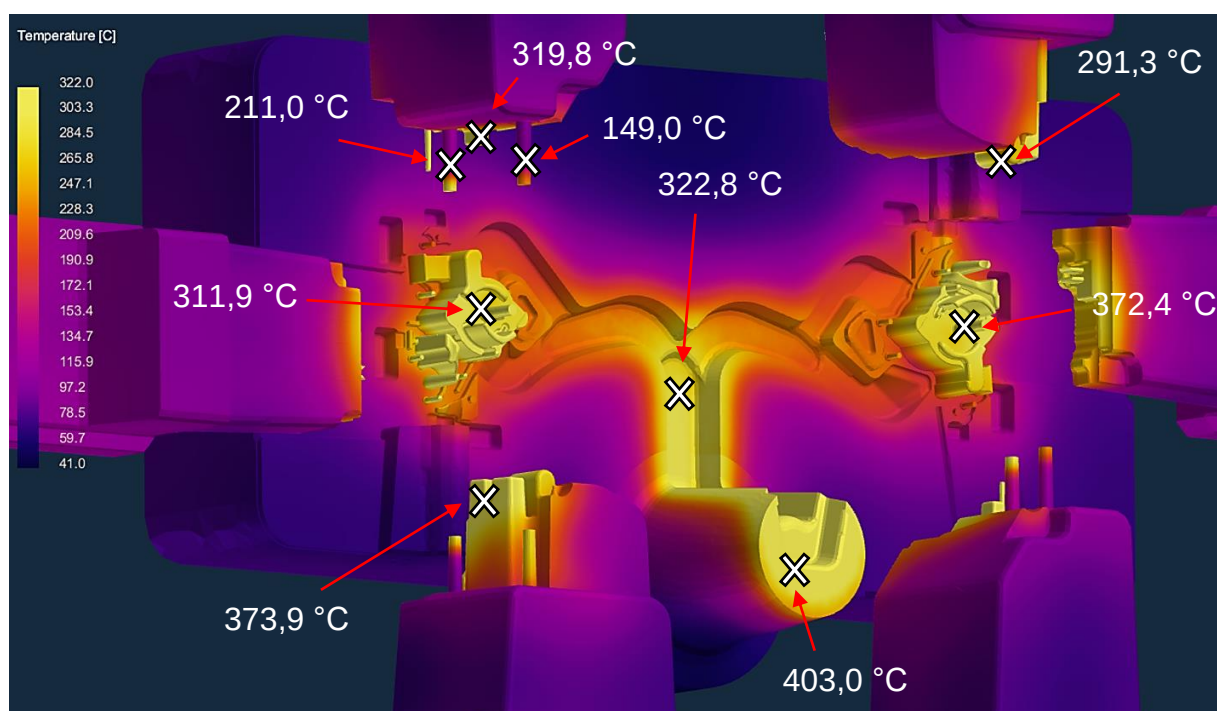
Z Obr. 50 je patrné, že k ustálenému stavu dojde přibližně v šestém cyklu, a proto se doporučuje provést minimálně deset cyklů. Koeficient přestupu tepla mezi formou a odlitkem byl nastaven na hodnotu $3000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ a koeficient přestupu tepla pro postřik $2600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Na Obr. 51 až Obr. 54 je znázorněné porovnání teplotního pole formy reálného procesu a simulace před a po standardním postřiku.



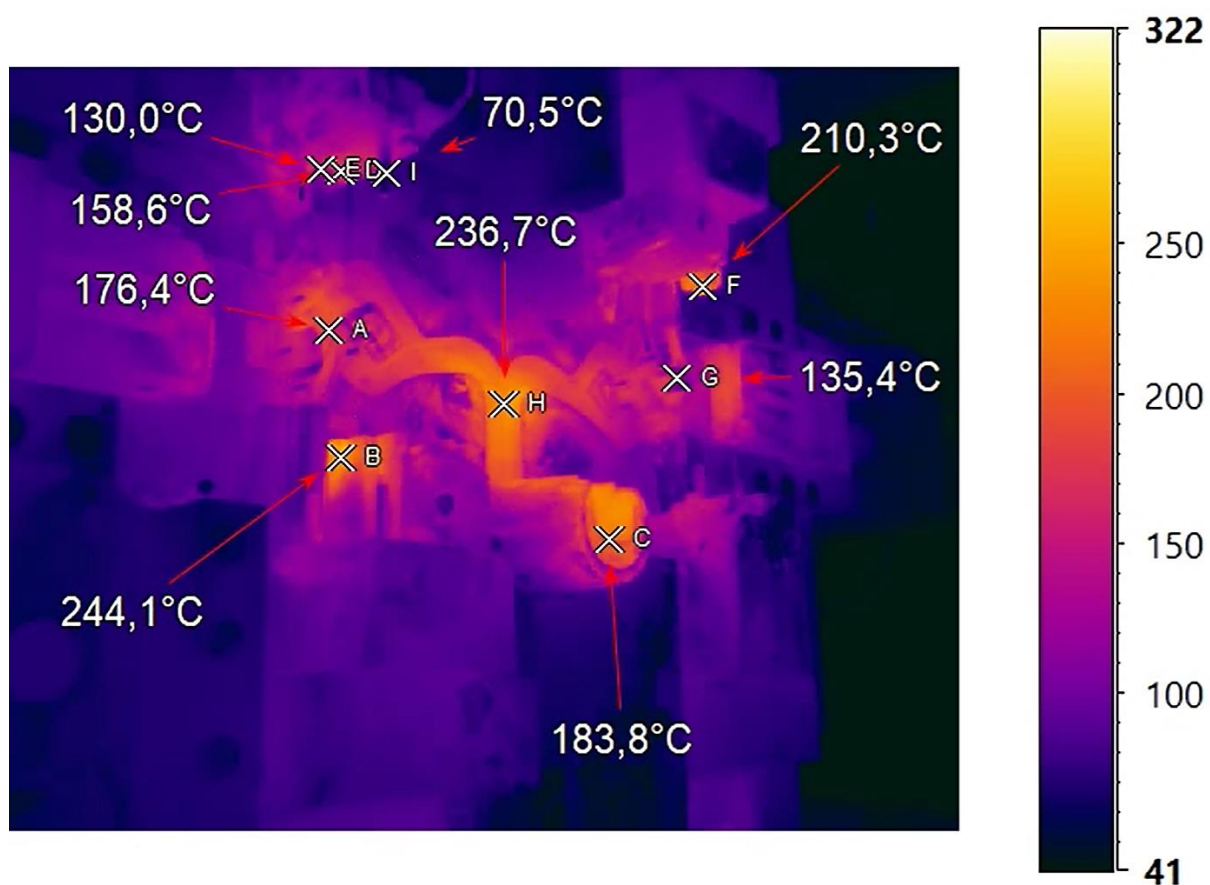
Obr. 50 Vývoj teploty během cyklování.



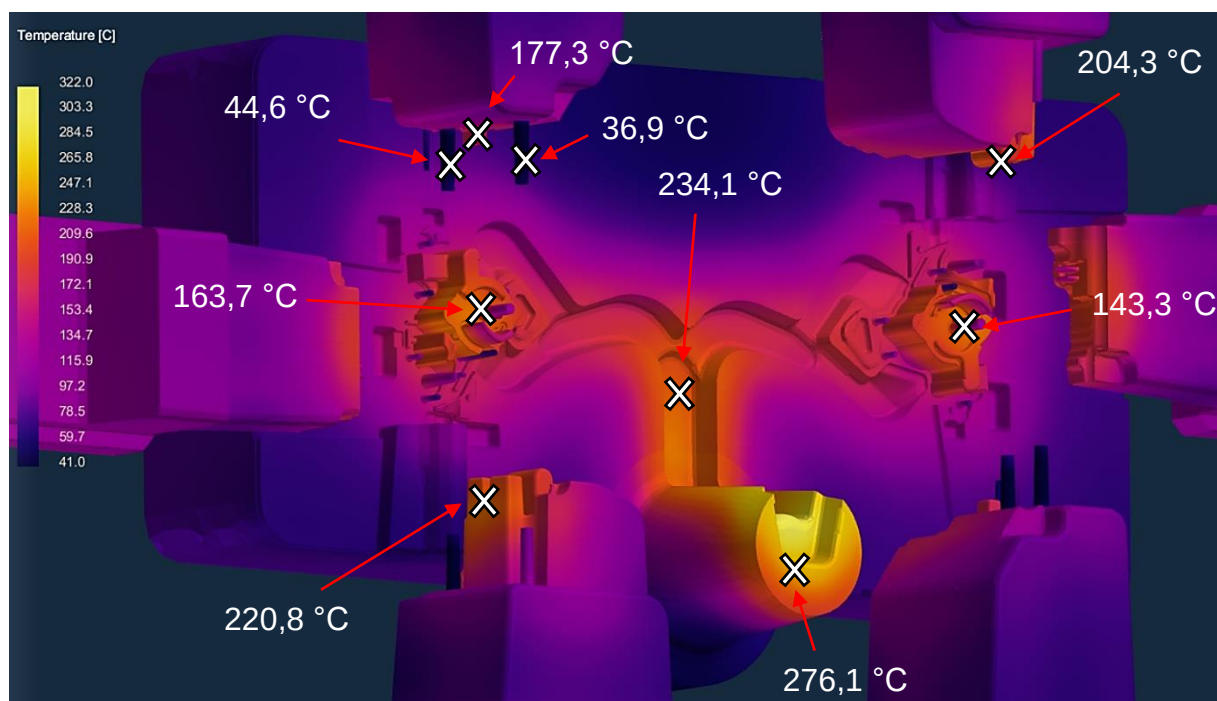
Obr. 51 Termo snímek ze stacionární kamery před standardním postřikem.



