



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA TENKOSTĚNNÝCH ODLITKŮ S VYUŽITÍM TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU

PRODUCTION OF THIN-WALLED CASTINGS USING INVESTMENT CASTING TECHNOLOGY

HABILITAČNÍ PRÁCE

HABILITATION THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.

BRNO 2025

ABSTRAKT

Práce se zabývá moderní technologií výroby tenkostěnných odlitků v technické praxi. Dotýká se současných důvodů pro nárůst potřeby těchto typů odlitků, nastiňuje spojitost s konstrukčními a optimalizačními metodikami a rozebírá výzvy, které z jejich použití vyplývají. První kapitola se zabývá definicí tenkostěnných odlitků z hlediska jejího materiálového a technologického zařazení. Práce se následně vymezuje do použití technologie odlévání do keramických skořepin, která je označena jako technologie budoucnosti u menších sérií odlitků. Následuje rozbor vztahu ke konstrukčnímu řešení odlitků a použití optimalizačních metod, kde jsou na příkladech prezentovány základní principy těchto přístupů. Obsáhlou částí je rozbor zabíhavosti slitin, kategorizace jednotlivých vlivů včetně rozboru jednotlivých experimentálních metodik. Značné množství poznatků je vyhodnocováno pomocí informací z literárního rozboru, jednotlivé výsledky jsou analyzovány a v některých případech jsou vyhodnoceny ve vztahu k vlastním experimentům v této oblasti. Je prezentován vlastní návrh zkušební tělesa určeného pro oblast odlévání tenkostěnných odlitků do keramické formy. Pozornost je věnována specifickým vlivům včetně experimentálně zjištěnému povrchovému napětí, které vychází z měření kontaktních úhlů na zvolených experimentech a pro které byla využita inovovaná metodika testů ležící kapky, a to metodika dávkování kapky s kapilárním čištěním. I tyto údaje jsou dále využity v obsáhlé kapitole, která se zabývá numerickou simulací ve vztahu k predikci slévárenské vady tzv. „nezaběhnutí“. Jsou rozebrány přístupy k výpočtu a jsou stanoveny prahové hodnoty pro vyhodnocení predikčního kritéria pod názvem Misrun Sensitivity. Na příkladech jsou demonstrovány aplikace jednotlivých poznatků při výrobě konkrétních odlitků a v samotném závěru jsou shrnuty výzvy a další možné směřování výzkumu v této technologické oblasti.

Klíčová slova

tenkostěnný odlitek, technologie odlévání do keramických skořepin, povrchové napětí, numerická simulace

ABSTRACT

The thesis deals with the use of thin-walled castings in technical practice. It touches on the reasons for the increase in the need for these types of castings today, outlines the connection with design and optimization methodologies, and discusses the challenges that arise from their use. The first chapter deals with the definition of thin-walled castings in terms of their material and technological classification. The thesis is subsequently aimed at applying investment casting technology (IC), which is identified as the technology of the future for smaller batch castings. This is followed by a discussion of the relationship between casting design and the use of optimization methods, where the basic principles of these approaches are presented through examples. A comprehensive section includes an analysis of alloy fluidity, a categorization of the various effects, including an analysis of the different experimental methodologies. A considerable amount of knowledge is evaluated utilizing literature research, and individual results are analyzed and in some cases evaluated with actual experiments in this field. An in-house design of a test probe intended for the area of casting thin-walled castings into a ceramic shell is presented. Attention is paid to specific effects, including experimentally

determined surface tension, which is based on the measurement of contact angles on selected experiments and for which an innovative methodology of sessile drop tests, namely the drop dispensing methodology with capillary purification, has been used. These data are also used in a comprehensive chapter that deals with numerical simulation in relation to the prediction of the foundry defect, the so-called "non-fill" or "misrun". Approaches to the calculation are discussed and threshold values are established for the evaluation of the prediction criterion called "Misrun Sensitivity". The application of the individual findings to the production of specific castings is demonstrated by employing examples, and the challenges and possible future research directions in this technological area are summarized and discussed.

Key words

Thin-walled casting, investment casting technology, surface tension, numerical simulation

Poděkování

Děkuji Bohu, že nám dal možnost rozkrývat krásu světa a studovat zákonitosti jeho fungování. Děkuji své úžasné ženě Lidušce a svým dětem (H + T + F + Š + Z), že mne po celou dobu psaní práce všichni povzbuzovali a podporovali, přestože jsem jim n věnoval čas, který si zaslouží. Děkuji doc. Ing. Antonínu Záděrovi, Ph.D., doc. Janu Zouharovi, Ph.D., a doc. Ing. Jaromíru Roučkovi, CSc., za cenné připomínky a rady, které mi poskytli při vypracování habilitační práce, a všem kolegům na ÚST a odboru slévárenství za pomoc při realizaci experimentů.

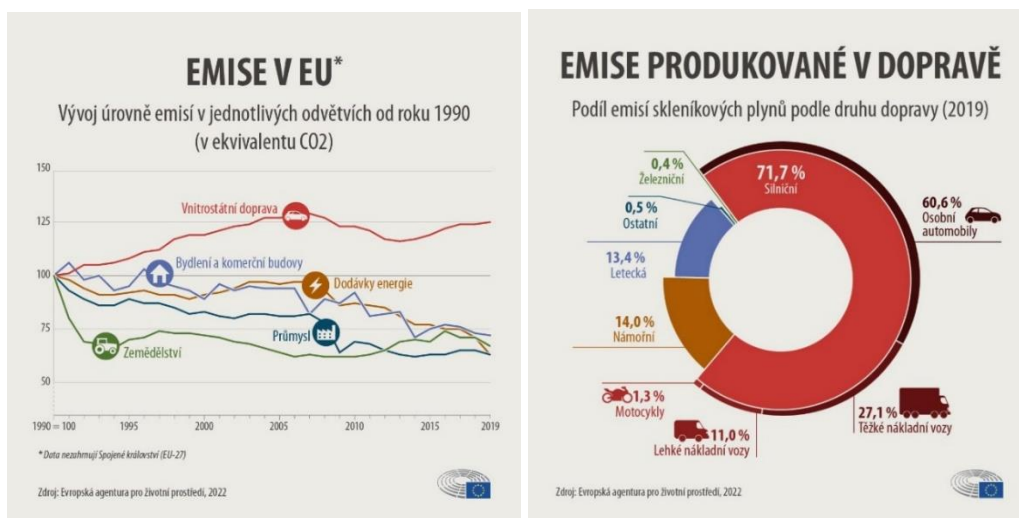
Obsah

1.	MOTIVACE V POUŽITÍ TENKOSTĚNNÝCH ODLITKŮ A CÍL PRÁCE	7
2.	TENKOSTĚNNÉ ODLITKY V PRŮMYSLOVÉ PRAXI.....	8
2.1	Slitiny Fe.....	10
2.2	Slitiny Al, Mg.....	15
2.3	Slitiny na bázi Ni, Ti, Co.....	19
3.	TECHNOLOGIE INVESTMENT CASTING – technologie tenkostěnných odlitků	22
3.1	Vývoj trhu v oblasti IC technologie	22
3.2	Popis technologie lití na vytavitelný/vypalitelný model	24
3.3	Aditivní technologie v IC	26
3.4	Výzvy v oblasti odlévání tenkostěnných odlitků z Al slitin.....	27
4.	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ TENKOSTĚNNÝCH ODLITKŮ	30
4.1	Technologičnost konstrukce odlitků	30
4.2	Topologická optimalizace	34
4.3	Generativní design.....	36
4.4	Co-design a virtuální výroba	39
5.	TEKUTOST A ZABÍHAVOST KOVŮ VE VZTAHU K TENKOSTĚNNÝM ODLITKŮM V TECHNOLOGII INVESTMENT CASTING	42
5.1	Zkoušky zabíhavosti.....	45
5.2	Parametry ovlivňující zabíhavost v technologii IC	49
5.2.1	Odlévání materiál – AlSi slitiny.....	49
5.2.2	Rozbor povrchového napětí a smáčivosti (fillability).....	56
5.2.2.1	Experimentální stanovení úhlu smáčení pro systém AlSi/keramika	64
5.2.2.2	Experimentální stanovení povrchového napětí pro systém AlSi/keramika	68
5.2.3	Vliv podmínek odlévání	71
5.2.4	Vliv parametrů formy	73
5.2.5	Vliv tvaru odlitku a zabíhavost v tenkých stěnách.....	88
6.	TECHNOLOGIE ODLÉVÁNÍ TENKOSTĚNNÝCH ODLITKŮ METODOU INVESTMENT CASTING.....	92
6.1	Technologie asistovaného vakua a vakuové nasávání.....	93
6.2	Technologie asistované vibrace	94
7.	SIMULACE TECHNOLOGIE INVESTMENT CASTING.....	95
7.1	Numerická simulace proudění taveniny	95
7.2	Prostup tepla v technologii IC	97
7.3	Okrajové podmínky numerické simulace.....	99
7.4	Termofyzikální parametry systému kov–skořepina–forma	101

7.5	Virtuální experiment – numerická simulace zabíhavosti	104
7.6	Analýza virtuálních experimentů.....	106
7.6.1	Vyhodnocení standardního nastavení simulace.....	106
7.6.2	Vyhodnocení setupu simulace pro model VOF.....	108
7.6.3	Simulace vlivu teploty skořepiny na zabíhavost	112
7.6.4	Simulace vlivu lící teploty na zabíhavost.....	115
7.6.5	Simulace vlivu povrchového napětí na zabíhavost	118
8.	APLIKACE POZNATKŮ PŘI ODLÉVÁNÍ PRŮMYSLOVÝCH ODLITKŮ	120
9.	ZÁVĚR A SHRUTÍ VÝZEV VE ZKOUMANÉ OBLASTI	122
10.	PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI	125
11.	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	128
12.	LITERATURA	130

1. MOTIVACE V POUŽITÍ TENKOSTĚNNÝCH ODLITKŮ A CÍL PRÁCE

Požadavky na výrobu tenkostěnných odlitků (TWC – Thin Wall Casting) vycházejí z velkého tlaku na snižování hmotnosti vyráběných dílů, a to zejména v automobilovém a leteckém průmyslu. Globální tlaky na nižší spotřebu paliva a nižší emise zvyšují nároky na snižování hmotnosti litých komponentů. Tyto nároky jsou spojovány s termínem „lightweighting“, což není pouze trend v náhradě železných slitin slitinami hliníku, ale jedná se o koncept návrhu dílu s cílem nalezení kompromisu mezi designem součásti, výrobitelností, užitnými vlastnostmi a cenou vyráběného dílu. Slévárenská technologie je tímto trendem spíše tlačena na téměř nelimitovanou tvarovou variabilitu odlitků, je vyzývána používat menší tloušťky stěny, dosahovat vyšších mechanických vlastností dílů, a to vše ve spojení s vysokou vnitřní a povrchovou kvalitou. Nicméně schopnost vyrábět součásti s menší tloušťkou stěny posouvá moderní slévárny na novou úroveň, pomáhá snížit náklady na výrobu komplexních výrobních celků, zlepšuje účinnost inženýrských systémů, což ve finále v automobilním průmyslu vede k nižší spotřebě paliva a nižším emisím. Na obrázku 1.1 je uveden vliv dopravy a jednotlivých druhů dopravy na podíl skleníkových plynů. Hornung [1] uvádí, že snížení hmotnosti vozidla o 100 kg vede k úspoře paliva 0,5 až 1 litr. V případně úspory 1 l u benzínového motoru to znamená snížení o 23 gramů CO₂ na ujetý kilometr [2]. Při ročním nájezdu 60 000 km to znamená snížení o 1,38 t CO₂/vozidlo.



Obr. 1.1 Vývoj emisí z jednotlivých sektorů [3]

Aby bylo možné vyrábět tenkostěnné součásti, je velmi důležité porozumět mechanismu tekutosti taveniny, jevům spojeným s povrchovým napětím na rozhraní kov–forma, vzájemným interakcím a rovněž vlivu jednotlivých procesních parametrů na schopnost kovu vyplňovat dutinu formy. Výroba tenkostěnných odlitků není pouze záležitostí fáze plnění dutiny formy, ale velmi významnou roli hraje tuhnutí a chladnutí odlitků ve vztahu k jejich deformacím, a tedy rozměrovým a tvarovým přesnostem. Stále vyšší požadavky v aplikační rovině činí z této slévárenské technologie zajímavou oblast, která stále není podrobně prozkoumána a zpracována, a je nutné jí věnovat další pozornost. Vysoké požadavky na kvalitu znamenají zvyšování výrobních nákladů. Bez hlubokých znalostí a precizního řízení všech procesů není možné udržet nízké procento neshodné výroby a tím rentabilitu celého výrobního procesu. **Cílem této práce je shrnutí literárních poznatků, vlastních experimentálních dat a**

výsledků modelování v oblasti odlévání tenkostěnných odlitků pomocí technologie odlévání na vytavitelný model. Dílčím cílem je rozbor parametrů ovlivňujících odlévání tenkostěnných odlitků se zaměřením na odpory vůči plnění, včetně vlivu povrchového napětí a jeho role spočívající ve schopnosti taveniny vyplnit tenké průřezy formy při výrobě odlitků.

2. TENKOSTĚNNÉ ODLITKY V PRŮMYSLOVÉ PRAXI

Tloušťka stěny odlitku hraje důležitou roli jak z hlediska konstrukčního, tak z hlediska technologického. Tenkostěnné odlitky mají řadu výhod, ale z výrobního hlediska je nutné počítat i s některými nepříznivými faktory, které ovlivňují kvalitu a cenu jednotlivých odlitků.

Mezi výhody lze řadit:

- snížení hmotnosti vyráběných dílů;
- možnost spojení několika dílů do jedné sestavy – redukce montáže po odlévání;
- vysoká produktivita;
- net shape (near net shape) casting – výroba odlitků na hotovo, bez nutnosti dalšího obrábění;
- možnost odlévání velmi složitých tvarů;
- dobré mechanické hodnoty již po odlití (ve stavu „as cast“).

Nevýhody použití tenkostěnného odlitku mohou být následující:

- nutnost správného designu – technologičnost konstrukce s využitím žebrování;
- větší deformace odlitků – nutná vysoký stupeň znalostí celého procesu;
- vyšší náklady a nároky na nástroje, formy, přípravky;
- vysoké nároky na rozměrové tolerance (užší toleranční pásma);
- problémy s nedolitím odlitků a povrchovými vadami.

Z názvu „tenkostěnný odlitek“ je zřejmé, že do této kategorie budeme řadit odlitky s menšími tloušťkami stěn. Zde však neexistuje kritická (specifická) tloušťka, od které by se odlitek označil jako tenkostěnný. Rovněž jednotliví autoři [10], [13], [15] uvádí rozdílné hodnoty minimálních tlouštěk stěn v případě, že pojednávají o tenkostěnných odlitcích. U ocelových odlitků lze hovořit o tenkostěnném odlitku již pod 6 mm. U jiných materiálových skupin (litiny) se mluví o tloušťce 3 mm, případně u hliníkových odlitků odlévaných tlakově pod 3 mm. Je to z důvodu, že minimální tloušťka stěn je ovlivněna řadou faktorů, které v této práci budou dále rozebírány. Jedná se o materiál odlitku, typ formy a formovacího materiálu, technologii lití, rozlehlost stěn atd. Nicméně tenkostěnné odlitky lze určitým způsobem kategorizovat a upozornit na jejich specifika.

Tenkostěnné odlitky je možné kategorizovat z několika hledisek. První hledisko by mohlo zohledňovat **minimální tloušťku stěn odlitku ve vztahu k velikosti (hmotnosti) odlitku**. Pro konstrukci odlitků a řešení nejmenších tlouštěk stěn existují určitá doporučení pro optimální tloušťky odlitků, např. strojnické tabulky [4]. Doporučení plynou víceméně z empirické zkušenosti s odléváním odlitků a požadavky, které jsou spojeny s plněním, tuhnutím a deformací odlitků. Tabulka neuvádí specificky, co je minimální tloušťka, ale uvádí určitou bezpečnou toleranci, při jejímž respektování by mělo být pro danou kategorii (lehké, střední, těžké – tab. 2.1) zaručeno zaběhnutí odlitku.

Tab. 2.1 Doporučení tloušťky stěn dle materiálu a velikosti odlitku – rozměr [mm], [4] – upraveno

Materiál odlitků	Odlitky		
	lehké	střední	těžké
litina s lupínkovým grafitem	3 až 6	6 až 10	10 až 20
ocel na odlitky	6 až 8	10 až 12	15 až 20
temperovaná litina	2,5 až 4	6 až 8	–
neželezné kovy	3 až 5	10 až 12	15 až 20

Další dělení by mohlo být zaměřeno na **tenkostěnné odlitky z pohledu slévárenské formy**. V tab. 2.2 jsou uvedeny minimální tloušťky stěn (sekcí) pro jednotlivé netrvalé a trvalé formy.

Tab. 2.2 Všeobecné charakteristiky jednotlivých slévárenských technologií, dělených dle formy [5] upraveno

	Charakteristiky dle slévárenské formy/modelu					
	Písková	Croning	Lost Foam	Sádra	Keramická forma	Kovová forma
Materiál odlitku	Všechny	Všechny	Všechny	Neželezné slitiny Al, Mg, Zn, Cu	Všechny	Neželezné slitiny Al, Mg, Zn, Cu
Hmotnost odlitku [kg]						
Min.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,001	0,01
Max.	Bez limitu	100+	100+	50+	150	100+
Tloušťka sekcí [mm]						
Min.	3	2	2	1	1	0,5
Max.	Bez limitu	–	–	–	75	12

Způsob odlévání taveniny významným způsobem ovlivňuje **minimální tloušťky odlitků**, které jsme schopni slévárenskou technologií vyrábět. V odborné literatuře nalezneme základní dělení na technologie gravitačního odlévání do pískových nebo kovových forem a technologie odlévání za zvýšených sil. Mezi tyto způsoby lití patří vysokotlaké, nízkotlaké, odstředivé odlévání a další speciální technologie, jako je vakuové nasávání a další. Tabulka 2.3 prezentuje doporučené minimální tloušťky odlitků vyráběné z hliníkových slitin, se zohledněním technologie lití.

Tab. 2.3 Specifikace minimální stěny odlitků z Al slitin v závislosti na výrobní technologii [6] (upraveno)

Technologie odlévání	Gravitační lití do pískové formy	Nízkotlaké odlévání	Vysokotlaké odlévání
Minimální tloušťka stěny odlitku [mm]	4–6	3–4	0,8–1,5
Materiál odlitku	AlSi10Mg AlSi7Mg AlSi9Cu2 AlSi7Cu2	AlSi12 AlSi10Mg AlSi7Mg	AlSi9Cu3Fe AlSi10Mg AlSi7Mg AlSi11Cu2(Fe)
Drsnost povrchu Ra [μm]	> 6,3–12,3	≥ 3,2	≥ 1,6 (0,8)

Dalším dělením, které se již částečně vyskytuje i v předchozích přístupech, je dělení tenkostěnných odlitků dle **materiálových skupin odlitků**. Každá materiálová skupina má svá

specifika a požadavky na odlévání. V tabulce 2.4 jsou uvedeny minimální tloušťky stěn pro tlakové lití dělené dle odlévané slitiny.

Tab. 2.4 Minimální tloušťka stěny ve vztahu k materiálové skupině [7] upraveno/zaokrouhleno

Materiálová skupina	Minimální tloušťka stěny / velké odlitky	Minimální tloušťka stěny / malé odlitky
Al slitiny	0,08 in 2,0 mm	0,04 in 1,0 mm
Mg slitiny	0,1 in 2,5 mm	0,04 in 1,0 mm
Zn slitiny	0,04 in 1,0 mm	0,02 in 0,5 mm
Cu slitiny (mosaz)	0,09 in 2,3 mm	0,06 in 1,5 mm

Odlévání tenkostěnných odlitků není limitováno pouze nejmenší tloušťkou stěny, ale velmi důležitým parametrem je také rozlehlost stěny. Technologie na vytavitelný model uvádí jako hraniční tloušťku pro zaběhnutí stěny odlitku 0,7 mm [8] (Inconel 713, vakuové lití), ale není specifikováno, jakou oblast/plochu je kov schopen při této tloušťce vyplnit. V tabulce 2.5 je naznačena změna tloušťky stěny odlitku s uvedením rozlehlosti stěny odlitku.

Tab. 2.5 Tloušťka odlitku v závislosti na ploše stěny odlitku – tlakové lití do kovových forem [9]

Plocha stěny $a \times b$ [cm ²]	Odlitky			
	Zn slitiny	Al slitiny	Mg slitiny	Cu slitiny
≤ 25	1,5	2,0	2,0	1,5
$> 25-100$	1,8	2,5	2,5	2,0
$> 100-500$	2,2	3,0	3,0	2,5
> 500	2,5	3,5	3,5	3,0

Z výše uvedeného rozboru vyplývá, že specifika odlévání tenkostěnných odlitků vycházejí zejména z materiálových skupin, na které jsou následně navázány výrobní technologie. Z tohoto důvodu bude dále pozornost věnována rozboru podle materiálových skupin.

2.1 Slitiny Fe

V posledních desetiletích zaznamenal automobilový průmysl určitý ústup od Fe slitin (ocel, litina). V minulosti činila hmotnost odlitků automobilu 70–80 % celkové hmotnosti vozidla. Tento poměr byl značně změněn, a to zejména použitím Al slitin pro výrobu bloků motorů, hlav válců, skříní převodovek atd. V případě použití Fe slitin se konstruktéři zaměřili zejména na výrobu tenkostěnných litinových odlitků (TWCI – thin walled cast iron casting).

Ocelové tenkostěnné odlitky zaznamenaly významný ústup, a to zejména kvůli vyšší ceně a rovněž s ohledem na horší slévárenské vlastnosti, jako je zabíhavost a nutnost nálitkování oddělených tepelných uzlů. Vysoký teplotní gradient mezi lící teplotou ocelových slitin a „studenou“ formou výrazně omezuje délku zaproudění taveniny ve formě. Z tohoto důvodu je u ocelových odlitků vývoj zaměřen zejména na technologii odlévání na vytavitelný model, kde odlévání tenkostěnných odlitků je podpořeno vysokou teplotou keramické skořepiny.

V posledních desetiletích došlo k nárůstu požadavků na TWCI s tloušťkou stěny nižší než 3 mm a současně požadavků na dobrý poměr pevnosti k hmotnosti dílu. Vývoj „tenkostěnné technologie“ vedl k použití litin s kuličkovým nebo červíkovým grafitem, speciálních litin, jako jsou ADI, případně SiMo litiny. Cílem použití TWCI je nejen snížení hmotnosti vozidel, ale rovněž celkové snížení nákladů na vozidlo.

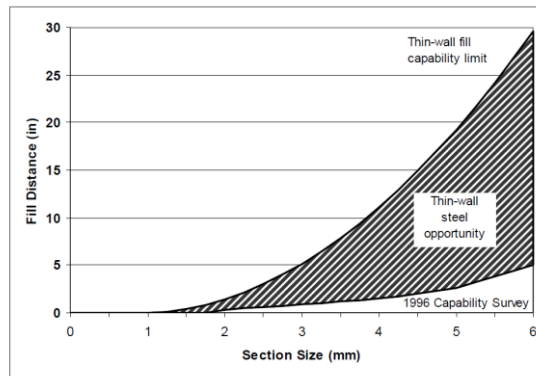
Problematika odlévání tenkostěnných odlitků je spojena s:

- technologickými vlastnostmi – zejména zabíhavost;
- mechanickými vlastnostmi – struktury při rychlém ochlazování;
- deformacemi – vlivy konstrukce odlitku;
- vnitřní a povrchovou kvalitou odlitků.

Níže jsou blíže rozebrána specifika výroby u vybraných materiálových skupin.

a) Tenkostěnné ocelové odlitky

Specifika materiálové skupiny
• Odlitky z ocelí mají velmi dobré pevnostní charakteristiky, únavové vlastnosti, dokážou odolávat vysokým teplotám, tlakům i opotřebení. Rovněž nabízí dobrou odolnost vůči korozi. • Tenkostěnné odlitky nabízejí konstruktérům vysokou tvarovou flexibilitu, která je však podmíněna dobrou znalostí technologičnosti konstrukce odlitků, tak aby nedocházelo k tvorbě tepelných uzlů při napojení stěn. Je nutné uzpůsobit tvar odlitku, případně i technologii dosazování. • Rozlehlé tenkostěnné odlitky je nutné konstrukčně, případně technologicky zajistit vůči deformacím. • Problematikou odlévání tenkostěnných ocelových odlitků je nedolití odlitků a vznik studených spojů. Je to dáno zejména rozdílem mezi lící teplotou oceli a teplotou formy. • Pro odlévání tenkostěnných odlitků je nutné zajistit vyšší přehřátí taveniny a případně vyšší teplotu formy – tento požadavek vede k odlévání tenkostěnných odlitků metodou lití na vytváitelný model - dále jen IC (investment casting). - Pro zvýšení zabíhavosti u IC technologie se často využívá tepelných izolací a zábalů pomocí izolačních rohoží. - Vyšší dynamický a metalostatický tlak je řešen vyšším počtem obalů skořepiny. Vyšší počty obalů znamenají nižší prodyšnost, z čehož vyplývá nutnost dobrého odvodu vzduchu keramických skořepin. • Velmi důležitým faktorem u výroby tenkostěnných odlitků je čas plnění. Rychlost plnění v kg/s u ručního odlévání může významně kolísat a způsobit nedolití odlitků (non-fill defect). • Problematika odlévání tenkostěnných ocelových odlitků je publikována ve velmi omezené míře a vliv odporů, jako je např. filtrace na zabíhavost, nebyl dosud publikován.
Minimální tloušťky odlitku
• Dle [4] je minimální tloušťka ocelových odlitků 6–8 mm. Voigt a kolektiv se ve své studii [10] snažili zmapovat limity technologie s využitím vlivu procesních parametrů a technologických prvků a sestavili graf 2.1.



Obr. 2.1 Limity zabíhavosti pro ocelové odlitky dle [10]

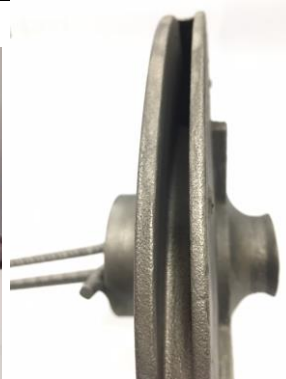
Výrobní technologie pro TWC

- Gravitační lití na vytavitelný model (IC) – tenkostěnné odlitky – limitem je hmotnost a rozlehlost odlitku.
- Pro rozlehlé odlitky se využívá gravitačního odlévání, ale tloušťky stěn jsou požadovány 6 mm a výše.

Aplikace

- Korozivzdorné odlitky pro energetiku, lodní dopravu, medicínu, automobilový průmysl, zpracování potravin.
- Energetika: oběžná kola, lopatky turbín, vrtule.
- Zpracování potravin: díky své odolnosti vůči korozi jsou odlitky z korozivzdorné oceli široce používány v potravinářském průmyslu. Typické součásti mohou zahrnovat skladování potravin, součásti kávovarů a součásti kovových mlýnků.
- Automobilový průmysl: obložení, měniče a výfukové díly.
- Lékařské vybavení: lékařské vybavení často vyžaduje přísné tolerance a vysokou rozměrovou přesnost. Komponenty odlévání z korozivzdorné oceli zahrnují dentální a chirurgické nástroje, vybavení operačních sálů, implantovatelné komponenty.

Příklady odlitků



Obr. 2.2 Oběžná kola [11]



Obr. 2.3 Unašeče, víčka, kryty, pouzdra [12]

b) Tenkostěnné odlitky z grafitických litin

Specifika materiálové skupiny
• V případě grafitických litin se hlavní pozornost u tenkostěnných odlitků zaměřuje na litinu s kuličkovým grafitem TWDI, a to díky dobrým mechanickým vlastnostem a ceně. • V automobilovém sektoru se vyskytují požadavky na vysokoteplotní mechanickou integritu, a proto se vyvíjí nové třídy litinových odlitků se specifickými vlastnostmi, které zvyšují užité vlastnosti produktů. Tyto nové druhy zahrnují ADI (TWADI) s jedinečnou kombinací mechanických vlastností [13], [14], [15], nebo SiMo litiny s odolností vůči oxidaci [16], [17], nebo Ni-resistem při vyšších teplotách [17]. Litiny s červíkovým grafitem (vermikulární litina TWVGCI) nabízejí dobré schopnosti tlumit vibrace a výbornou tepelnou vodivost [18], [19], [20]. • Grafitické litiny, zejména eutektické, se vyznačují dobrou zabíhavostí, nicméně vysoká rychlost tuhnutí u tenkých stěn odlitků může způsobit vznik karbidů. • Rychlé chlazení odlitků tedy vyžaduje zvláštní pozornost, aby byl grafit vyloučený v požadované formě bez podílu eutektických karbidů. Toho lze u litiny s kuličkovým grafitem dosáhnout zvýšením obsahu Si a C (zvýšením uhlíkového ekvivalentu CE), dobrým očkováním a správnou modifikací. Je výhodné použít nadeutektické slitiny s CE 4,4–4,6 %, které zajišťují dobrou zabíhavost [21]. • I v současné době poklesu používání železných slitin jsou odlitky s kuličkovým grafitem TWDI (thin walled ductile iron) využívány jako alternativní materiál pro lehké slitiny (Al slitiny, Mg slitiny a kompozity), a to vzhledem k jejich vlastnostem, jako je dobrá pevnost a tažnost, vysoká odolnost proti opotřebení a nárazu, velmi dobrá obrobitelnost a slévateľnost [22], [23]. • Stefanescu [24] deklaruje, že litina s kuličkovým grafitem nabízí výhody oproti slitinám hliníku, zejména pokud lze tenké díly z této litiny vyrábět a dodávat v litém stavu. • Dle [22] lze správným designem a správnou technologií získat litinový odlitek se stejnou hmotností a lepší tuhostí, než tomu bude u Al odlitku. Kromě toho bude mít litina vyšší pevnost za teplot nad 100 °C ve srovnání se slitinami Al. • Rychlé plnění formy může snížit tepelné ztráty při proudění taveniny. To vyžaduje správně navržený vtokový systém. K odstranění vzduchu z dutiny formy je také nutné správné odvětrání formy, tak aby se minimalizoval odpor při odvodu vzduchu z dutiny formy [25].
Minimální tloušťky odlitku
• V minulosti se odlitky z grafitických litin používaly v automobilovém průmyslu pro součásti, jako je blok motoru, hlava válců a výstupní potrubí s tloušťkou stěny do 6 mm. Poté se požadavek na tloušťku postupně snižoval na tloušťku menší než 5 mm a nakonec na 4 mm [22], [23]. • Dnes lze v automobilových aplikacích nalézt součástky o tloušťce menší než 3 mm a zkoumají se tenké lehké součásti, jako např. potrubí o tloušťce 1 nebo 2 mm vyrobené odléváním [26]. • Pro TWADI uvádí literatura [15] příklady odlitků se stěnou 2 mm.