Obr. 52 Simulace teplotního pole před standardním postřikem.



Obr. 53 Termo snímek ze stacionární kamery po standardním postřiku.



Obr. 54 Simulace teplotního pole po standardním postřiku.

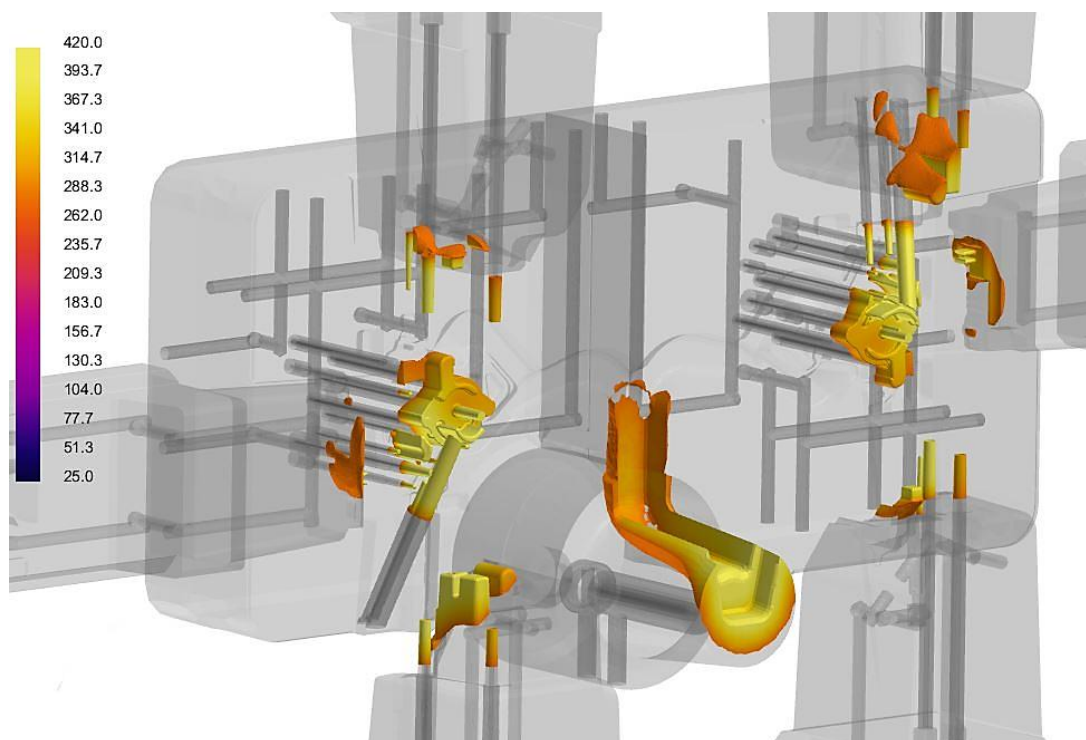
Pro simulaci mikropostřiku byly změněny následující parametry:

- druh média a jeho vstupní teplota u jednotlivých temperačních kanálů
- koeficient přestupu tepla pro postřik na hodnotu $500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
- parametry cyklu viz Obr. 55

Simulation Parameters				
File Category Unit				
Pre-defined Parameters:		Select Pre-Defined Set	Show String Selection	
General	Cycles	Thermal	Flow	Miscellaneous
Parameter		Type	Value	Value Unit
NCYCLE	Number of cycles	Const.	10	
TOPEN	Mold opening time	Const.	2.0500e+01	sec
TEJECT	Part ejection time	Const.	2.6200e+01	sec
TBSPRAY	Start time of the die spraying	Const.	3.0300e+01	sec
TESPRAY	End time of the die spraying	Const.	3.1800e+01	sec
TBBLOW	Start time of blow phase	Const.	3.1900e+01	sec
TEBLOW	End time of blow phase	Const.	4.4900e+01	sec
TCLOSE	Mold closing time	Const.	4.6000e+01	sec
TCYCLE	Duration of the cycle	Const.	5.2000e+01	sec
CYCLEF	Run flow calculation at last ...	Const.	OFF	
UFSPRAY	Activate user function for di...	Const.	OFF	

Obr. 55 Parametry cyklu při mikropostřiku.

Na Obr. 56 jsou znázorněny kritická místa formy přesahující teplotu $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$, na která bylo potřeba se během testování zaměřit.



Obr. 56 Místa na formě překračující teplotu $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

6.3.1 Testování mikropostřiku

Testování mikropostřiku bylo prováděno ve spolupráci s firmou Šebesta-slужby slévárnám s.r.o. Hlavním cílem zkoušky byl rozjezd technologie mikropostřiku na zvoleném odlitku s dosažením stabilní kvality produkce při sériové výrobě a očekávaných úspor spjatých s provozováním této technologie. Testování probíhalo v 29. a 33. kalendářním týdnu roku 2021.

Pro rozjezd mikropostřiku byla firmou Wollin navržena postřiková hlava. Pevná polovina sestává ze čtyř řad pro postřik a jedné řady ofukovacích. Pro postřik jsou využity pouze dvě řady, zbylé dvě jsou zaslepeny. Obsahuje 5 trysek DDV a 11 ofukovacích trysek. Pojízdňá polovina sestává z pěti postřikových řad a jedné řady pro ofuk. Obsahuje 41 trysek DDV a 13 ofukovacích trysek. Pro pokrytí těžko dostupných míst byly použity různé nástavce trysek o délce 50 nebo 100 mm (rovný, zahlý, otočný). Tlak vzduchu v centrálním rozvodu je 6 bar. Mazací tlak je při standardním postřiku ovládán čerpadlem vodárny. Mazací tlak při mikropostřiku je ovládán tlakovým vzduchem o hodnotě 2,5 bar, avšak pro samoodvzdušnění trysek je potřeba tlak 8-10 bar, a proto je nutné použít maximátor. K dávkování mazadla byl využit zásobník TOP 14. Během zkoušky byly použity stacionární kamery pro automatický záznam teplotního pole formy před a po ošetření viz Obr. 57.



Obr. 57 Stacionární kamera.

Testování v 29. kalendářním týdnu

První den

- příprava pracoviště
 - ↳ připojení maximátoru tlaku k centrálnímu rozvodu vzduchu
 - ↳ připojení tlakové nádoby s mazadlem
 - ↳ na základě zkušeností technologa sestavení postřikové hlavy viz příloha č. 1 a tvorba postřikového programu

Druhý den

- 12:00 začátek lití a kontrola po 3 odlevech
 - ↳ přemazaná pevná polovina nad tvarem
 - ↳ vysoká teplota Jet-Cooling jader
 - ↳ okruh A – prodloužení doby chlazení ze 3 s na 6 s
 - ↳ okruh B – prodloužení doby chlazení ze 2 s na 4 s
- 15:15 snížení teploty temperačních zařízení na pojízdné polovině z 80 °C na 50 °C
- po 40 minutách lití zjištěno lehké nalepení na odlehčeních a tvaru půlměsíce v pojízdné polovině
 - ↳ změna nastavení trysek

Třetí den

- snížení množství mazadla na pevné polovině z 6 otáček na 4 otáčky
- optimalizace nastavení trysek na pojízdné polovině (střední jádro, tunelové jádro a odlehčující tvar)
- 15:30 rozjezd
- 15:35 přemazaná pevná polovina
 - ↳ snížení množství mazadla ze 4 otáček na 2, provedeno za jízdy bez zastavení stroje
- 16:15 zastavení stroje z důvodu zadření pístu

Čtvrtý den

- 7:30 rozjezd
- 13:30 zastavení stroje
 - ↳ napečené mazadlo v pojízdné polovině
 - ↳ silné lepení v pojízdné polovině
 - ↳ přiblížení trysek
- 16:30 konec, v noci čištění pojízdné poloviny

Pátý den

- 8:00 rozjezd
- další optimalizace trysek
- navržení úprav pro druhý týden testování
 - ↳ ověření funkčnosti chlazení protivtokového kůlu a případné vylepšení jeho účinnosti
 - ↳ prověření funkčnosti chladících okruhů středových vložek
 - ↳ vyčištění chladičů na temperačních zařízeních

Testování v 33. kalendářním týdnu**První den**

- příprava pracoviště

Druhý den

- kontrola nastavení trysek
- kontrola funkčnosti trysek
- problém s výpadkem Jet-Cooling
- rozjezd stabilního lití až v 15:30

- rozhodnuto pokračovat s litím na noční směně s cílem zjistit, jak se na odlitku projeví dlouhodobá tepelná zátěž při sériové produkci

Třetí den

- 0:45 upadnutí tvaru pŕlměšice na hnízde č. 2 viz Obr. 58 nejpravděpodobněji z důvodu uzavřeného kulového ventilu na přívodu chladicí vody okruhů Poj C a Poj D



Obr. 58 Upadnutý tvar pŕlměšice.