- Pro SiMo je v [17] prezentována tloušťka odlitku 3 mm.
- Pro litinu s červíkovým grafitem udává zdroj [27], že i při nízkých koncentracích hořčíku není možné získat přijatelnou kvalitu při tloušťkách cca 4 mm kvůli vysokému množství kuliček grafitu. V praxi se proto používá úprava taveniny antisferoidizačními prvky (Al, Bi, Ti, Zr, Sb). Přídavek titanu v kombinaci s Mg pomáhá stabilizovat správné působení hořčíku. M. Górný a M. Kawalec [20] prokázali, že u tenkostěnných odlitků, které tuhly při vysoké rychlosti ochlazování s vysokým stupněm očkování, pomáhá přidání Ti k dosažení homogenní struktury, bez karbidů s vysokým podílem červíkového grafitu.

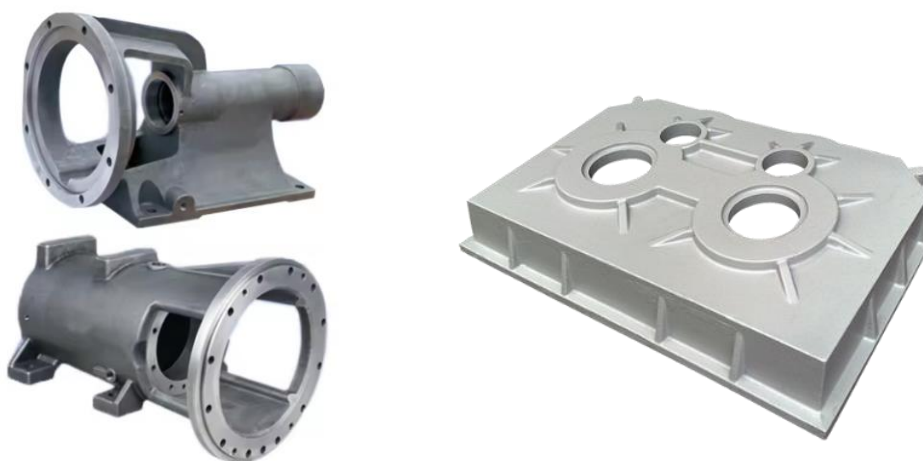
Výrobní technologie

- Gravitační lití do pískové formy
- Gravitační lití na vytavitelný model

Aplikace

- Litina s kuličkovým grafitem pro tělesa čerpadel, kryty, pouzdra
- ADI pro ozubená kola a duté ojnice, konzoly
- SiMo v aplikacích turbodmychadel (skříně) a výfukových potrubí, a to díky kombinaci vynikající odolnosti proti oxidaci a tepelné únavě
- Litina s červíkovým grafitem pro hlavy, bloky a brzdové systémy

Příklady odlitků



Obr. 2.4 Příklady odlitků z litiny s kuličkovým grafitem [28], [29]



Obr. 2.5 Odlitek prototypu konzoly o tloušťce 3 mm (vlevo) a náhrady Al konzoly odlitkem z ADI litiny [15]



Obr. 2.6 Výfukové potrubí, odlitek ze SiMo [30]



Obr. 2.7 Blok motoru z TWVGCI [31]

2.2 Slitiny Al, Mg

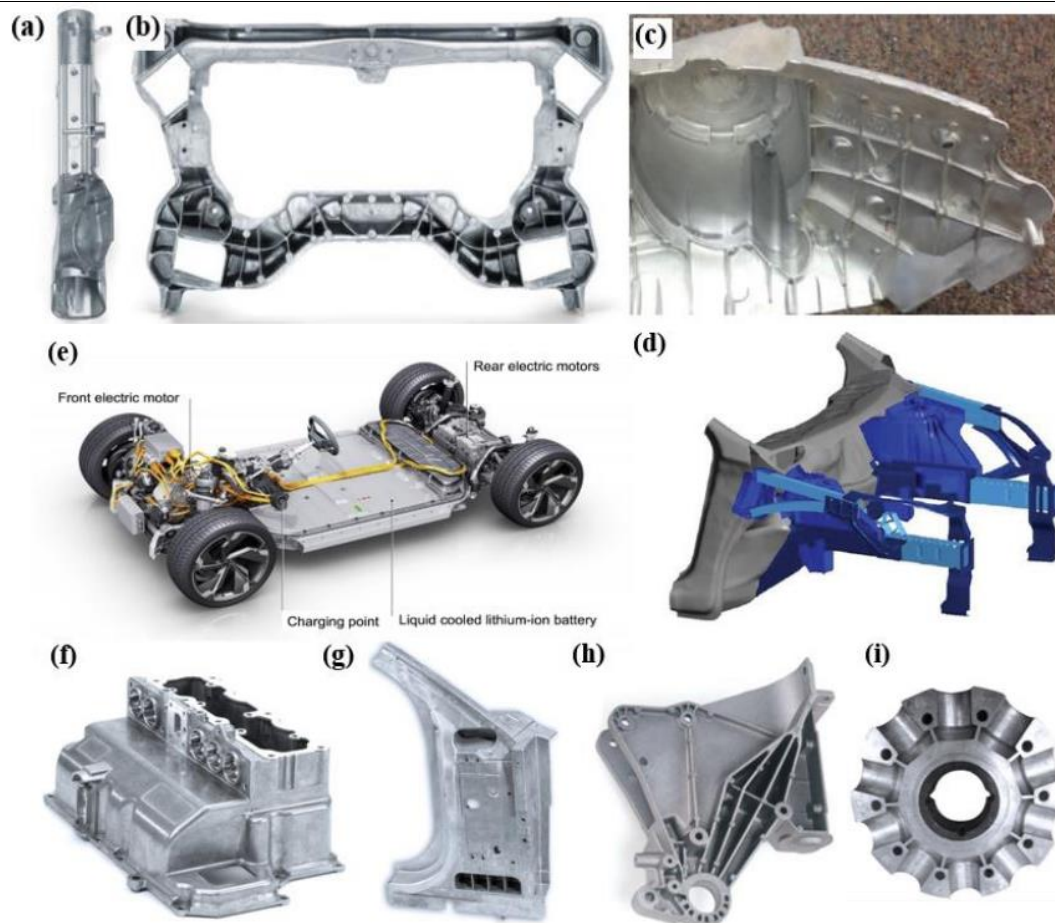
Odlévání tenkostěnných hliníkových a hořčíkových odlitků přímo zapadá do konceptu lightweighting. Je to dáno nízkou hustotou těchto slitin a rovněž metodami výroby, které umožňují díky zvýšeným silám vyplnit velmi tenké průřezy odlitků. Rozlehlé tenkostěnné odlitky lze použít např. k náhradě ocelových výlisků v karoserii a podvozku vozu (tj. sloupků, rámu dveří atd.). Karoserie představuje přibližně jednu čtvrtinu hmotnosti vozidla a nabízí největší potenciál pro snížení hmotnosti. Hliník může redukovat až 50 % hmotnosti konstrukce karoserie automobilu ve srovnání s ekvivalentní ocelovou konstrukcí a stále odpovídá požadavkům nebo překračuje požadavky na konstrukční tuhost a odolnost proti nárazu [32].

Pro odlévání tenkostěnných odlitků z Al a Mg slitin se využívá zejména technologie vysokotlakého odlévání, která je ideální pro výrobu rozlehlých a tvarově velmi komplexních odlitků. Je však určena pouze pro vysokosériovou výrobu. Další technologií, která v poslední době nabývá na významu, je odlévání tenkostěnných odlitků hybridní technologií na vytavitelný/vypalitelný model, která se stále více uplatňuje u výroby menších sérií odlitků z lehkých slitin. Každopádně z hlediska objemu produkce je nejvýznamnější technologie HPDC (High Pressure Die Casting), které je věnována pozornost v následujícím rozboru.

a) Tenkostěnné odlitky ze slitin Al

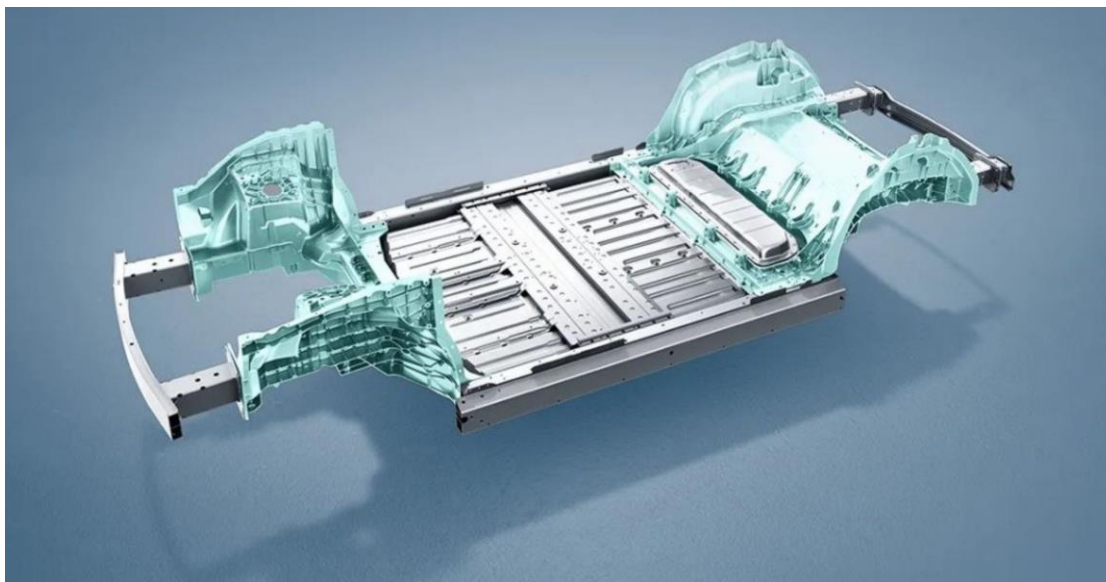
Specifika materiálové skupiny
- Úspěšná výroba tenkostěnných odlitků technologií HPDC vyžaduje optimalizaci tvaru odlitku, investice do výrobního vybavení a precizní zvládnutí řady procesních parametrů, přičemž technologie je využívána až na své vlastní limity. - K dosažení přesnějších tolerancí potřebných pro obrábění tenkostěnných odlévacích forem je zapotřebí sofistikovanější zařízení pro přesné obrábění.

• Velmi důležitým aspektem při výrobě tenkostěnných Al odlitků bylo zavedení vakua. Tento proces vysoce integrálního tlakového lití je schopen vyrábět velké tenkostěnné (2–4 mm) konstrukční odlitky. • Vakuum (pod 60 mbar) pomáhá s plněním tenkých sekcí a kompletním plněním vzdálených a izolovaných oblastí v dutinách tlakové lící formy snížením nebo eliminací odporu vzduchu vůči proudu. • Rozlehlé tenkostěnné odlitky jsou standardně opatřeny 20–30 zářezy (naříznutí), na rozdíl od 3–4 zářezů u konvenčního tlakového lití. • Udržování správné teploty formy je při tlakovém lití tenkostěnných odlitků zásadní. Za tímto účelem musí být chladicí okruhy správně dimenzovány a umístěny a teplota formy musí být řízena pomocí termočlánků tak, aby se udržovala v úzkém teplotním pásmu. Tenkostěnné odlitky vyžadují minimální odvod tepla z povrchu formy, tedy kratší dobu postřiku a použití vysokých poměrů maziva k vodě (mikropostřik). • Pro odlévání tenkostěnných odlitků z hliníku se používají standardní slitiny pro tlakové lití, jako je EN AC-46000 / EN AC-AlSi9Cu3(Fe), EN AC-43400 / EN AC-AlSi10Mg(Fe), případně eutektická EN AC-47100 / EN AC-AlSi12Cu1(Fe). • Rheinfelden GmbH a další firmy vyvíjejí pro speciální aplikace nové slitiny na bázi AlSi, jako např. Silafont[®]-36, Silafont[®]-38, Castasil[®]-21, Castasil[®]-37, Thermodur[®]-73 a Castaman[®]-35, což jsou nejmodernější slitiny pro HPDC s vyšší teplotní stabilitou a dobrou svařitelností. Literatura [33] uvádí, že nejvhodnější slitina tlakového lití pro konstrukci karoserie je Castasil[®]-37, zatímco Silafont[®]-36 je vhodnější pro aplikace v oblasti odpružení podvozku s vyššími požadavky na mez kluzu. • Zcela nové výzvy v technologii tlakového lití Al slitin přináší technologie, která je známá pod názvem gigacasting, nebo megacasting. Jedná se o odlévání velkoplošných konstrukcí z jednoho kusu, které se ve standardní automobilové výrobě svařují, lepí nebo šroubují z velkého množství jednotlivých komponent. To vede k významné redukci počtu vyráběných konstrukčních dílů a k obrovskému zjednodušení výrobních procesů, které již nevyžadují prakticky žádné spojovací operace.
Minimální tloušťky odlitku
• Neželezné slitiny vyžadují pro tenkostěnné tlakové lití tloušťku stěny 2,0 až 4,0 mm. „Ultratenký“ odlitek se vyznačuje tloušťkou stěny nižší než 2 mm. • Vytvoření dílu se stěnami 0,5 mm namísto 2 mm nabízí 75% snížení hmotnosti, což je velmi zajímavý výsledek zejména pro automobilový sektor. Podmínkou odlití tenkostěnného odlitku o tl. 0,5 mm – 1,0 mm je doba plnění dutiny formy (druhá fáze), která by měla být kratší než 30 ms [32]. Toho lze dosáhnout pouze správným návrhem vtokové soustavy, zářezů (naříznutí), odvzdušněním dutiny formy, optimální termoregulací formy a velmi přísným řízením celého procesu.
Výrobní technologie
• Vysokotlaké odlévání se studenou a teplou lící komorou. • Technologie gigacasting (megacasting) – obr. 2.9. • Technologie odlévání na vytavitelný/vypalitelný model (zejména u velkých prototypových dílů) – bude probráno separátně v dalších částech práce.
Aplikace
• Bloky motorů, hlavy válců • Části karoserie • Bateriové boxy
Příklady odlitků



Obr. 2.8 Aplikace tenkostěnných AlSi odlitků v automobilovém sektoru [33]

(a) sloupek řízení, (b) kolébka motoru, tlumič, (d) přední část podvozku, (e) bateriový prostor, (f) horní bezpečnostní kryt pro vysokonapěťové tepelné konektory, (g) sloupek A, (h) sklopný kloub kabiny nákladního automobilu a (i) náboj ventilátoru



Obr.2.9 Příklad odlitku z technologie gigacasting [34]

b) Tenkostěnné odlitky ze slitin Mg

Specifika materiálové skupiny		
- Technologie odlévání slitin hořčíku byla intenzivně vyvíjena během druhé světové války a po ní, a to jak pro gravitační lití do písku, tak i pro lití do forem pod vysokým tlakem, pro letecké, obranné a automobilové aplikace. - V posledních 20 letech se vývoj soustředil na aplikace tenkostěnného tlakového lití v automobilovém průmyslu. - Nejčastěji využívanými slitinami pro odlévání tenkostěnných odlitků jsou slitiny na bázi Mg-Al (AZ91 a AM50). Materiálové výzvy směřují ke slitinám MgSn a k materiálům s mikro- a nanočásticemi MMC (metal matrix composite) [35]. - Nevýhodu v nižší tuhosti Mg tenkostěnných odlitků oproti odlitkům z Al slitin lze kompenzovat vhodně umístěnými žebry bez zvýšení tloušťky stěny. - Ve srovnání s hliníkem má hořčík nižší hustotu, latentní teplo tuhnutí, menší náchylnost na vznik plynové pórovitosti a nižší afinitu k železu u ocelových nástrojů, což znamená delší životnosti nástrojů (forem, jader). - Tabulka 2.6 srovnává hořčík a hliník z hlediska konstrukčních a výrobních parametrů pro technologii HPDC [35].		
<i>Tab. 2.6 Srovnání konstrukčních parametrů pro návrh odlitků z Mg a Al slitin [35] (upraveno)</i>		
	Mg kokilové odlévání	Al kokilové odlévání
Rozměrové tolerance [mm]	± 0,001	± 0–002
Úkosy [°]	0–1,5	2–3
Minimální tl. stěny [mm]	1–1,5	1.4–1.6
Typická životnost [tis. cyklů]	250–300	100–150
Hlavním slévárenským problémem u Mg slitin je vysoký sklon taveniny k oxidaci, který může vést k zahoření hořčíkových par. Proto musí být zajištěny a dodržovány správné výrobní podmínky a postupy, aby bylo riziko eliminováno. Stejně to platí i pro obrábění těchto slitin.		
Minimální tloušťky odlitku		
Mg tlakově lité odlitky mohou být navrženy s tenkými stěnami v oblastech, kde pevnost není primárním požadavkem a se silnějšími stěnami v oblastech, kde nároky na pevnost jsou vyšší. Hořčík lze u standardní HPDC technologie odlévat se stěnou 1–1,5 mm [35].		
Výrobní technologie		
- Vysokotlaké odlévání s teplou lící komorou. - Tixomolding. - Technologie odlévání na vytavitelný model (zejména u tenkostěnných prototypových dílů).		
Aplikace		
- V poslední době pokračující expanze aplikací odlévání hořčíku pro automobilový průmysl, obranu, letectví, elektroniku a elektrické nářadí. - Strukturální díly karoserie. - Díly sedaček, notebooků.		
Příklady odlitků		



Obr. 2.10 Nosič kabiny [36]



Obr. 2.11 Tlakově odlévané Mg odlitky [37]

2.3 Slitiny na bázi Ni, Ti, Co

Během druhé světové války vzrostla poptávka po vysoce kvalitních dílech, konkrétně po částech motorů pro letadla, které pracují za extrémních podmínek. Tyto požadavky vedly k rozvoji technologie IC. Komponenty pro proudové motory, konkrétně lopatky turbíny, jsou velmi složité a vyžadují komplikované geometrie. Mnoho lopatek turbíny má vnitřní dutiny (struktury) pro účely chlazení. Průchodem chladicího vzduchu vnitřními dutinami se teplota lopatek snižuje, což umožňuje motorům pracovat při vyšších teplotách.

Specifika materiálové skupiny

- Dominantním výrobním procesem pro odlévání slitin Ni, Ti a Co je odlévání do keramických skořepin – technologie vytavitelného modelu IC.
- Tavení a odlévání těchto slitin a superslitin probíhá většinou ve vakuu.

- Odlévání tenkostěnných odlitků je u IC technologie umožněno zejména díky vysoké teplotě keramické skořepiny. Zabíhavost je ovlivňována i dalšími parametry, jak bude dále v práci rozebíráno, a jedná se zejména o teplotu odlévání, prodyšnost skořepiny, tlakovou výšku a rychlost lití.
- IC technologie je specifická ve schopnosti vyplnit taveninou jemné kontury odlitků, které jsou spojeny s profilem lopatek pro aerospace, případně aplikace v plynových turbínách. Schopnost plnit jemné detaily je řízena povrchovým napětím, smáčivostí a kapilárním tlakem. Tyto aspekty jsou důležité u tenkých hran lopatek, kdy může docházet k nevyplnění celého průřezu kovem a vznikem nechtěného zaoblení [38].
- Specifikem u odlévání tenkostěnných odlitků z těchto slitin je požadavek na velikost zrn a jejich orientaci.
- Odlévání tenkostěnných odlitků z Ni slitin je velmi podrobně studováno a popsáno v řadě výzkumných pracích, jako např. [38], [39], [40]. Autoři se zabývají jak zabíhavostí z pohledu materiálu, odvodu tepla, interakce, tak rovněž procesy smáčivosti a povrchového napětí.
- Pro odlévání tenkostěnných odlitků z Ni slitin se používají všechny tři základní materiálové skupiny: Inconel®, Monel®, Hastelloy®. Některé z nich jsou určeny i pro odlévání tzv. na vzduchu.
- Titanové slitiny jsou komplikované s ohledem na jejich reaktivitu s kyslíkem a dusíkem. Mezi nejčastěji odlévané slitiny v IC technologii patří: Ti-6Al-4V (ASTM Grade 5), Ti-6Al-2Sn a další speciální materiály.
- U titanových slitin je nutné, s ohledem na minimalizaci výskytu alfa fáze, volit pre-heating skořepiny pouze v úrovni 150–300 °C. Tento fakt výrazně ovlivňuje minimální tloušťku stěn u odlévání Ti tenkostěnných odlitků a je tedy nutné použít technologie odstředivého odlévání [41].
- Mezi materiálové skupiny ze slitin Co, které se používají na výrobu tenkostěnných odlitků, patří např. Co-Cr (UMCo), Stellite™, Co-Cr-Nb.
- Kobaltové slitiny jsou důležitou skupinou vysokoteplotních materiálů používaných v teplotně exponovaných sekcích proudových a raketových motorů, kde teploty spalin dosahují 1200–1400 °C. Slitiny jsou založeny na kobaltu s velkým množstvím legujících prvků, které zajišťují pevnost, houževnatost a odolnost při vysokých teplotách.
- Materiály na bázi kobaltu jsou lépe svařitelné než alternativy na bázi niklu. I když nejsou při nižších teplotách tak pevné jako slitiny niklu, tak nad 930 °C vykazují vyšší pevnost [42].

Minimální tloušťky odlitku

- Pro IC odlitky z Ni slitin je typická minimální tloušťka stěny 1,5 mm ale jsou možné vyrábět i tenkostěnnější sekce, v závislosti na slitině a detailech geometrie [8].
- Limity pro tenkostěnné odlitky z Ti slitin jsou považovány v 1,5–2 mm. Projekt [43] se zaměřil na dosažení hranice 0,89 až 1,27 mm s využitím technologie vertikálního odstředivého odlévání.
- Pro Co slitiny se udává minimální tloušťka stěny mezi 1–2 mm [42].

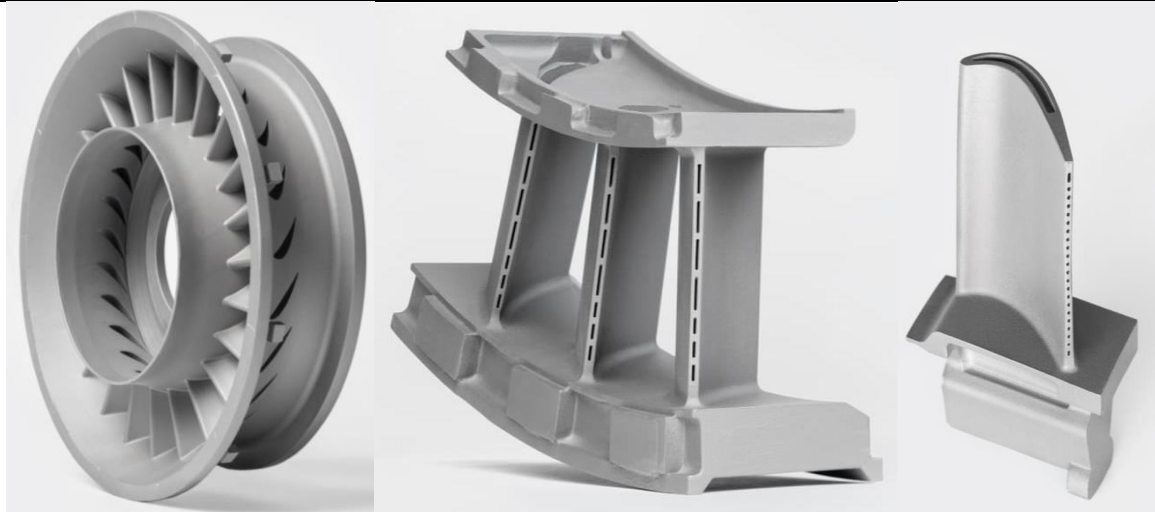
Výrobní technologie

- Odlévání na vytavitelný model – IC.
- Odlévání ve vakuu, vakuové nasávání.
- Odstředivé lití.

Aplikace

- Komponenty leteckých motorů (Ni, Ti).
- Komponenty IGT – industrial gas turbine (Ni).
- Ortopedické implantáty, zubní implantáty (Co, Ti).

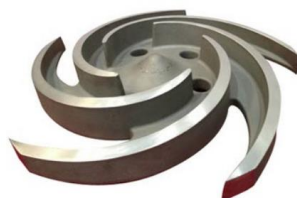
Příklady odlitků



Obr. 2.12 Tenkostěnné odlitky z Ni slitiny [44]



Titanium Casting Titanium Turbo Impeller



Titanium Casting Titanium Impeller sku 1



Titanium Casting Parts Titanium Valve Body

Obr. 2.13 Tenkostěnné odlitky z Ti slitin [45]



Obr. 2.14 Odlitky z Co slitin [46]

Řada nových výzev a požadavků v posledních letech přichází ze sektoru odlévání tenkostěnných odlitků z hliníkových slitin. Jedná se o prototypovou až malosériovou výrobu odlitků s velmi komplikovanými tvary a rozlehlými stěnami o tloušťkách 0,5–3 mm. Tlakové lití v tomto sektoru je nevyhovující s ohledem na vysoké náklady na tlakovou lící formu a nízký počet odlitků. Technologii, která umožňuje ekonomicky únosnou výrobu takovýchto dílů, je technologie přesného odlévání na vytavitelný/vypalitelný model – IC. **Práce se dále bude věnovat pouze odlitkům z hliníkových slitin odlévaných technologií IC.**

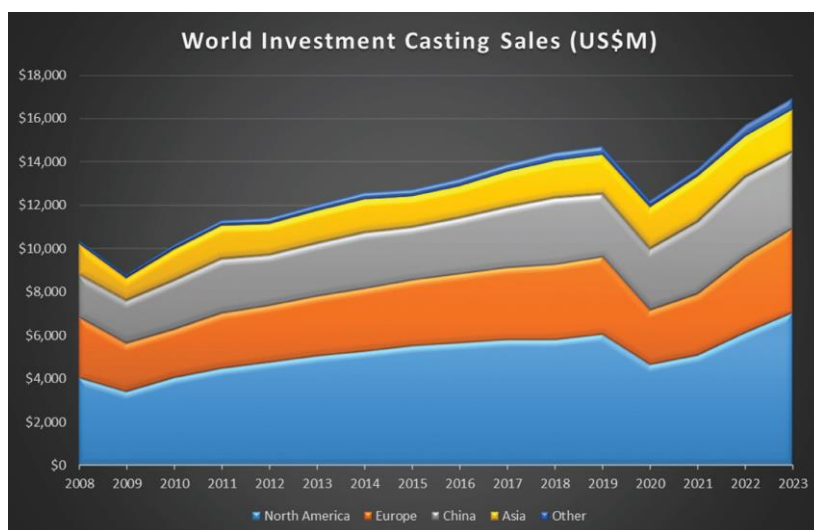
3. TECHNOLOGIE INVESTMENT CASTING – technologie tenkostěnných odlitků

Technologie odlévání na vytavitelný model je známá několik tisíc let. Se zvyšováním požadavků na tvarovou složitost se tato technologie od padesátých let minulého století stala velmi důležitou pro výrobu komplexních součástí, a to nejen v leteckém průmyslu. Nabízí velmi přesnou výrobu v úzkých rozměrových tolerancích, vynikající kvalitu povrchu a širokou variabilitu odlévaných materiálů. V zahraničí je označována jako technologie investment casting, lost wax (technologie ztraceného vosku-modelu), precision casting (přesné odlévání) a (near) net shape technologie neboli technologie „na hotovo“. Technologie na hotovo, kde se předpokládá, že tvar již dále nebude obráběn, což vyžaduje velmi přesné řízení parametrů výroby.

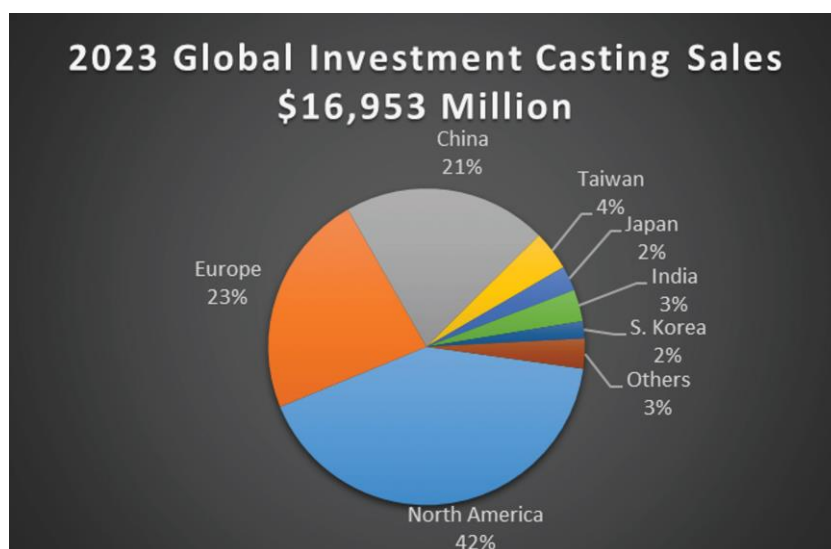
Technologie odlévání na vytavitelný model vyhovuje jak specifickým požadavkům na odlévání tenkostěnných odlitků, tak široké materiálové variabilitě a možnosti výroby velmi komplikovaných tvarů. Je rovněž technologií, která je v současnosti s oblibou využívána právě pro výrobu prototypů a lze ji velmi dobře kombinovat s 3D tiskem modelů, keramických jader nebo skořepin, přičemž toto propojení bývá nazýváno „hybridní IC technologií“ [47]. Výroba odlitků za pomoci IC technologie celosvětově roste a skýtá vysoký potenciál trhu.

3.1 Vývoj trhu v oblasti IC technologie

Globální prodeje odlitků na vytavitelný model byly v roce 2023 odhadnuty na 16,9 miliardy USD, přičemž nejvyšší úroveň růstu vykazuje sektor s vysokou přidanou hodnotou – HAV (High Added Value), který se zabývá odlitky pro letectví a kosmonautiku a IGT (Industrial Gas Turbine). S meziročním (YoY) růstem 14,7 % zakončily prodeje komponent s vysokou přidanou hodnotou na úrovni 10,2 miliardy USD. Globální tržby z automobilových odlitků vzrostly o 3,2 % na 1,7 miliardy USD a tržby za odlitky pro ostatní průmysl klesly o 4,5 % na 5,0 miliard USD. Celkově průmysl zaznamenal meziroční růst o 7,2 % [48], jak je patrné z obr. 3.1.