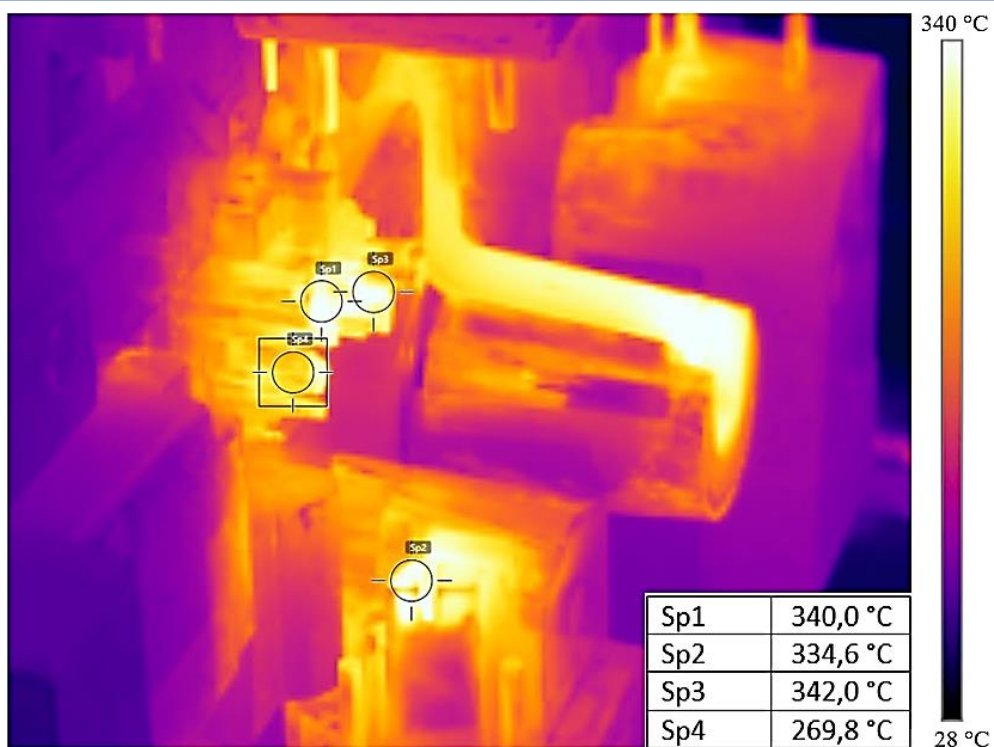
- noční směna dále pokračovala, aby bylo možné díky vždy po hodině odkládaných odlitcích ověřit celkový vývoj stavu při sériové výrobě
- hnízdo nejvíce trpí na zadní straně, kde dochází ke spojení obou vtokových proudů
 - ↳ přesměrování ještě jedné trysky na toto kritické místo
- bylo rozhodnuto pokračovat ve zkoušce, hnízdo č. 2 dále neoptimalizovat a zaměřit se pouze na optimalizaci hnízda č. 1
- další úpravy postřikového programu a směrování trysek nevedly k odstranění problému s dřením tvaru pŕlměšice a tunelového jádra způsobeného letováním hliníků na formu viz Obr. 59.
 - ↳ navrženo pravidelné čištění formy, ke kterému se se sériová produkce dostane po cca 7 h lití
 - ↳ přidání ještě jednoho pulsu na ošetření pojízdné poloviny
- přestože díl nese vizuální stopy vyššího množství separátoru, stav kritických partií se zlepšil



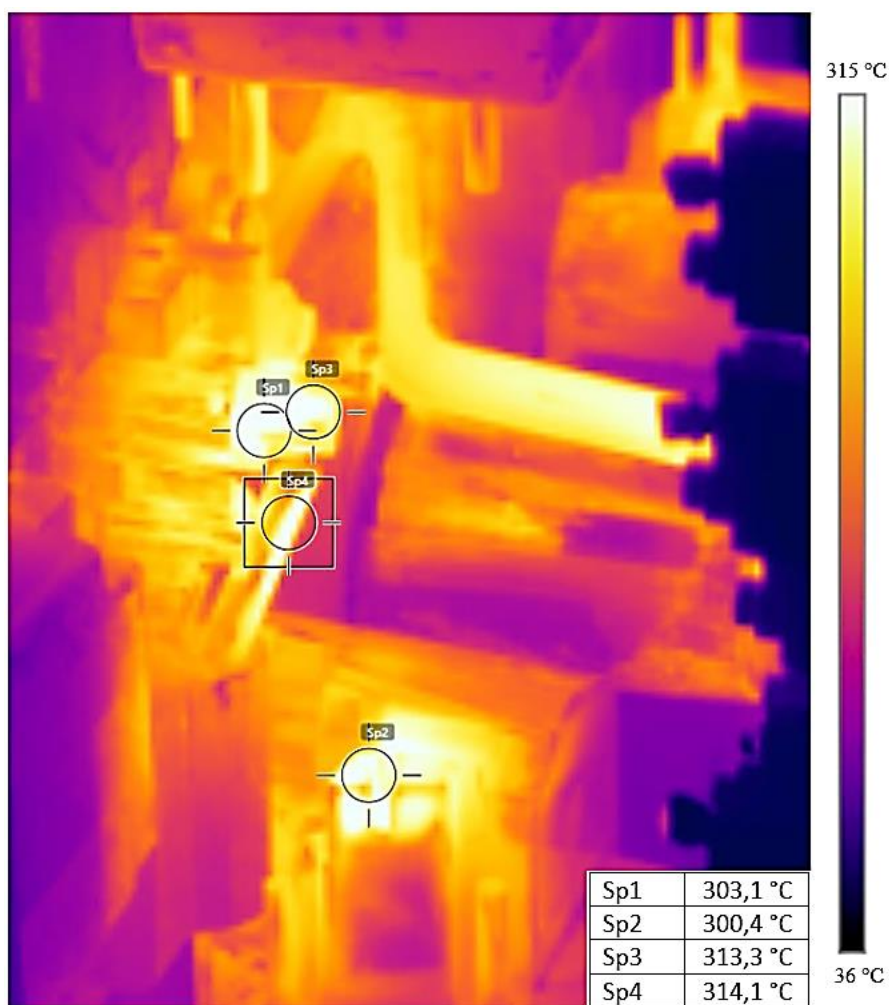
Obr. 59 Letování hliníku.

Čtvrtý den

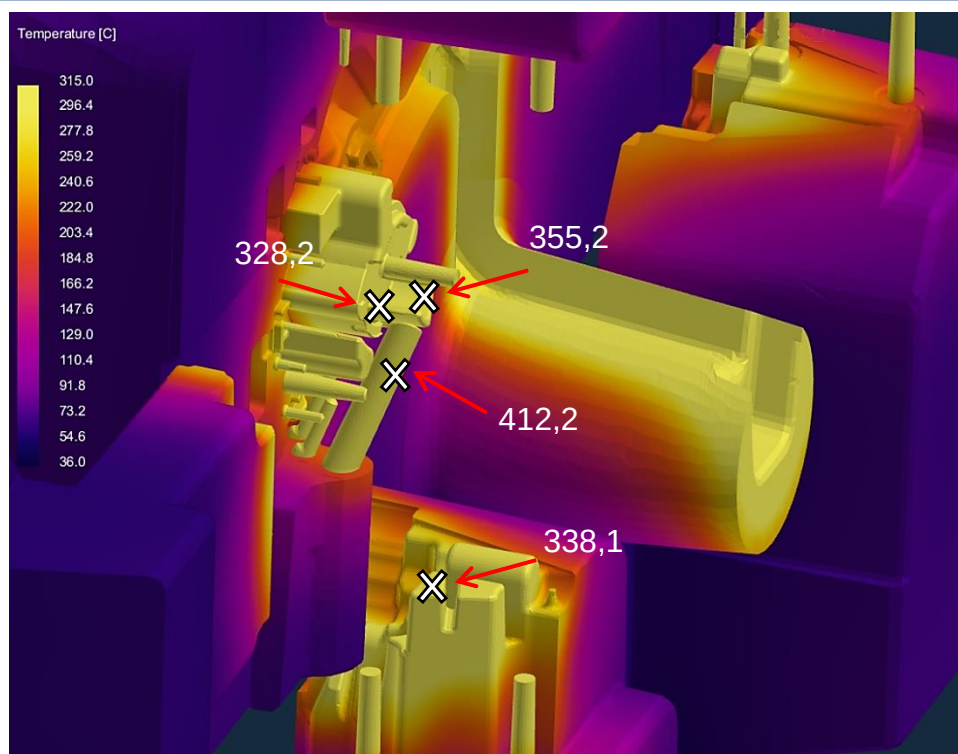
- Z teplotního pole formy je patrné přehřívání tvaru půlměsíce ($340\text{ }^{\circ}\text{C}$ před postřikem) viz Obr. 60 i tunelového jádra ($314\text{ }^{\circ}\text{C}$ před postřikem) viz Obr. 61. Vyšší teploty těchto částí predikovala i simulace viz Obr. 62. Teploty v simulaci jsou mnohem vyšší, což může být způsobeno rozdílným časem pořízení snímku v rámci cyklu, jelikož termo snímek byl pořízen s určitou časovou prodlevou, během které mohla být značná část tepla odvedena do okolního prostředí. Dalším důvodem může být plošné nastavení koeficientu přestupu tepla pro postřik, zatímco v reálu je na určité místo intenzivnější postřik. V programu ProCAST existuje modul, který tuto skutečnost zohledňuje, avšak z důvodu množství jader, která vytváří slepá místa nelze na tento typ odlitku aplikovat. Při standardním postřiku dochází k ochlazení povrchu formy v průměru o cca $140\text{ }^{\circ}\text{C}$, zatímco při použití mikropostřiku o cca $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ viz Obr. 63 a Obr. 64.



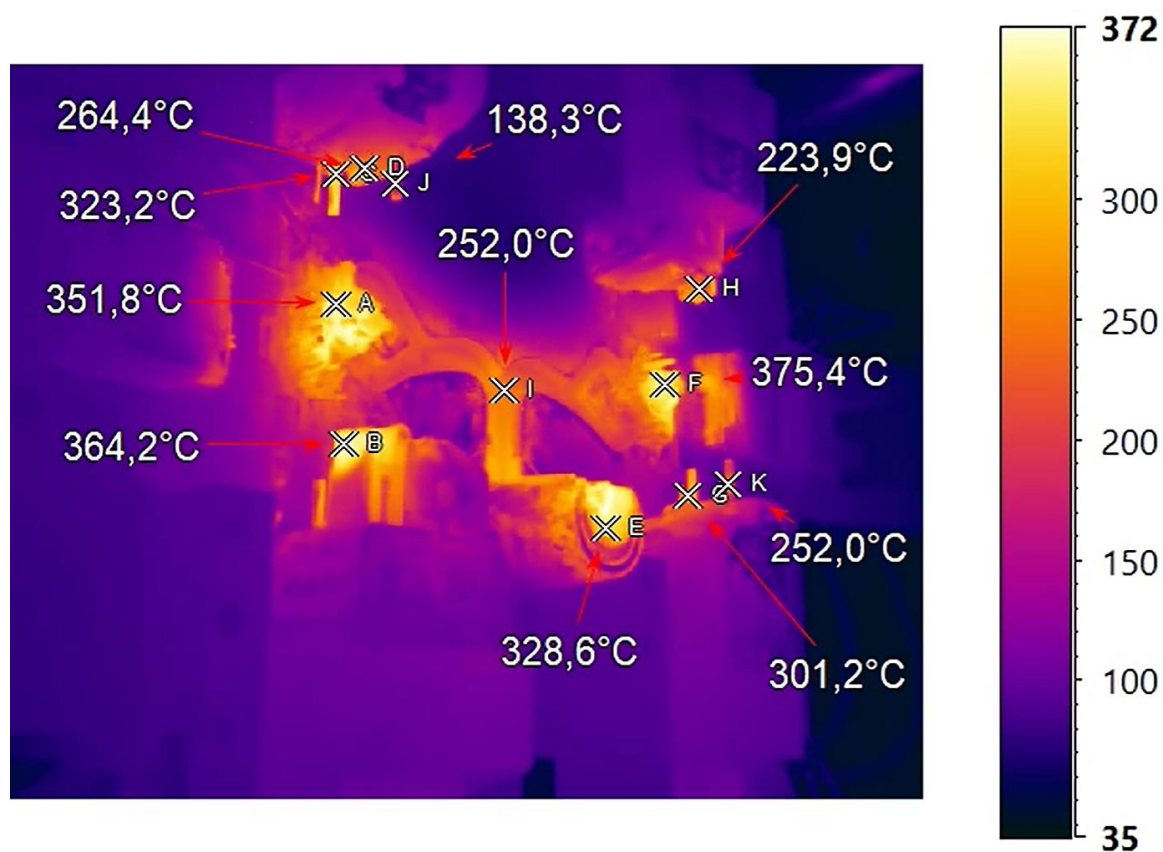
Obr. 60 Termo snímek tvarové části, Sp1 – tvar pŕlměšice.



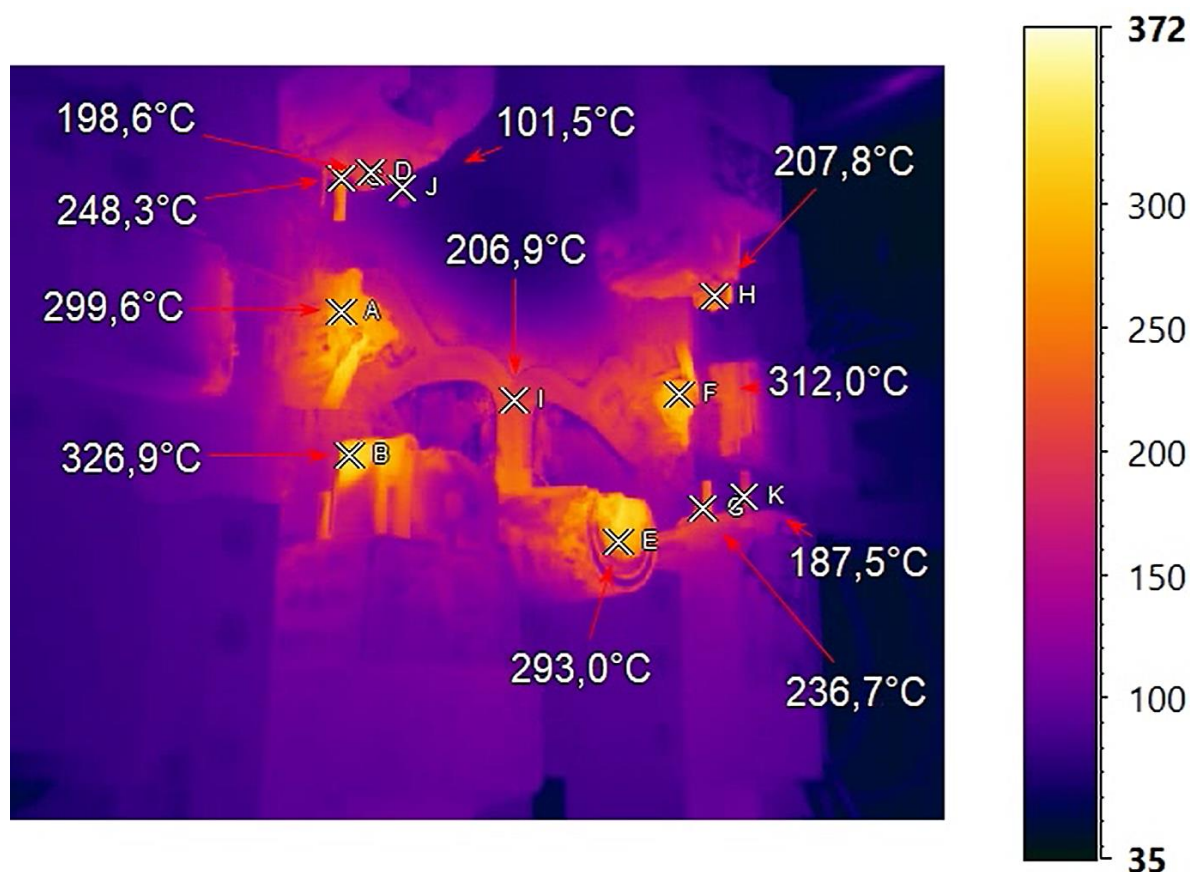
Obr. 61 Termo snímek tvarové části, Sp4 – tunelové jádro.