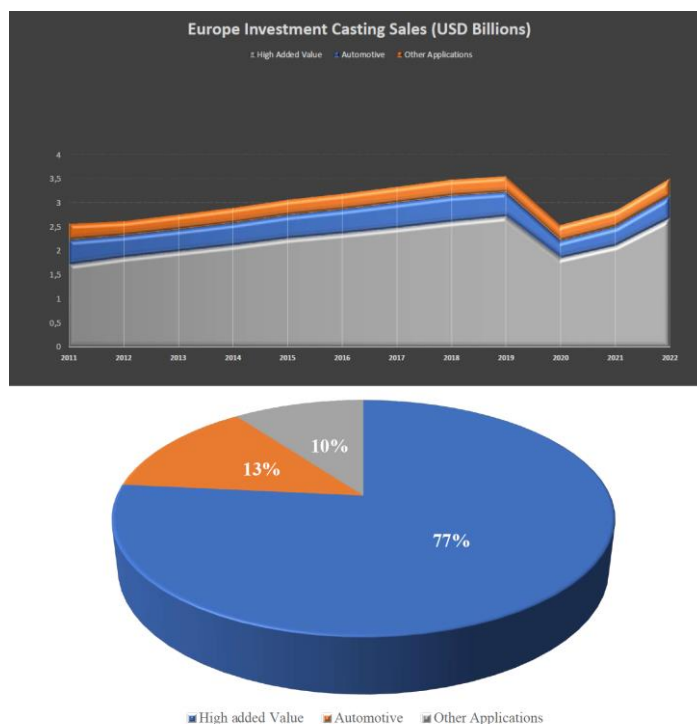
Obr. 3.1 Obrat v prodeji odlitků přesného odlévání (IC - technologie)



Obr. 3.2 Segmentace trhu dle regionů [49]

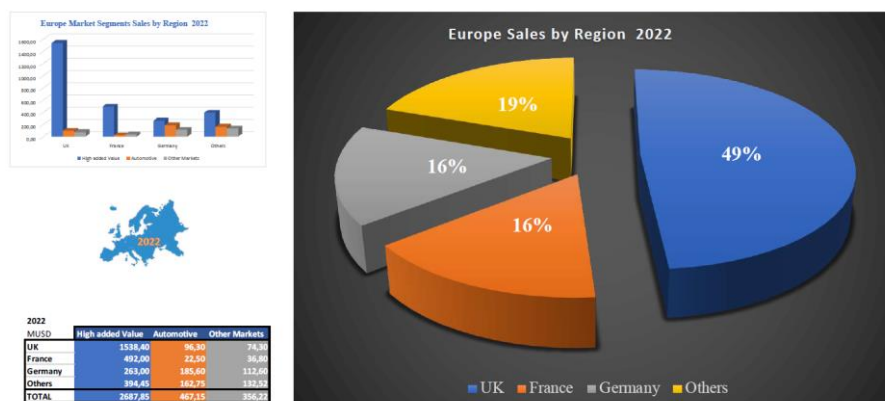
Prodej odlitků technologií IC v Severní Americe vzrostl o 13,6 % a tvoří 42 % celosvětového trhu s prodejem odlitků v roce 2023 ve výši 7,1 miliardy USD. Evropa zakončila rok s 3,9 miliardami USD a představuje 23 % tržeb v daném odvětví. Tempo ročního růstu v tomto regionu bylo 10,7 %. Na konci roku s tržbami v celkové výši 3,9 miliardy USD neboli 21% podílem na trhu poklesly čínské prodeje IC odlitků o 4,3 % na 3,5 miliardy USD [49] – obr. 3.2.

Obrázek 3.3 zachycuje vývoj trhu s odlitky v Evropě vyrobené technologií IC a rozdělení do sektorů. Z obrázku je rovněž patrné, že sektor HAV tvoří 77 % z celkového koláče tržeb, takže je trhem velmi atraktivním.



Obr. 3.3 Vývoj prodeje odlitků technologie IC v Evropě, podíl segmentů trhu [48]

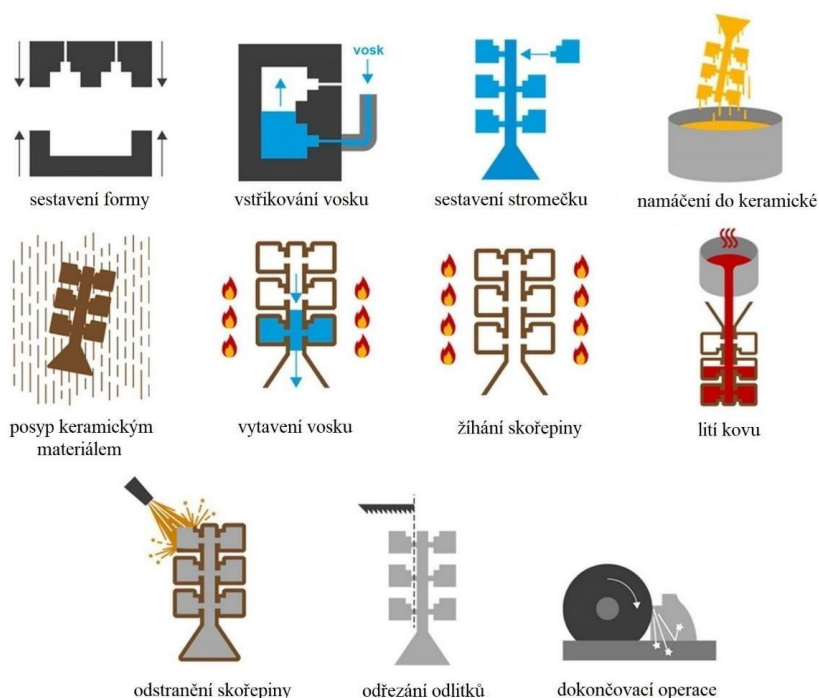
Pozice jednotlivých zemí z hlediska prodeje je mapována na obr. 3.4, přičemž lídrem mezi evropskými zeměmi je Velká Británie následovaná Francií a Německem. Česká republika je významným hráčem na poli technologie IC, a to zejména počtem sléváren (12), které se touto technologií zabývají. Přesné údaje o produkci nejsou pro rok 2022 známy, ale tvoří pouze nižší % z celkového evropského koláče. Nicméně v přepočtu na jednoho obyvatele docházíme ke srovnatelným hodnotám s nejvyspělejšími státy Evropy, jak uvádí Horáček ve své práci [50], a mezi státy východní Evropy je ČR nejvýznamnějším státem ve vývoji a použití této technologie. Založením výzkumného centra na VUT FSI v Brně a pořádáním EICF mezinárodního kurzu se ČR dostává do popředí zájmu i v oblasti výchovy nových odborníků v této oblasti.



Obr. 3.4 Rozdělení evropského trhu – prodeje odlitků v technologii IC [48]

3.2 Popis technologie lití na vytavitelný/vypalitelný model

Tradiční technologie IC se skládá z několika základních kroků, které jsou shrnuty na obr. 3.5. Variabilita ve výrobě modelů a způsob výroby formy umožňuje odlévat širokou tvarovou pestrost.

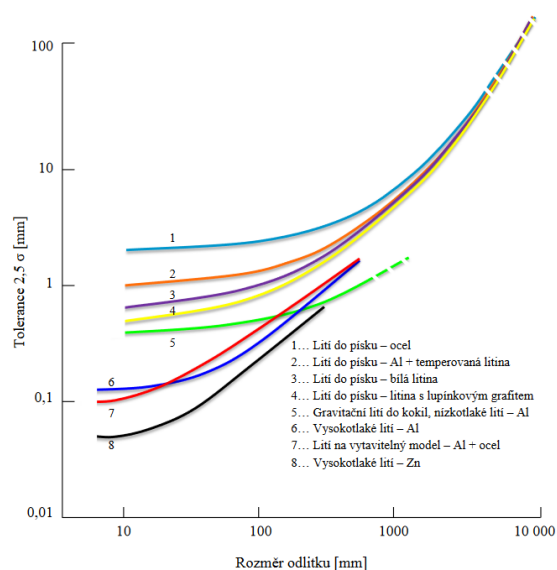


Obr. 3.5 Postup výroby pomocí technologie přesného lití [51] (upraveno)

Současné trendy v této technologii jsou zaměřeny do těchto oblastí:

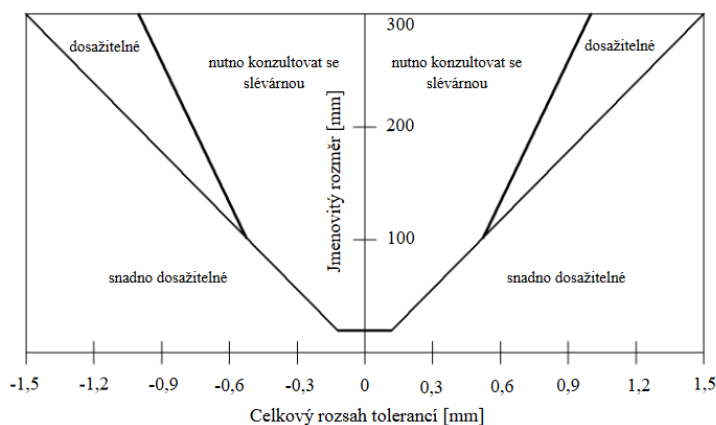
- maximální využití aditivních technologií do výroby modelů, skořepin a keramických jader;
- vývoj suspenzí na vodní bázi s aditivou zvyšujícími pevnosti a prodyšnosti skořepin (použití vláken);
- náhrada přírodních keramických mouček a posypů syntetickými keramickými materiály;
- recyklace keramických materiálů;
- robotizace a automatizace všech výše uvedených výrobních kroků.

Technologie IC se řadí mezi technologie přesného odlévání tzv. near net shape, což znamená, že součást je vyrobena „na hotovo“ pouze odléváním, bez nutnosti dalšího obrábění. Přesnost odlitků je dána tolerancemi rozměrovými a tvarovými a je spojena se změnou jmenovitého rozměru, jak je naznačeno na obr. 3.6 v porovnání s dalšími slévárenskými technologiemi.



Obr. 3.6 Průměrné hodnoty rozměrových tolerancí u různých slévárenských technologií dle Campbella [52] (upraveno)

Výsledná tolerance je součtem rozměrových změn ve fázi výroby modelu, výroby keramické formy a ve fázi chladnutí odlitku. Dosažení úzkých tolerančních pásem je složitou záležitostí, která vyžaduje hluboké znalosti celého procesu a rovněž otevřenou diskuzi se zákazníkem, jak naznačuje obr. 3.7.



Obr. 3.7 Dosažitelné tolerance v závislosti na jmenovitém rozměru [50]

Tabulka 3.1 shrnuje parametry, které lze dosáhnout technologií vytavitelného modelu.

Tab.3.1 Základní parametry technologie IC [50]

Rozměry odlitků [mm]	Hmotnost odlitků [kg]	Tloušťky stěny odlitků [mm]	Drsnost Ra [μm]	DCTG*	GCTG** (pro Al)
5 až $2 \cdot 10^3$	10^{-3} až 10^2	1–20	1,6–25	4–9	3–5

*DCTG – Linear Dimensional Casting Tolerance Grades – stupně lineárních rozměrových tolerancí

**GCTG – Geometrical Casting Tolerance Grades – stupně geometrických rozměrových tolerancí

3.3 Aditivní technologie v IC

Technologie IC je úzce spojena s rozvojem aditivních technologií. Tyto technologie jsou již masivně využívány pro prototypovou výrobu odlitků, nicméně svůj potenciál nacházejí i v malosériové výrobě. 3D tisk je použit v několika oblastech IC technologie.

- 3D tisk modelů (technologie FDM, SLA, BJ, MJP), částí matečné formy



Obr. 3.8 3D tisk modelů z technologie MJP (vlevo) a SLA (vpravo) [53]

- 3D tisk keramických jader a filtrů (technologie DIW, SLA, DLP, BJ)



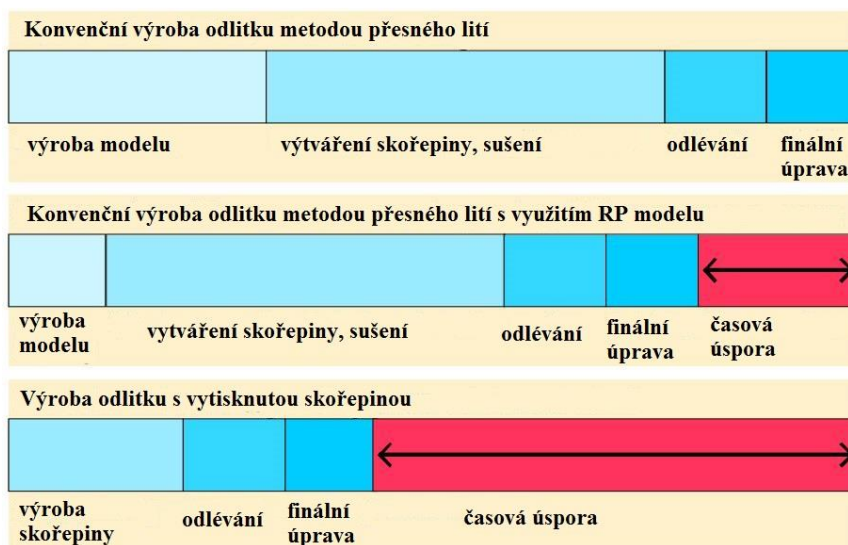
Obr. 3.9 3D tisk jader a keramických filtrů [54]

- 3D tisk skořepiny (technologie DLP, SLA, BIJ)



Obr. 3.10 3D tisk keramické skořepiny [55]

Na obrázku 3.11 je naznačena časová úspora v případě implementace aditivních technologií do procesů IC. Uvádí se, že časová úspora s využitím aditivních technologií může znamenat až 75 % úspory celkového času v případě, že 3D tisk je využit pro tisk keramické formy [55].

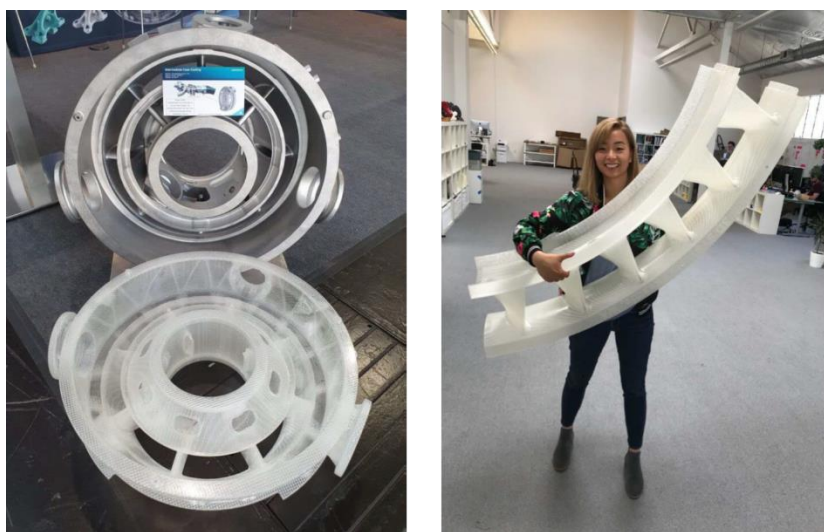


Obr. 3.11 Časová úspora při implementaci aditivních technologií [56]

3.4 Výzvy v oblasti odlévání tenkostěnných odlitků z Al slitin

V kapitole 2.2 je zmíněn trend výroby velkých rozměrných odlitků pomocí technologie přesného odlévání s využitím vytavitelného/vypalitelného modelu. Jedná se většinou o kusovou a malosériovou výrobu velkých dílů s tloušťkou stěny 1–2 mm, která je neekonomická z hlediska technologie HPDC. Tedy i dražší technologie IC se stává preferovanou technologií výroby a velmi zajímavým segmentem.

Díky rozmachu aditivních technologií je možné vytisknout díly v rozměru 500–1000 mm. Výroba matečné formy a použití speciálních lisů by bylo ekonomicky nevýhodné, a tedy 3D tisk se stává dominantní technologií při výrobě těchto dílů – obr. 3.12.