Obr. 62 Simulace tvarové části.



Obr. 63 Termo snímek ze stacionární kamery před mikropostríkem.



Obr. 64 Termo snímek ze stacionární kamery po mikropostřiku.

Zhodnocení testování

Největším problémem při použití mikropostřiku je vydírání dílů v místě tvaru půlměsíce, ke kterému dochází cca po šesti hodinách nepřetržitého lití. Zbytek dílu se jeví jako OK v mezích kvality srovnatelné s kvalitou dílů litých při standardním postřiku. Je tedy navrženo s litím za použití mikropostřiku pokračovat, je však nutné zaškolit obsluhu, která bude pečlivě kontrolovat kritická místa a při zhoršení stavu zastavit stroj a vyčistit tvary formy, na nichž došlo k letování hliníku. Byly navrženy další možnosti, týkající se formy, procesu a postřikové hlavy, které by mohli přispět ke zlepšení stavu. Jsou to:

- Doplnění Jet-Cooling chlazení do tunelového jádra a do odlehčovacího tvaru vedle tunelového jádra, které by vedlo ke snížení tepelné zátěže tohoto prostoru.
- Z důvodu teplejší formy možnost snížení teploty slitiny, což by vedlo k úspoře energie.
- Při použití nižších teplot kovu možnost snížit čas tuhnutí a tím zkrátit čas cyklu.
- Možnost odebrat všechny 50 mm nástavce trysek, tedy tam kde byly trysky ve vzdálenosti 100 mm ubrat na 50 mm a tam kde byly ve vzdálenosti 50 mm ubrat na 0 mm, čímž vznikne možnost zajet s tryskami blíže k formě a lépe ji tak ošetřit [45]

Po doplnění Jet-Cooling chlazení v tunelovém jádře a odlehčovacím tvaru viz Obr. 66 následovalo zkušební lití, při kterém byly zaznamenány následující parametry:

- Spotřeba koncentráту mazadla viz Tab. 8
- Spotřeba el. energie temperačních zařízení a celého pracoviště viz Tab. 9
- Čas cyklu a parametry lití viz Obr. 65

Tab. 8 Spotřeba koncentráту mazadla při mikropostřiku.

Cyklus stroje [s]	Cyklů/h	Spotřeba 100 % koncentráту mazadla na cyklus při dvou pulzech [ml]	Spotřeba 100 % koncentráту mazadla na cyklus při třech pulzech [ml]	Typ mazadla
52	69,23	7,1	9,6	Chemtrend SL-8801

Tab. 9 Spotřeba el. energie temperačních zařízení při mikropostřiku.

Plný automatický režim stroje			
	Typ temperace	Spotřeba el. energie [kW/h]	
		Měření č. 1	Měření č. 2
	vodní ohřev 2 x 50 °C (Poj A + Poj B)	0,6	0,5
	vodní ohřev 2 x 50 °C (Poj C + Poj D)	1,23	1,00
	vodní ohřev 2 x 50 °C (Poj E + Poj G)	3,01	2,97
	vodní ohřev 100 + 150 °C (Pev A + Kom)	5,7	5,2
Celkem		10,54	9,67
Průměr		10,12	
Celé pracoviště		65,81	

Doba tuhnutí + dotlak				Doba cyklu			KC -	teoretická min. F L			Otevření formy			Zdvih vyhazovačů			Vyhazovače vzad								
13 ± 1				[s]	52 ± 2			[s]	~ 549			[kN]	780 ± 0			[mm]	40 ± 2			[mm]	0,5 ± 0,1			[s]	
Licí parametry stroje																									
1. Fáze -- předplňovací	Pohyb lis. pístu		[mm]			[m/s]			Přepnutí dotlaku						Dotlak - 3 fáze										
	2. rychlost		140 ± 10			0,2 ± 0,1			Skutečný plnicí tlak (orientační hodnota)			~	100 - 120		[bar]	[bar]				[s]					
	2. rychlost		265 ± 10			0,2 ± 0,1			Zalisováno (orientační hodnota)			~	-		[mm]	1	400 ± 30				0 ± 0				
	3. rychlost		305 ± 10			0,6 ± 0,2			Dráha			350 ± 10	[mm]	2	400 ± 30				0,05 ± 0,01						
	4. rychlost		330 ± 10			4,0 ± 0,3			Rychlost			999 ± 10	[%]	3	850 ± 30				0,08 ± 0,01						
2. Fáze -- plnicí	Brzda		440 ± 5			1,5 ± 0,2			Tlak			180 ± 10	[bar]												
	Tlak dusíku v akumulátoru (nastavení)											Tlak dusíku v multiplikátoru (nastavení)													
	190 ± 0											[bar]	150 ± 0											[bar]	
	Nastavený rozptyl											20	[bar]	Nastavený rozptyl											20

Obr. 65 Parametry lití při mikropostřiku.

6.4 Shrnutí výsledků

Během zkušebního lití bylo vyrobeno 7 602 ks se zmetkovitostí 4,5 %. Při standardním postřiku, z roční produkce 120 705 ks, byla zmetkovitost 4,7 %. Zatím tedy hodnocení mikropostřiku není zcela vypovídající. I přes tuto skutečnost však bylo dosaženo očekávaných úspor uvedených v Tab. 10. Z důvodu interních a obchodních tajemství, např. o ceně mazadel či nákladů na zpracování odpadních vod, se jedná pouze o procesní úspory, které jsou vztažené na jeden cyklus a vyjádřené v procentech. Na základě těchto skutečností bylo rozhodnuto přejít při výrobě vytypovaného odlitku na technologii mikropostřiku a v současnosti probíhá vzorkování dvou nových forem.

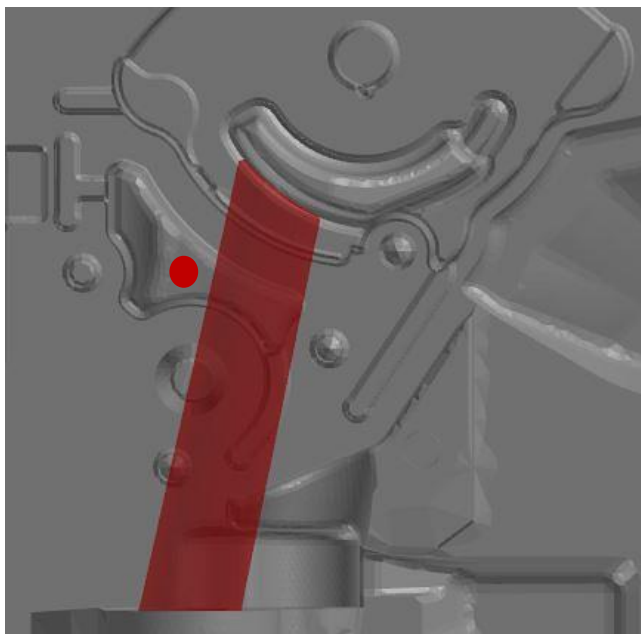
Tab. 10 Porovnání parametrů standardního postřiku a mikropostřiku.

	Standardní postřik	Mikropostřik		Úspora
Spotřeba mazadla na cyklus [ml]	12	2 pulsy	7,1	41 % ¹
		3 pulsy	9,6	20 %
Spotřeba vody pro postřik na cyklus [ml]	588	0		100 %
Množství odpadní vody na cyklus [ml]	122	0		100 %
Spotřeba el. energie temperačních zařízení na cyklus [kW]	0,30	0,15		50 %
Spotřeba el. energie celého pracoviště na cyklus [kW]	1,16	0,95		18 %
Čas cyklu	55	52		3 s
Interní zmetkovitost [%]	4,7 ²	4,5 ³		
Externí zmetkovitost na netěsnost [%]	1,36	0,41		
Externí zmetkovitost na porezitu [%]	0,12	0,09		

1 – pouze úspora v množství nastříkaného mazadla, jelikož cena mazadla je 4x vyšší

2 – hodnocení z roční produkce 120 705 ks

3 – hodnocení jen části série 7 602 ks po všech optimalizacích



Obr. 66 Doplněné Jet-Cooling chlazení.