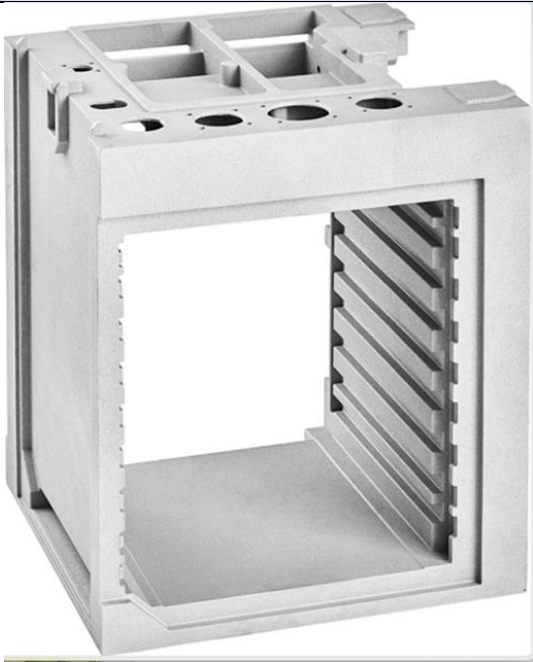
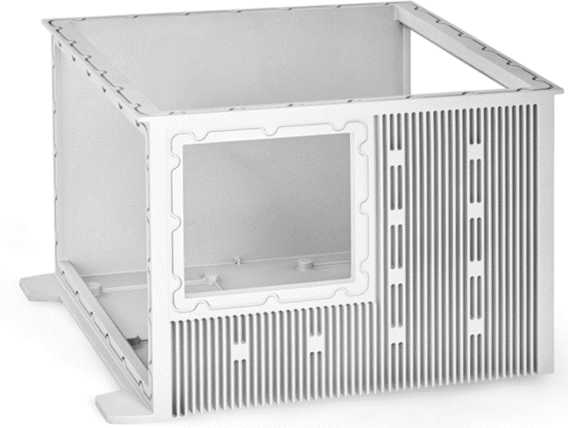


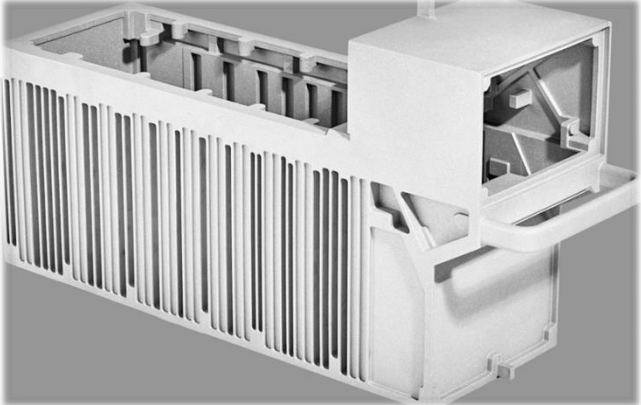
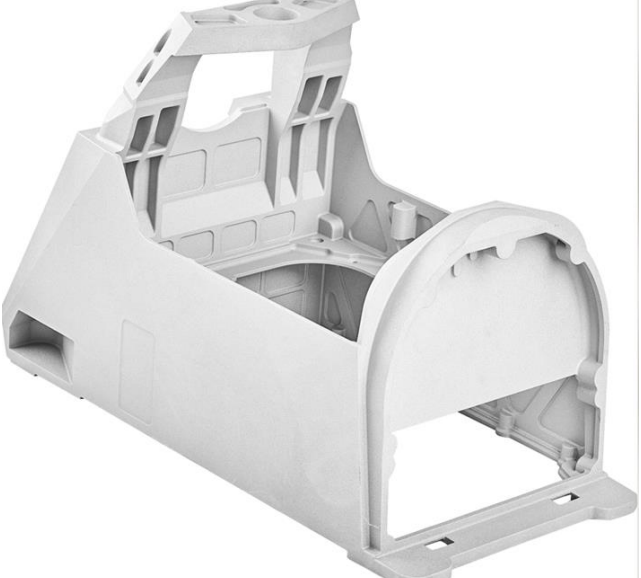
Obr.3.12 Velkoformátové 3D tištěné modely [57]

Na 3D tisk takto velkých dílů musí navazovat inovace v oblasti post-processingu modelů, způsobu obalování keramickou suspenzí i ve způsobu vytavování/vypalování modelu. Nicméně trend v této oblasti je zřejmý a ty slévárny, které na tyto výzvy budou schopny reagovat, budou mít významnou konkurenční výhodu.

Níže v tab. 3.2 jsou prezentovány vybrané odlitky společnosti ALUCAST s.r.o. [58], se kterou VUT FSI velmi úzce spolupracuje a která se zabývá výrobou tenkostěnných odlitků hybridní technologií IC.

Tab. 3.2 Tenkostěnné odlitky v technologii IC

Rozměr/Sektor	Průměrná/min. tl. stěny [mm]	Obrázek
190 × 190 × 240 mm letectví	10/1	
280 × 350 × 400 mm letectví	7/1	

420 × 200 × 120 mm letectví	6/1	
420 × 200 × 250 mm letectví – Eurofighter	9/1.5	

Výše uvedené odlitky jsou výzvou ve všech technologických aspektech. Od výroby modelů, návrhu lící a nálikové soustavy, výroby skořepiny, způsob odlití až po tuhnutí a chladnutí odlitku. Oproti standardním Al dílům je nutné věnovat větší pozornost zabíhavosti a fázi chladnutí, která u těchto odlitků může vést k výraznějším deformacím odlitků.

4. KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ TENKOSTĚNNÝCH ODLITKŮ

Slévárenská technologie umožňuje konstruktérům velmi široké spektrum tvarové složitosti jednotlivých komponent s využitím složitých tvarových dutin, které mimo aditivních technologií nejsme schopni jinými konvenčními metodami výroby dosáhnout. Pro tenkostěnné odlitky by měla technologičnost konstrukce vycházet zejména z požadavků na plnění a tuhnutí odlitku (přechody a napojení/propojení stěn). Z hlediska tuhosti odlitku je nutné maximálně využít žebrování součástí. Slévárenská technologie je unikátní v tom, že dovoluje konstruktérům vložit materiál tam, kde je to z hlediska namáhání důležité (nelineární napěťový stav konstrukce). V oblastech, kde je nízké namáhání součástí, je snaha použít minimální objem materiálu a toto je výzva pro konstrukci tenkostěnného odlitku. Výhody plynoucí z odebrání hmoty odlitku jsou zcela jasné, a to v podobě snížení hmotnosti, snížení spotřeby materiálu, jak je uvedeno v kapitole 1. Slévárenské hledisko jde často proti těmto požadavkům, a to vzhledem k rychlému ochlazování taveniny ve fázi plnění, které zvyšuje riziko výroby neshodných odlitků. Technolog disponuje řadou procesů a nástrojů, které mohou výskyt vad minimalizovat. Jde zejména o volbu technologie, formovacích hmot, teplot kovu a formy, ale bez podpory konstruktéra ve fázi vývoje odlitku je šance na úspěch významně omezená.

4.1 Technologičnost konstrukce odlitků

Použití tenkostěnných odlitků s sebou přináší určitá specifika, která se týkají konstrukce jednotlivých dílů, které by určitým způsobem měly reflektovat technologičnost konstrukce. Technologičností konstrukce rozumíme takové konstrukční provedení součástí nebo výrobků, které zaručuje co nejehospodárnější výrobu při splnění všech jejích funkcí, životnosti a spolehlivosti. Konstruktér navrhuje tvar, rozměry, přesnosti (tvarové, rozměrové), materiál a polotovar. Technologické hledisko konstrukce je vázáno na výrobní podmínky závodu (strojní vybavení, automatizace) a na sériovost výroby (typu výroby – kusová, malosériová, sériová, hromadná).

Ideální konstrukce bývá kompromisem mezi technickými požadavky, funkcí, tvarem, pevností, jakostí, životností a spolehlivostí na straně jedné a technologickými možnostmi společně s ekonomikou výroby na straně druhé.

Mezi základní požadavky na konstrukci z hlediska slévárenské technologie, a tedy na dosažený stupeň „technologičnosti“ patří:

- přizpůsobení konstrukce technologii výroby;
- vyhovující technologické vlastnosti materiálu (slévatelnost, obrobitelnost);
- nízká cena, spotřeba materiálu;
- volba tvaru a rozměrů v závislosti na technologii výroby (tloušťka stěn, otvory, dutiny, drážky, úkosy, výstupky, žebra, dělicí plochy, zaoblení atd.);
- přiměřené požadavky na drsnost povrchu, přesnost odlitku, výskyt vad.

Pro posouzení „technologičnosti“ konstrukce odlitku je nutné zahrnout především tato hlediska použité slévárenské technologie:

- způsob odlévání (gravitační lití, odstředivé, tlakové lití);
- druh modelu (trvalý, netrvalý – vytavitelný, vypařitelný, spalitelný);
- odlévaný materiál (litina, ocel, slitiny neželezných kovů);
- způsob formování a dokončovací operace;
- způsob zatížení odlitku.

Základní pravidla pro správné konstruování součástí ze slévárenského hlediska byla v literatuře popisována prakticky současně s vývojem slévárenství. Za zmínku stojí např. komplexní shrnutí těchto pravidel pod názvem „10 zlatých pravidel“ publikovaných v USA již počátkem 50. let minulého století a později upravených týmem prof. Campbella [59]. Níže je volná interpretace některých pravidel.

- Pravidlo 1 a 2: Diskuze konstruktéra a technologa při tvorbě modelu
- Pravidlo 3: Návrh pro „zdravý“ odlitek – usměrňenost tuhnutí
- Pravidlo 4: Vyhnout se ostrým rohům a napojením
- Pravidlo 5: Omezení množství spojených sekcí – tepelné uzly
- Pravidlo 6: Rovnoměrné tloušťky stěn
- Pravidlo 7: Proporcionální návrh vnitřních stěn
- Pravidlo 8: Vyhnout se ostrým přechodům stěn
- Pravidlo 9 a 10: Správná volba žebor a tvarových vylehčení

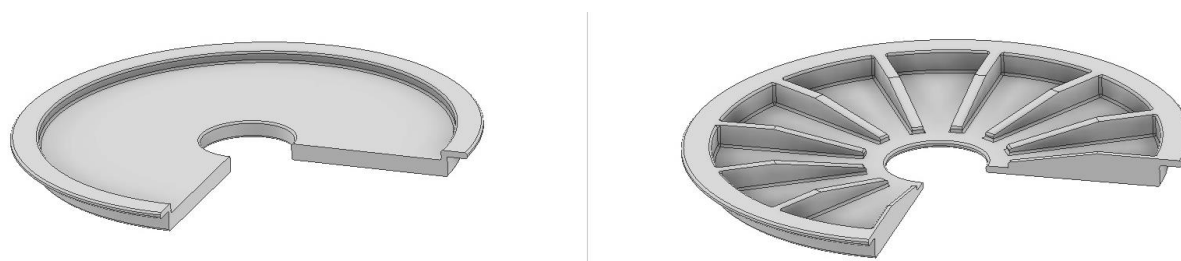
Velmi často konstruktéři využívají obdobné tabulky, jako např. níže tab. 4.1 [60]. Tato tabulka zohledňuje spíše ekonomicky proveditelnou výrobu, ale nezohledňuje kombinaci materiálů, limity procesů a je použitelná jako průvodce pro prvotní návrhy konstrukce.

Tab. 4.1 Typické minimální tloušťky odlitků dle [60] (upraveno a převedeno na mm z in)

Technologie	Al slitiny	Mg slitiny	Oceli
Lití do písku	$3,2 \pm 0,7$	$3,9 \pm 0,7$	$4,8 \pm 0,7$
Lití do keramické skořepiny (IC)	$1,6 \pm 0,3$	$1,6 \pm 0,3$	$2,4 \pm 0,3$
Lití do kovové formy	$1,6 \pm 0,3$	$2,4 \pm 0,3$	–
Lití do sádrové formy	$2,0 \pm 0,4$	–	–

Častým přístupem pro ověření prvotního návrhu je využití numerické simulace, případně diskuze se slévárnou o výrobě prvního prototypu a provedení zkoušek proveditelnosti (feasibility study). Zde může slévárna rovněž odhadnout následnou cenu a úroveň možné neshodné výroby. Tabulka 4.1 naznačuje, že u odlévání do písku je u hliníkové slitiny kritická hodnota 3,2 mm. Reálně hliník může zabíhat i do tenčího průřezu (noty v dělicí rovině), ale pouze do krátké vzdálenosti.

Konstruktér v případě požadavku na tenčí stěnu má možnosti ovlivnit proudění kovu způsobem žebrování – obr 4.1. Správným využitím žebor lze dosáhnout dvou efektů. Rozdělení odlitků na menší sekce umožní zaplnění požadovaných částí odlitku. Druhým efektem je zvýšení tuhosti celé konstrukce.

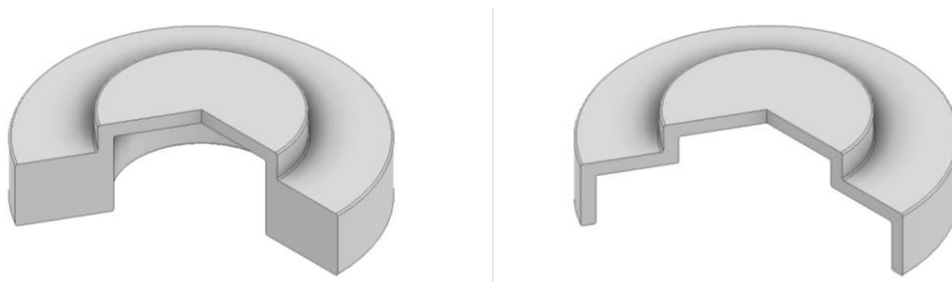


Obr. 4.1 Využití žebrování pro zvýšení zabíhavosti kovu

Optimalizované žebrování je řešením i v případě, že se konstruktér rozhodne vyrobít tenkostěnný odlitek pomocí změny materiálu. Znamená to, že původně zamýšlený ocelový odlitek se stěnou odlitku 5 mm může být nahrazen hliníkovým odlitkem, ale je nutné konstrukci

upravit žebrovaním tak, aby byly kompenzovány nižší mechanické vlastnosti hliníkové slitiny. Rozdíl v tekutosti taveniny, a tedy v zabíhavosti slitiny může být významný i u jednotlivých materiálových skupin. U siluminů je významně jiná zabíhavost u obsahu Si 7 % a Si 12 %. U korozivzdorné oceli bez molybdenu je dle [60] vyšší zabíhavost taveniny než s přidavkem molybdenu. V konečném důsledku jsou jakékoliv změny a zásahy konstruktéra významně ovlivňovány cenou konečného dílu a toto kritérium je často zásadní. Na obrázcích 4.2–4.7 je shrnuto několik zásad, které je nutné dodržovat zejména u konstrukce tenkostěnných odlitků.

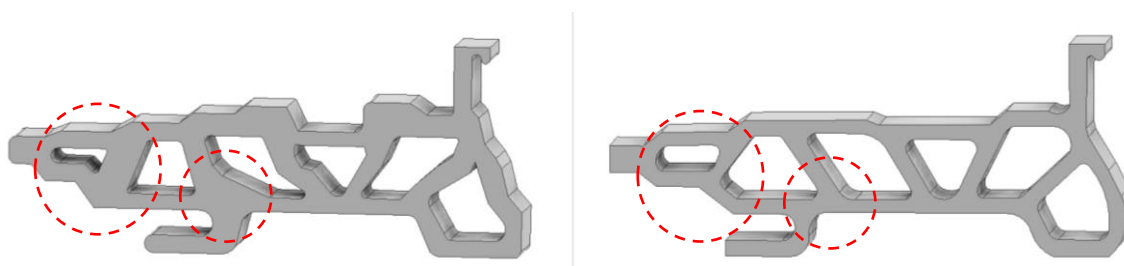
- **Dodržení obdobných tloušťek stěn** (eliminace tepelných uzlů, rozdílného času tuhnutí jednotlivých sekcí)



Nesprávné – Správné

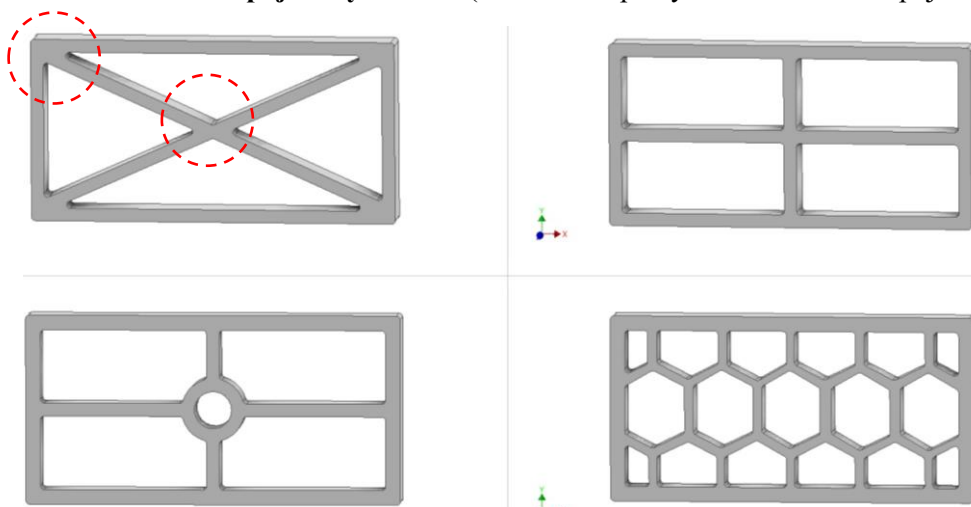
Obr. 4.2 Zásada obdobných tloušťek stěn

- **Proporcionální návrh vnitřních stěn** (eliminace tepelných uzlů, správný odvod tepla do jader)



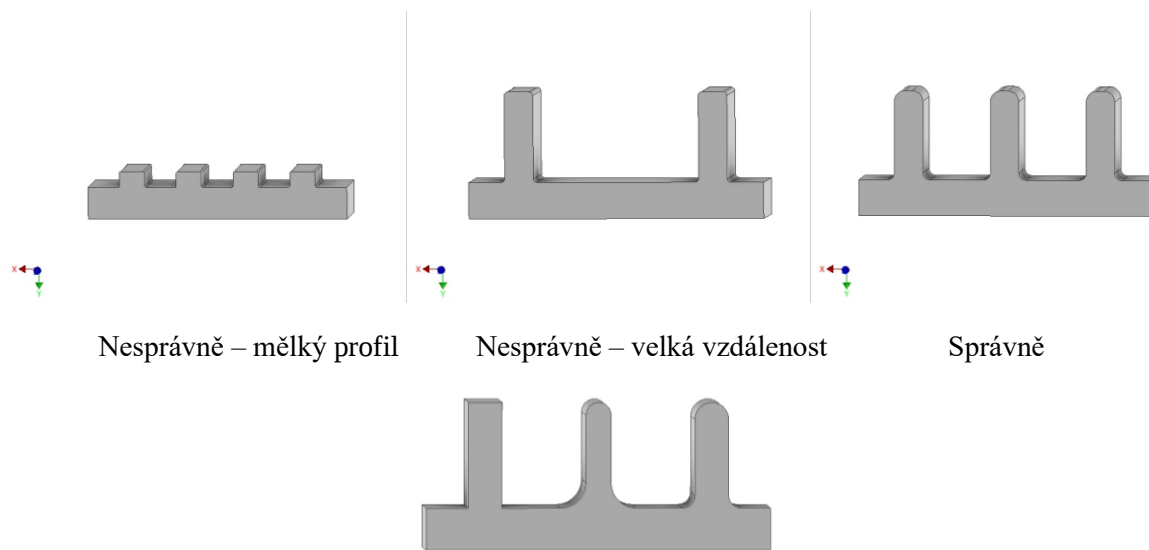
Obr. 4.3 Zásada eliminace tepelných uzlů v napojení vnitřních stěn

- **Omezení množství spojovaných sekcí** (eliminace tepelných uzlů v místě napojení stěn)



Obr. 4.4 Úprava konstrukce v napojení stěn a sekcí

- **Správná volba žeber a tvarových vylehčení** (redukce hmotnosti, zvýšení tuhosti)

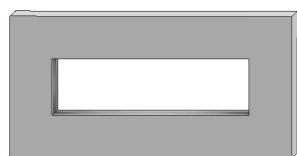


Nesprávně – mělký profil

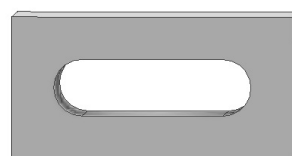
Nesprávně – velká vzdálenost

Správně

Žebra přibližně 0,8 t (stěny odlitku) [59]



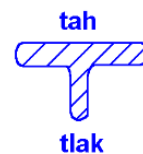
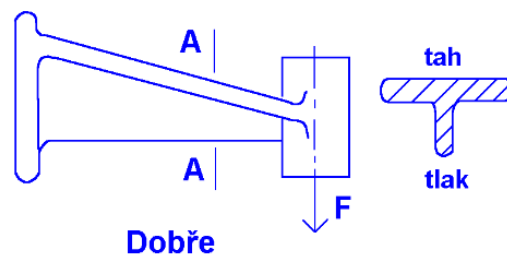
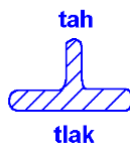
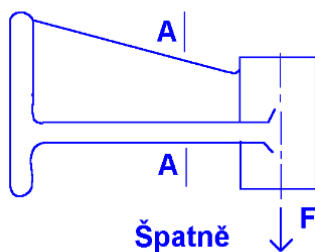
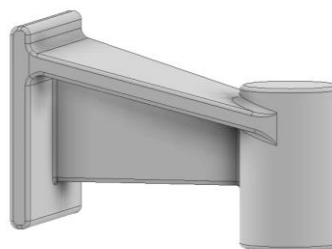
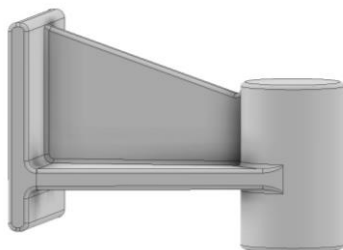
Nesprávně (ostré rohy)



Správně (úprava zaoblení)

Obr. 4.6 Volba žeber a vylehčení (zjednodušené tvary)

- **Správná konstrukce s ohledem na minimalizaci vnitřního pnutí a zohledňující zatížení**

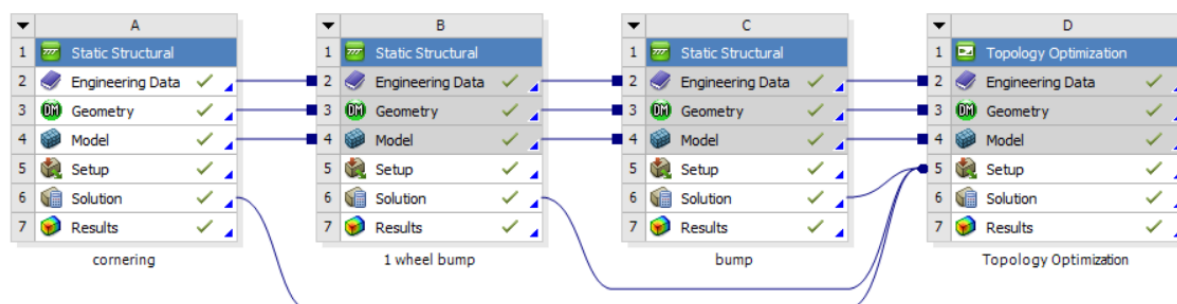


Obr. 4.7 Volba konstrukce z hlediska následného zatížení

4.2 Topologická optimalizace

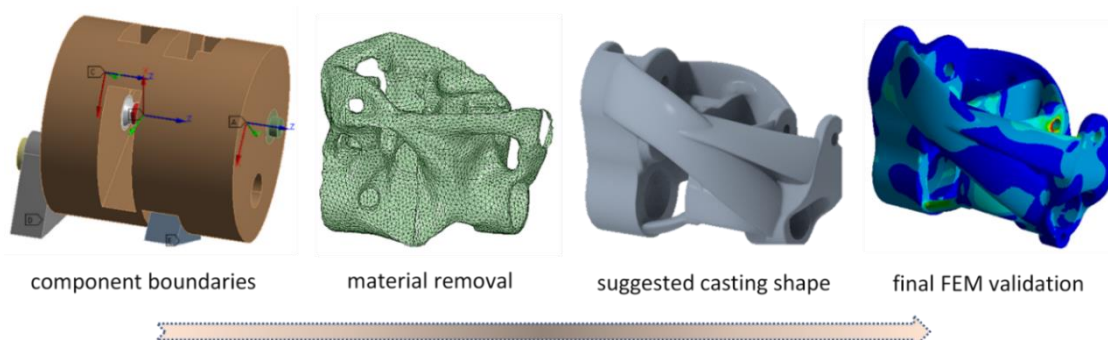
V nedávné minulosti byly tvary odlitků navrhovány tak, aby splňovaly alespoň základní požadavky na technologičnost konstrukce. Jedná se o přizpůsobení konstrukce dílu způsobu výroby a vlastnostem materiálů s cílem zajistit efektivní a kvalitní výrobu. Technologičnost konstrukce se zaměřovala na způsob dělení modelu s ohledem na předem zvolenou výrobní technologii, soustřeďovala se na eliminaci tepelných uzlů pomocí ideálního napojení a přechodu stěn. V řadě případů reagovala na potřebu usměrněného tuhnutí s ohledem na eliminaci slévárenských vad. Z uvedených důvodů byly tvary odlitků spíše konzervativní, tak aby vyhovovaly zejména požadavkům na funkčnost a zvolenou výrobní technologii. Rozvoj nových optimalizačních metod v 3D konstruování (včetně cloudových řešení), mezi které patří například topologická optimalizace či generativní design a rozvoj metod 3D tisku, posunul návrhy tvarů součástí až do oblasti, která v minulosti náležela pouze uměleckým odlitkům. Návrhy odlitků vycházející z topologické optimalizace cílí na stanovení optimálního rozložení materiálu v návrhovém prostoru. Tento postup nahrazuje tradiční přístup manuálního redesignu anebo parametrickou optimalizaci. Výhodou topologické optimalizace je nezávislost na konstrukčních rozměrech. Během procesu optimalizace se odebírá materiál z celkového objemu konstrukčního dílu při dodržení předem stanovených ohraničení, například vnější hranice dílu, pevnosti dílu, zachování propojovacích oblastí.

Níže je demonstrován příklad strojní součásti, která byla z původní technologie obrábění převáděna na technologii odlitku za použití topologické optimalizace [61]. Projekt byl řešen na VUT FSI v Brně v rámci soutěže studentských formulí (formule Dragon 10), kde zásadním požadavkem na odlitky bylo snížení hmotnosti a zvýšení tuhosti, přičemž časový rámec na vývoj a výrobu byly dva měsíce. Projekt byl mimo jiné zaměřen na odlitek levého vahadla zadní nápravy, který je vyráběn ze slitiny $AlSi7Mg0,3$. Silové zatížení vychází ze simulací dynamiky vozidla v softwaru Adams Car. Následně v programu ANSYS Workbench 18.1 byly provedeny strukturní analýzy pro jednotlivé zatěžovací stavy a tyto byly vstupem pro topologickou optimalizaci dle postupu zobrazeného na obrázku 4.8.



Obr. 4.8 Výpočtové work-flow řešeného systému

Na obrázku 4.9 je znázorněn vstupní model pro topologickou optimalizaci, tzv. pracovní prostor, ve kterém se optimalizovaný díl musí nacházet. Z tohoto prostoru bylo výpočtem odebráno na několik iterací 82 % materiálu. Následně byl v CAD finalizován výsledek topologické optimalizace a finálně validován FEM analýzou. Časová náročnost topologické optimalizace je v řádu několika dnů.

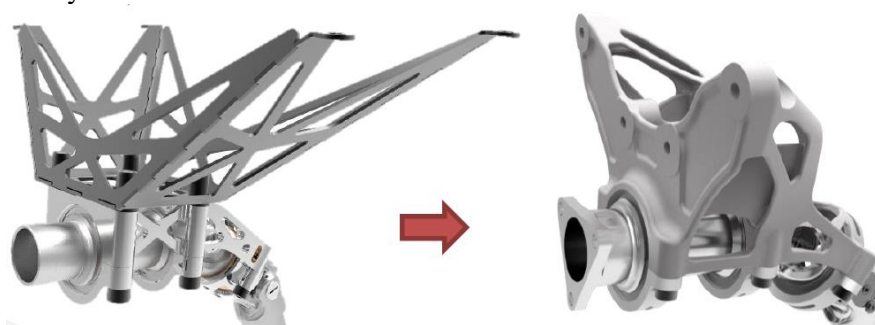


Obr. 4.9 Výpočtové work-flow řešeného systému [61]

Další příklad využití topologické optimalizace je uveden níže. Projekt se týkal vývoje a výroby držáku volantu, který byl v původní technologii vyráběn jako sestava ocelového svařence a hliníkového obrobku – obr 4.10 [62].

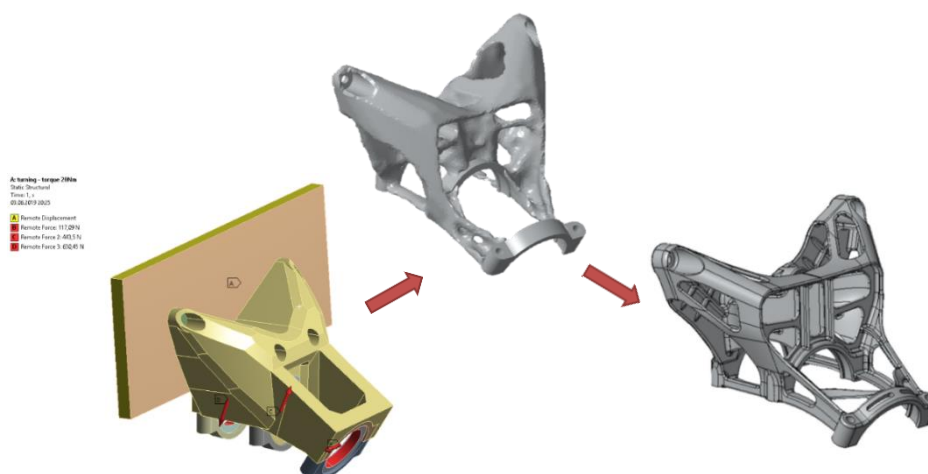
Mezi standardní požadavky na topologickou optimalizaci patří:

- snížení hmotnosti;
- zvýšení tuhosti;
- zkrácení výrobního času.