6.5 Metodika zavádění technologie mikropostřiku

- Při přechodu ze standardního postřiku na mikropostřik zaznamenat data pro pozdější srovnání technologií a to především:
 - ↪ spotřebu mazadla
 - ↪ spotřebu elektrické energie na temperačních zařízeních a celého pracoviště
 - ↪ teplotní pole formy
 - ↪ čas cyklu a parametry lití
 - ↪ množství odpadních vod
 - ↪ interní a externí zmetkovitost
- Při použití technologie mikropostřiku je minimalizován odběr tepla z povrchu formy dělicím prostředkem a je proto nutné zdokonalit vnitřní chlazení formy
 - ↪ provedení simulace teplotního pole pro predikci přehřátých míst, min. 10 cyklů
 - ↪ dle simulace navrhnout vhodné vnitřní chlazení
 - ↪ konvenční vrtané kanály
 - ↪ přepážkové systémy k chlazení jader
 - ↪ Jet-Cooling chlazení jader
 - ↪ konformní chlazení
 - ↪ vyčistit okruhy a vyměnit olejová temperační zařízení za vodní
- Příprava postřikového zařízení na technologii mikropostřiku
 - ↪ separátně natažený okruh pouze pro mikropostřik, kterým lze dovybavit každý Wollin
 - ↪ dávkovací stanice/zásobníky mazadla
 - ↪ při použití samo-odvzdušňovacích trysek potřeba tlaku >8 bar, pokud je tedy v centrálním rozvodu tlak nižší nutnost použití maximátoru nebo kompresoru se vzdušníkem
- Sestavení postřikové hlavy a výběr vhodných trysek
 - ↪ návrh maskové hlavy od firmy Wollin
 - ↪ typ trysek DD/DDV
 - ↪ při nemožnosti provedení maskové hlavy použití FSD trysek
- Volba vhodného separátoru

ZÁVĚR

Diplomová práce, sestávající z teoretické a praktické části, se zabývá problematikou vysokotlakého lití, konkrétně ošetřením formy s využitím technologie mikropostřiku. Cílem diplomové práce bylo zmapovat procesy, které je nutné ve slévárně vysokotlakého lití změnit tak, aby bylo možné úspěšně realizovat použití mikropostřiku. Praktická část popisuje zavedení technologie mikropostřiku ve slévárně KOVOLIT Modřice a.s. V tomto případě se jedná o přístup, při kterém dochází k přechodu z konvenčního způsobu postřiku na již zmíněný mikropostřik.

Při použití technologie mikropostřiku odpadá schopnost externího chlazení a mazadlo slouží pouze k vytvoření separačního filmu. Je tedy nutné mít dokonale zvládnuté vnitřní chlazení formy. Tato skutečnost se potvrdila i v případě testování mikropostřiku na odlitku tělesa olejového čerpadla. Z termósnímků je patrné, že forma pracuje za vyšších teplot a pomocí postřiku dochází ke snížení teploty v průměru pouze o 40 °C, a tudíž k minimálním výkyvům tepelného zatížení formy. Tím lze očekávat oddálení tvorby trhlinek a prodloužení životnosti formy.

Během testování docházelo k největšímu přehřívání na pohyblivé polovině formy v oblasti tvaru půlměsíce a dále na tunelovém jádře, jak predikovala i provedená simulace teplotního pole. Do tunelového jádra a odlehčovacího tvaru bylo tedy přidáno Jet-Cooling chlazení pro snížení tepelné zátěže tohoto prostoru. Tvar půlměsíce byl už při standardním postřiku chlazen pomocí Jet-Cooling chlazení, a proto se zde neprováděla žádná optimalizace. Použitím konformního chlazení, které umožňuje přesně kopírovat jakýkoliv tvar, by bylo možné dosáhnout lepšího odvodu tepla z tohoto prostoru, a proto by bylo vhodné zvážit tuto alternativu.

Během zkušebního lití bylo odlito 7 602 ks se zmetkovitostí 4,5 %. Při standardním postřiku, z roční produkce 120 705 ks, byla zmetkovitost 4,7 %. Zatím tedy hodnocení mikropostřiku není zcela vypovídající. I přes tuto skutečnost však bylo dosaženo očekávaných úspor, a proto bylo rozhodnuto přejít při výrobě vytypovaného odlitku na tuto technologii. Jednalo se především o tyto následující úspory:

- 20 % úspora spotřeby mazadla
- 50 % úspora elektrické energie na temperačních zařízeních
- snížení času cyklu o 3 s
- snížení zátěže na životní prostředí absencí odpadních vod

Provozování mikropostřiku je velmi závislé na správné funkci vnitřního chlazení a jakýkoliv technický problém se může ihned projevit odstávkami stroje nebo špatnou kvalitou odlitku. Je proto nutné mít kvalifikovaný personál, který dokáže rychle zareagovat na vzniklé problémy. Je tedy nezbytné věnovat školení těchto pracovníků značnou pozornost. Dalším doporučením je použití stacionárních kamer pro záznam teplotního pole formy. Tím by bylo možné sledovat v reálném čase vývoj teplot na povrchu formy a včas tak odhalit problém např. s nefunkčním chlazením či nefunkční tryskou, případně potřebu snížit teplotu temperačního média.

Zefektivnění výroby, a tím dosažení určitých úspor při výrobě odlitků se stále se zvyšujícími nároky na jejich kvalitu, je při současném růstu cen za materiál a energie cílem každé slévárny. Ve slévárnách vysokotlakého lití může být řešením právě použití technologie mikropostřiku. Prodloužení životnosti formy, snížení energií a zkrácení výrobního času může přinést značné úspory a slévárny, které budou schopné tuto technologii zvládnout, se tak stanou konkurenceschopnější.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [46]

1. MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin, 2005. ISBN 80-890-4188-4.
2. VINARCIK, E.J. *High integrity die casting processes*. New York: Wiley, 2003. ISBN 978-0-4712- 0131-1.
3. ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
4. VALECKÝ, Jindřich. *Lití kovů pod tlakem: určeno pracovníkům sléváren, konstruktérům a technologům i studentům průmyslových a vysokých škol*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963. Řada strojírenské literatury.
5. MAJERNÍK, Ján, Štefan GAŠPÁR, Ján PAŠKO, Jozef HUSÁR, Andrzej TRYTEK a Mirosław TUPAJ. *Technologie a technika lití kovů pod tlakem*. Brno: Tribun EU, 2019. ISBN 978-80-263-1553-7.
6. JOSEF, Šabl. *Lití kovů pod tlakem*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1961. Knihnice strojírenské výroby.
7. KOPLÍK, Jiří. *Snížení nákladů na výrobu odlitku litého tlakovým litím pomocí aplikace vysokoteplotního separátoru*. Brno, 2017. Dostupné také z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_veřejne.php?file_id=149540. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Jaromír Roučka.
8. HERMAN, Aleš. *Problematika životnosti forem pro technologii lití pod tlakem*. Praha: České vysoké učení technické, c2011. Habilitační přednášky. ISBN 978-80-01-04927-3.
9. GROV, N., P. LUTZE a H. KOCH. Možnosti tlakového odlévání hliníku: použití této technologie v mezní oblasti. *Slévárenství*. Brno: Svaz sléváren ČR, 2005, **53**(2-3), 95-101. ISSN 0037-6825.
10. ŠTIPL, P. *Technologie lití vysokotlakých odlitků a vlivy působící na jejich kvalitu*. Brno, 2014. Dostupné také z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_veřejne.php?file_id=85172. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Jaromír Roučka.
11. HERMAN, E. A. *Designing Die Casting Dies*. Rosemont (Illinois): North American Die Casting Association, 1992.
12. SKALICKÝ, Zdeněk. Formy pro tlakové lití. *Slévárenství*. Brno: Svaz sléváren ČR, 2008, **56**(1-2), 27-28. ISSN 0037-6825.
13. MACHUTA, Jiří a Iva NOVÁ. *Slévárenské formy*. Liberec: Technická univerzita, 2014. ISBN 978-80-7494-083-5.
14. ŠEBL, Josef. *Formy pro lití kovů pod tlakem*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962. Knihnice strojírenské výroby.
15. Uddeholm Orvar Supreme: Pro všechny druhy nástrojů pro práci za tepla. *Uddeholm* [online]. Hagfors: Uddeholm, c2022 [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://www.uddeholm.com/czech/cs/products/uddeholm-orvar-supreme-2/>
16. Uddeholm Dievar: Vytváření nových globálních norem. *Uddeholm* [online]. Hagfors: Uddeholm, c2022 [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://www.uddeholm.com/czech/cs/products/uddeholm-dievar/>

-
17. ŠUSTR, Jindřich. Formy pro tlakové lití. *Slévárnictví*. Brno: Svaz sléváren ČR, 2005, 53(2-3), 88-89. ISSN 0037-6825.
 18. MUHIČ, M., J. TUŠEK, F. KOSEL, D. KLOBČAR a M. PLETERSKI. Thermal fatigue cracking of die-casting dies. *Metalurgija* [online]. Zagreb: Croatian Metallurgical Society, 2010, 49(1), 9-12 [cit. 2022-04-16]. ISSN 0543-5846. Dostupné z: <https://hrcak.srce.hr/file/63080>
 19. Uddeholm tool steels for die casting. *Uddeholm* [online]. Hagfors: Uddeholm, 2016 [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: https://www.uddeholm.com/files/AB_die_casting_eng.pdf
 20. SCHWAM, David. Improved Die Casting Process to Preserve the Life of the Inserts. *Osti* [online]. Cleveland (Ohio): U.S. Department of Energy, 2012 [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1057028>
 21. ŠEBESTA-SLUŽBY SLÉVÁRNÁM. *Mikropostřik: Školící prezentace*. Brno: Šebesta-slужby slévárnám, 2021.
 22. NOVÁ, Iva. *Tepelné procesy ve slévárenských formách*. Liberec: Technická univerzita, 2002. ISBN 80-7083-662-8.
 23. NOVÁ, Iva. *Přenos tepla ve slévárenských formách*. Liberec: Technická univerzita, 2014. ISBN 978-80-7494-141-2.
 24. FIEBIGER, Patrik. *Analýza vlivu ošetření formy mikropostřikem ve vztahu ke kvalitě odlitku bloku motoru 1.0. MPI EVO*. Liberec, 2019. Dostupné také z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/153893/BP_Fiebiger.pdf?sequence=2&isAllowed=y. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Iva Nováková.
 25. Temperace vstřikovacích forem. *Publi* [online]. [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/08.html>
 26. HYNEK, Martin a kol. Temperace vstřikovacích forem. *Katedra konstruování strojů* [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2013 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_05_publikace/KA05_Temperace_vstrikovacich_forem.pdf
 27. Konformní chlazení. *Konformní chlazení* [online]. Jaroměř: Innomia, c2017 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <http://www.konformni-chlazení.cz/>
 28. ŠEBESTA-SLUŽBY SLÉVÁRNÁM. *Portfolio firmy*. Brno: Šebesta-slужby slévárnám, 2022.
 29. FIALA, Jakub. *Chlazení jader tlakové lící formy technologií Jet Cooling*. Liberec, 2015. Dostupné také z: <https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/17410/Chlazen%C3%AD+jader+tlakov%C3%A9+lic%C3%AD+formy+technologi%C3%AD+Jet-Cooling+-+Jakub+Fiala.pdf?sequence=1>. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Iva Nová.
 30. Jet Cooling: Zasedání odborné komise lití pod tlakem. *Adoc* [online]. 2013 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://adoc.pub/jet-cooling-pedstaveni-piklady-pouiti-uinnost-oproti-jinym-t.html>
 31. NOVÁ, Iva, Jiří MACHUTA a Iva NOVÁKOVÁ. *Castings processing*. Liberec: Technical University of Liberec, 2012. ISBN 978-80-7372-822-9.
-

-
32. GRAFF, James L. a Lothar H. KALLIEN. The Effect of Die Lubricant Spray on the Thermal Balance of Dies. *ChemTrend* [online]. c2022 [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: https://chemtrend.com/wp-content/uploads/2019/01/the_effect_of_die_lubricant_spray_on_the_thermal_balance_of_dies_en_v1.pdf
 33. ENGELHORN, Günter. Automatizovaný postřik forem. *Slévárenství*. Brno: Svaz sléváren ČR, 2008, **56**(3-4), 147-148. ISSN 0037-6825.
 34. IZAWA, Ryosuke. Development of WFR-3R: Next-Generation Water-Free Die Lubricant and Micro Spray Application. *DavidLu* [online]. [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: http://www.davidlu.net/castings_WFR_Lubrolene.pdf?G=736&ln=jp
 35. NATESH, G. Aluminium die casting: Lubrication technology and trends. *ChemTrend* [online]. [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: https://chemtrend.com/wp-content/uploads/2019/02/aluminium_die_casting_lubrication_technology_and_trends_en_v1.pdf
 36. RAMPI, Giovanni. Release agents for die casting: general aspects and state of the art. *Yumpu* [online]. Lonate Pozzolo (Italy): Jodovit, 2005 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/en/document/read/8160868/title-release-agents-for-die-casting-jodovit-srl>
 37. Šebesta [online]. Brno: Šebesta-slужby slévárnám [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://www.sebestasro.cz/>
 38. WOLLIN. *Minimum quantity lubricant application: Product presentation*. Lorch (Württemberg): Wollin.
 39. Release agent supply. *Wollin* [online]. Lorch (Württemberg): Wollin, c2022 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.wollin.de/en/products/die-spraying/release-agent-supply.html>
 40. More efficiency in aluminium die casting with micro spray lubrications. *Italtres* [online]. Lumezzane (Italy): Italtres, c2022 [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: <https://www.italpres.com/aluminium-die-casting-news/aluminum-die-casting-micro-spray-lubrications>
 41. KOVAČICOVÁ, Romana. Efektivnější proces lití s ošetřením forem pomocí mikropostřiku. *Tiessepraha* [online]. 2021 [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: <http://www.tiessepraha.cz/2021/02/16/efektivnejsi-proces-liti-s-osetrenim-form-pomoci-mikropostriku/>
 42. Spray and ball nozzles. *Wollin* [online]. Lorch (Württemberg): Wollin, c2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.wollin.de/en/products/die-spraying/spray-and-ball-nozzles.html>
 43. Lubrochem - separační prostředky na lící formy. *Tiessepraha* [online]. Praha: Tiesse Praha [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: <http://www.tiessepraha.cz/separacni-prostredky-na-lici-formy/>
 44. Postřiková mazadla pro tlakové lití HERA™. *ChemTrend* [online]. Praha: ChemTrend CZ [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://cz.chemtrend.com/wp-content/uploads/sites/17/2021/03/DC-HERA-Separacni-prostredky-CZ-0322-web.pdf>
 45. ZSILAY, Pavel. *Rozjezd mikropostřiku na odlitku 4230: Technická zpráva*. Brno: Šebesta-slужby slévárnám, 2021.
 46. *Citace pro* [online]. [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://citace.lib.vutbr.cz/info>
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
b_F	součinitel tepelné akumulace formy	$[W \cdot s^{1/2} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
c_F	měrná tepelná kapacita formy	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
c_K	měrná tepelná kapacita kapaliny	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
c_L	měrná tepelná kapacita taveniny	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
c_S	měrná tepelná kapacita materiálu odlitku v tuhém stavu	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
c_T	měrná tepelná kapacita temperačního média	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
L_K	skupenské teplo vypařování kapalně fáze postřiku	$[J \cdot kg^{-1}]$
L_{KR}	latentní krystalizační teplo tuhnutí taveniny	$[J \cdot kg^{-1}]$
m	hmotnost taveniny	$[kg]$
m_K	hmotnost odpařené kapaliny	$[kg]$
m_T	množství temperačního média	$[kg]$
Q_{CHL}	teplo uvolněné při chladnutí odlitku	$[J]$
Q_{KR}	teplo uvolněné při krystalizaci	$[J]$
Q_O	celkové teplo uvolněné odlitkem	$[J]$
Q_P	teplo odvedené odpařováním kapalně fáze z postřiku	$[J]$
Q_{PISTU}	teplo odvedené pístem stroje	$[J]$
Q_{PROUD}	teplo odvedené do okolí prouděním	$[J]$
$Q_{PŘ}$	teplo vzniklé přehřátím taveniny	$[J]$
$Q_{SÁL}$	teplo odvedené do okolí sáláním	$[J]$
Q_{STR}	teplo odvedené rámem stroje	$[J]$
Q_T	teplo odvedené temperačním systémem	$[J]$
$Q_{TŘ}$	teplo vzniklé třením tlakového pístu	$[J]$
S	plocha styku formy s okolím	$[m^2]$
S_V	plocha styku formy s rámem stroje	$[m^2]$
T_{KR}	teplota krystalizace taveniny	$[°C]$
$T_{LITÍ}$	teplota lití	$[°C]$
T_{OK}	teplota okolí	$[°C]$
T_{PF}	teplota vnějšího povrchu formy, který je ve styku s okolním prostředím	$[°C]$
T_{PFS}	teplota povrchu formy, který je ve styku s rámem	$[°C]$
T_{PP}	počáteční teplota postřiku	$[°C]$
T_{PS}	teplota povrchu stroje, který je ve styku s formou	$[°C]$
T_T	teplota odlitku při vyjmutí	$[°C]$
T_V	teplota vypařování kapalně fáze postřiku	$[°C]$
T_{VST}	vstupní teplota temperačního média	$[°C]$
$T_{VÝST}$	výstupní teplota temperačního média	$[°C]$
t_{cyklu}	doba cyklu	$[s]$
α_{PROUD}	součinitel přestupu tepla prouděním z vnějšího povrchu formy do okolí	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
$\alpha_{SÁL}$	součinitel přestupu tepla sáláním z vnějšího povrchu formy do okolí	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
α_{STR}	součinitel přestupu tepla z formy do rámu stroje	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
λ_F	tepelná vodivost formy	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
ρ_F	hustota materiálu formy	$[kg \cdot m^{-3}]$

Zkratky

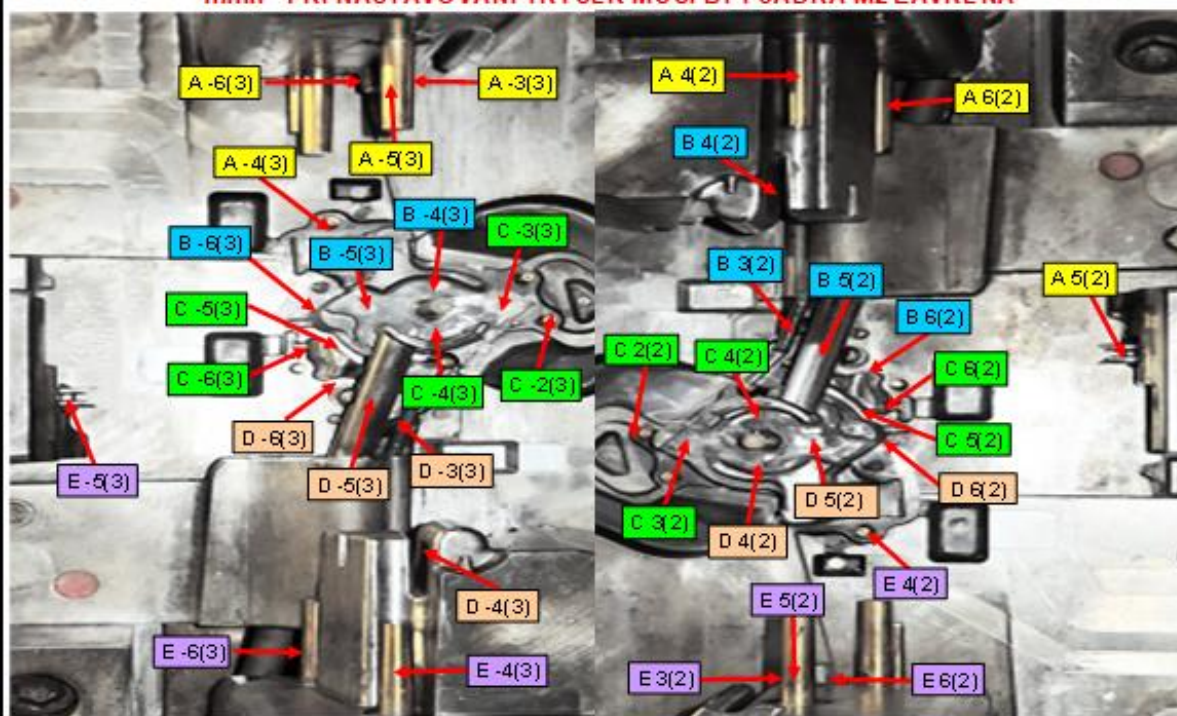
Označení	Legenda
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
HERA TM	High Efficiency Release Agent
LMD	Laser Metal Deposition
LPBF	Laser Powder Bed Fusion
PSM	Power Spray Machine

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Nastavení trysek hlavy Wollin

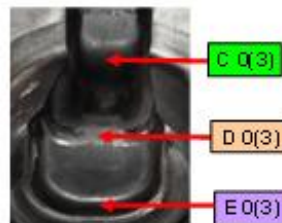
NASTAVENÍ TRYSEK HLAVY WOLLIN**4230 / F - MIKROPOSTŘÍK****PLA TÍ PRO B 66 D str. 11 !!!****Ostřík pojízdné poloviny formy****Velikost jednotlivých trysek a otáčky**

		6	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6
A	Tryska	5 N2	4 N2	4	x	x	x	x	x	x	4	4	4 N1	5 N2
	Otáčky	6ot	6ot	6ot	x	x	x	x	x	x	6ot	6ot	6ot	6ot
B	Tryska	5N2	5N2	4N1	5N2	x	x	x	x	x	x	4	4	4N2
	Otáčky	6ot	6ot	6ot	6ot	x	x	x	x	x	x	6ot	6ot	6ot
C	Tryska	4N2	4N2	4N1	4N1	4	x	5N1	x	4	4N1	4N1	4N2	4N2
	Otáčky	6ot	6ot	6ot	6ot	6ot	x	6ot	x	6ot	6ot	6ot	6ot	6ot
D	Tryska	4N2	4	4	x	x	x	3	x	x	5N2	4N1	5N2	5N2
	Otáčky	6ot	6ot	6ot	x	x	x	6ot	x	x	6ot	6ot	6ot	6ot
E	Tryska	5N2	4N1	4	4	x	x	3	x	x	x	4	4N2	5N2
	Otáčky	6ot	6ot	6ot	6ot	x	x	6ot	x	x	x	6ot	6ot	6ot
F	Tryska			O	F	U	K	O	V	A	C	I		
	Otáčky					Ř	A	D	A					

!!!!!!! PRI NASTAVOVANI TRYSEK MUSI BYT JADRA M2 ZAVRENA

Nástavce: N1= 50 mm 9x , N2 = 100 mm 18x

Rozšíření hlavy - pojízdná polovina formy: 45 mm

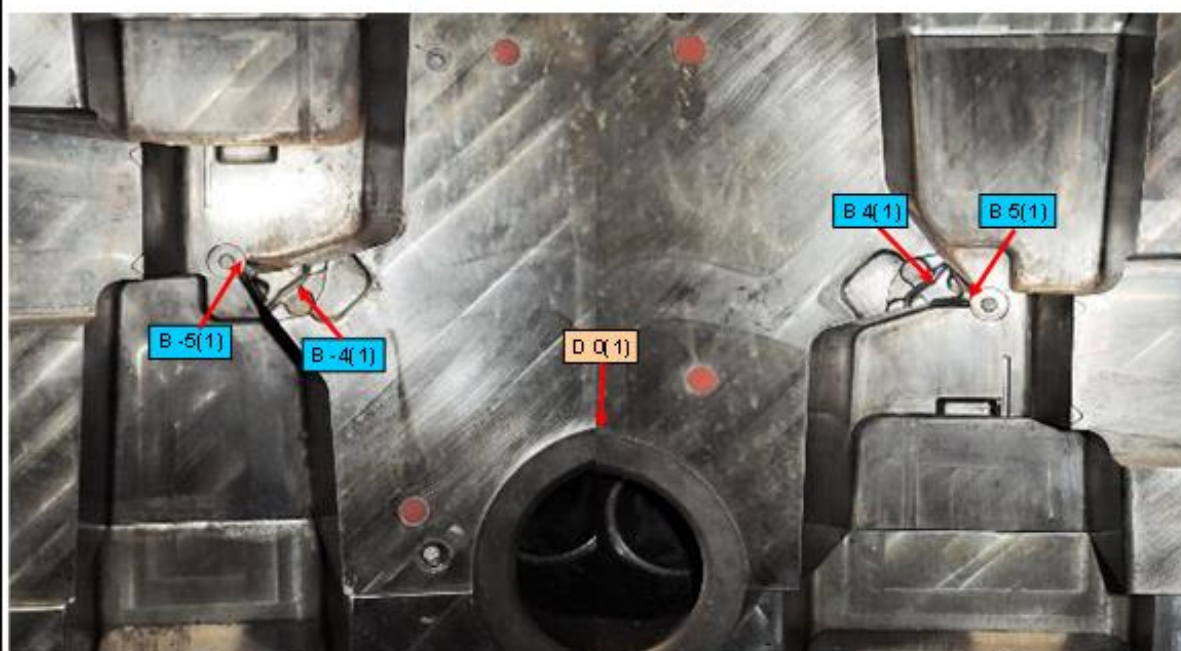


Ostřík pevné poloviny formy

Velikosti jednotlivých trysek a šroubů (v tabulce počet drážek na šroubu, x-zaslepeno)		5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5
A	Tryska			x	x	x	x	x	x	x		
	Šroub			x	x	x	x	x	x	x		
B	Tryska	3N2	3S	x	x	x	x	x	x	x	3S	3N2
	Šroub	5ot	3ot	x	x	x	x	x	x	x	3ot	5ot
C	Tryska			x	x	x	x	x	x	x		
	Šroub			x	x	x	x	x	x	x		
D	Tryska			x	x	x	3	x	x	x		
	Šroub			x	x	x	6ot	x	x	x		
E	Tryska		O	F	U	K	O	V	A	C	i	
	Šroub				Ř	A	D	A				

Nasměrování jednotlivých trysek.

Číslo znamená polohu ošetřovací hlavy, ve které je třeba trysky nastavovat:
1 = X - 920.0 mm Y - 810.0 mm.



Nástavce: N2 = 100 mm 2x



Rozšíření hlavy - pevná polovina formy:

45 mm