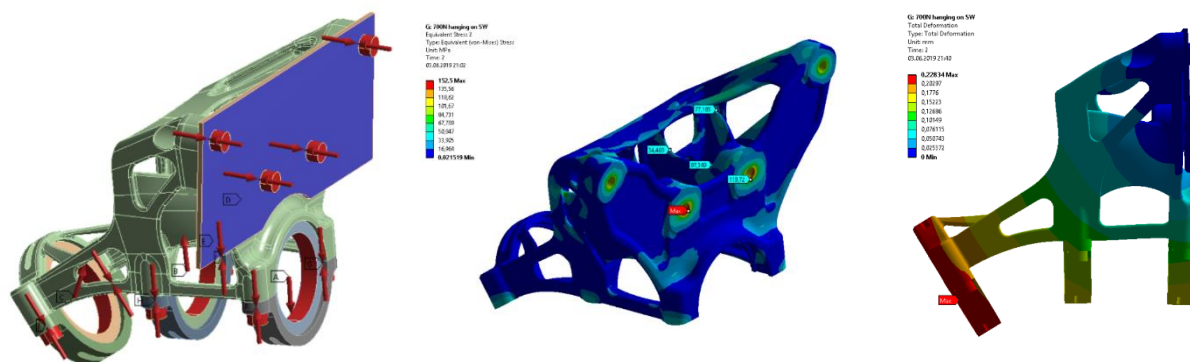
Obr. 4.10 Změna technologie výroby držáku volantu (svařenec → odlitek)

Na obrázku 4.11 je znázorněn vstupní model pro topologickou optimalizaci, tzv. pracovní prostor, ve kterém se optimalizovaný díl musí nacházet. Z tohoto prostoru je následně výpočtem odebrán materiál, v tomto případě až 70 %. Uprostřed je již výsledek topologické optimalizace a vpravo konečný CAD model.



Obr. 4.11 Kroky topologické optimalizace

Topologická optimalizace může z časového hlediska trvat až několik desítek hodin. Doba trvání se odvíjí podle požadavků na kvalitu optimalizace. Pro dosažení nejlepších výsledků je vhodné provést optimalizaci na několik iterací po malých úběrech materiálu. To znamená, že se výpočet několikrát opakuje s tím, že vstupem pro další výpočet je výsledek z předchozí optimalizace. V posledním kroku je zpracován finální CAD návrh a ten je podroben závěrečným FEM analýzám (obr. 4.12) pro finální ověření funkčnosti navrženého dílu.



Obr. 4.12 FEM analýzy zatížení držáku

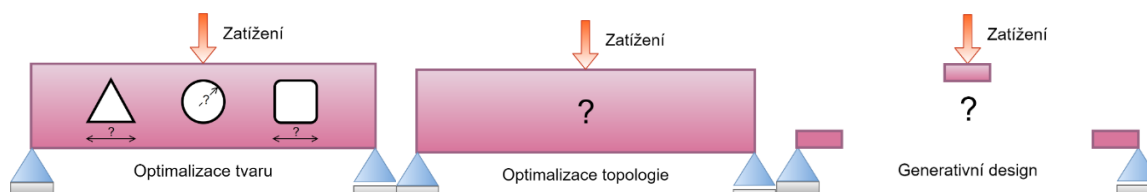
V této uvedené konkrétní studii se díky novému konceptu uchycení sloupku řízení podařilo snížit hmotnost o 164 g materiálu (o 50 %) a současně se tuhost držáku zvýšila o 47 %.

4.3 Generativní design

Pojem „generativní design“ (GD) se v současné době skloňuje v mnoha různých oblastech průmyslu, a to zejména ve strojírenství a stavebnictví, nicméně GD proniká i do elektrotechniky a dalších oborů. GD představuje odlišný přístup k tvorbě návrhu s využitím genetických algoritmů, uvedených v [63], pomocí nichž je možné získat optimalizované výsledky s vysokou pravděpodobností splňující zadané požadavky, kterých by mnohdy bylo velmi obtížné, ne-li nemožné, dosáhnout klasickým „manuálním“ procesem návrhu. V případě strojírenství se může jednat např. o snížení počtu použitých komponent, tuhost nebo hmotnost, u stavebnictví např. o využití prostoru, množství denního světla nebo šíření zvuku v místnostech. Výstupy z generativního designu mohou zároveň splňovat i vysoké estetické nároky. Dle [64] je GD technologie, která na základě mnoha různých specifických vstupů (max./min. rozměry, hmotnost, materiál, výrobní metoda, cena výroby atd.) a požadovaných výstupů umí vytvořit a vyhodnotit tisíce různých variant návrhů, z nichž pak může konstruktér/designér vybrat pro něj nejvhodnější alternativy. Generování takto velkého množství variant návrhů je možné díky poměrně masivnímu rozšiřování cloudových systémů, kde uživatel nemusí pro výpočet využívat vlastní pracovní stanici, ale používá „neomezený“ výkon cloudu. Snadná orientace uživatele ve výsledcích a výběr nejvhodnějších variant je pak zajištěna pomocí robustních filtrovacích nástrojů.

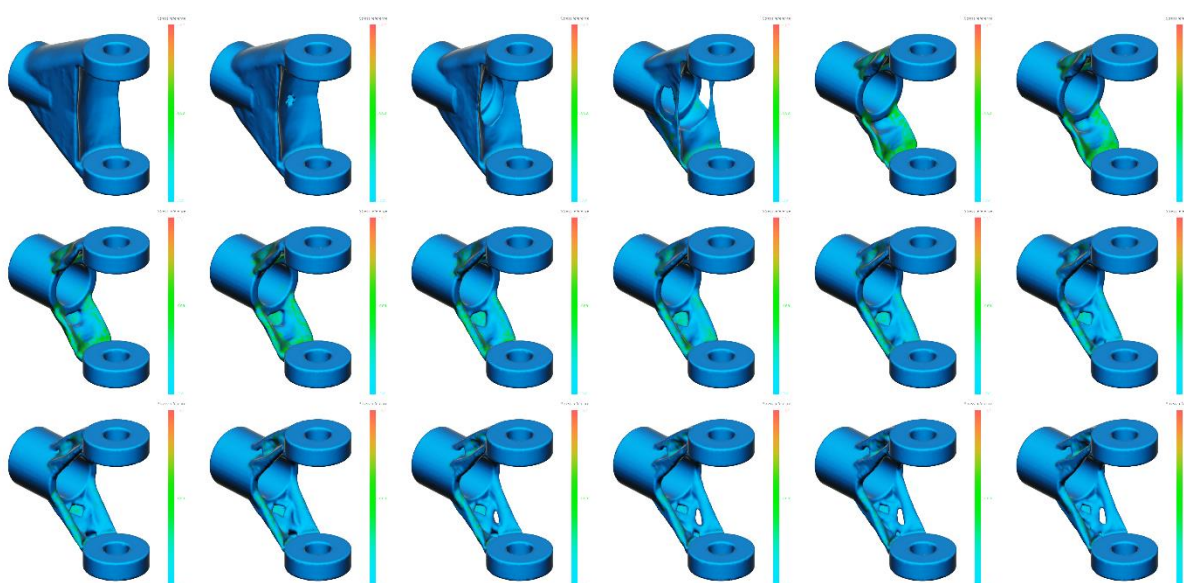
Na rozdíl od topologické optimalizace, kde je návrhová oblast přesně definována a řeší se tvar uvnitř této oblasti, není nutné, aby mezi vstupními parametry pro generativní navrhování nutně figurovala i počáteční geometrie modelu. V kontextu strojírenských součástí musí být přítomny pouze „připojovací“ oblasti, popř. oblasti, kterým se má návrh vyhnout. Zároveň je ale možné,

aby počáteční geometrie tělesa byla definována. Topologická optimalizace je tedy součástí generativního designu, i když se často stává, že jsou oba pojmy zaměňovány. Srovnání oblastí návrhu generativního designu s topologickou optimalizací, doplněné o optimalizaci tvaru, při které se topologie zachovává, je vidět na obr. 4.13. Je patrné, že směrem od optimalizace tvaru ke generativnímu designu postupně „mizí“ přesná počáteční specifikace optimalizované/vytvářené geometrie. Na druhou stranu i u generativního designu je možné poměrně přesně stanovit hranice, ve kterých se má finální geometrie nacházet.



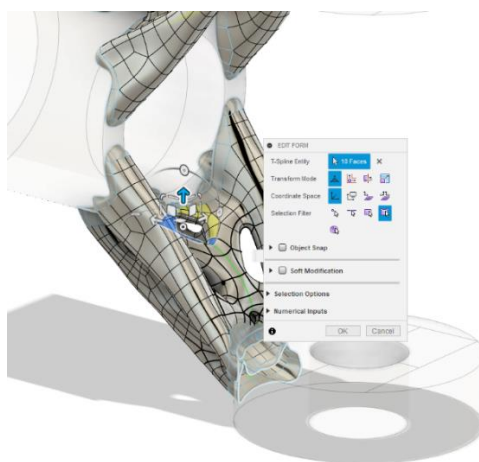
Obr. 4.13 Optimalizační schémata [65]

Při tradičním procesu návrhu musí inženýr přímo tvořit požadovanou geometrii, přičemž vychází ze zkušeností s předchozími návrhy a s požadavky danými budoucím využitím výrobku, použitým materiálem, plánovanou metodou výroby apod. Každá varianta návrhu poté musí být vyhodnocena a v případě, že jsou zjištěny nedostatky, je nutné provést korekce návrhu. Celý proces se poté opakuje až do doby, kdy je výrobek shledán způsobilým k uvolnění do výroby. V závislosti na složitosti výrobku se může jednat o mnoho desítek hodin práce. Oproti tomu u generativního navrhování specifikuje konstruktér počáteční podmínky a omezení a GD následně s využitím evolučních algoritmů automaticky provede vyhodnocení mnoha desítek až tisíc variant, aby našel nejlepší řešení. V každém kroku je návrh testován, zda splňuje zadaná kritéria a na základě výsledků testů jsou v dalším kroku aplikovány změny tak, aby bylo dosaženo optimalizovaného finálního stavu splňujícího požadovaná kritéria. Ukázka jednotlivých iterací návrhu se zobrazením výsledků pevnostní analýzy je na 4.14. Ve srovnání s tradičními postupy tak generativní design umí vytvořit řádově větší počet variant návrhů za zlomek času.



Obr. 4.14 Průběžná vyhodnocení jednotlivých iterací návrhů GD [65]

Všechny návrhové problémy jsou inherentně vícerozměrné, přičemž jejich řešení musí splňovat množství požadavků, často vzájemně protichůdných. Generativní design pro jejich řešení využívá umělou inteligenci ve formě metaheuristických, resp. vyhledávacích algoritmů, které jsou pro tuto činnost vhodnější než umělé neuronové sítě, které se nejprve potřebují naučit, jak zkoumaný model funguje. Algoritmus generativního designu naopak nemusí vědět, jak zkoumaný model funguje, ale umí se naučit, jak s daným modelem pracovat. Specifickým typem vyhledávacích algoritmů, které se v generativním designu uplatní, jsou evoluční/genetické algoritmy inspirované se v Darwinově evoluční teorii. Pomocí výběru nevhodnějších kandidátů, křížení a mutací je tak opakovaně hledán nejvhodnější kandidát splňující vstupní požadavky na návrh. Jak je patrné z obrázku 4.14, tělesa vytvořená generativním navrhováním mají ve většině případů nepravidelné, organické tvary, které mohou být doplněné o exaktně definovanou geometrii vyplývající z počátečních omezujících podmínek. Toto s sebou nese již zmiňované výhody např. v podobě optimalizované hmotnosti, tuhosti nebo netradičního vzhledu. Na druhou stranu mohou vznikat problémy spojené s potřebou dalšího využití modelu pro simulace nebo nutnosti přidání dalších geometrických prvků. Marinov a kol. [66] proto představili řešení, které výrazně usnadňuje manipulaci s výstupy generativního designu až do té míry, že kompletně odpadají manuální postupy spojené s převodem tvaru generovaného tělesa na hraniční reprezentaci (B-rep), které by tak vedly k dalšímu prodloužení fáze návrhu. Při tomto procesu jsou organické části geometrie parametrizovány a aproximovány pomocí T-NURCC ploch, jejichž hranice jsou následně protaženy do původních „připojovacích“ těles, a výsledkem je jediná uzavřená hraniční reprezentace objemového tělesa. Díky parametrizaci lze organický tvar modelu kdykoliv dodatečně upravit – obr. 4.15.



Obr. 4.15 Editovatelný výstup z GD v programu Fusion 360 [65]

S organickým tvarem tělesa mohou být spojena i určitá výrobní specifika. Pokud nejsou počáteční podmínky výroby specifikovány, jeví se jako nejvhodnější výrobní postupy aditivní metody výroby. Aditivní výroba není omezena tvarovou složitostí a je tedy možné dosáhnout nejvhodnějších návrhů z hlediska minimální hmotnosti. Pro tento druh výroby lze zohledňovat např. směr nanášení vrstev materiálu, případně další parametry 3D tisku. Nástroje generativního designu rovněž umožňují definovat i konvenčnější metody výroby, jako např. frézování nebo řezání, samozřejmě se zahrnutím velikosti nástrojů. Mezi vstupními podmínkami pro generativní design lze nyní nalézt technologii odlévání do kovové formy, které zohledňuje minimální tloušťku stěny, směr vytažení z kovové formy a velikost úkosu. Při nastavení

podmínek na obráběcí metody nebo tlakové lití mohou být generovány konvenčnější tvary návrhů, které určitým způsobem zohledňují technologičnost konstrukce. Ze současných slévárenských metod tomuto způsobu návrhu součástí nejvíce vyhovují tzv. IC hybridní technologie, které výrobu netrvalého modelu řeší 3D tiskem.

4.4 Co-design a virtuální výroba

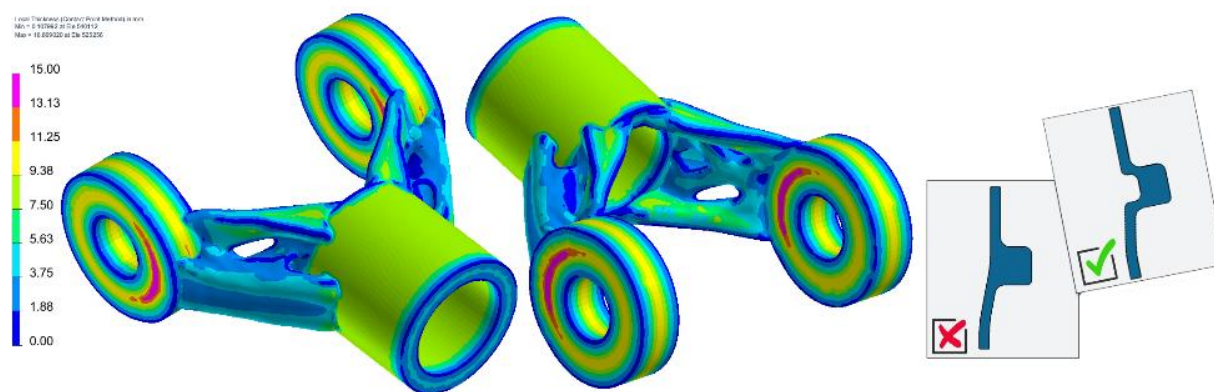
Nejen konstruktér, ale i technolog má k dispozici počítačovou podporu, která mu umožňuje pracovat s virtuálním modelem. Velkou výhodou GD je, že si uživatel může zvolit libovolný exportní formát (*.igs, *.stp, *.stl ad.), který mu umožní přímé testování zasláního návrhu, případně přímý 3D tisk modelu. Následně lze využít speciální moduly, jako je například modul Co-design implementovaný do prostředí VisualCAST [67].

Modul Co-design je nástroj pro posouzení konstrukce součásti z pohledu vyrobiteľnosti technologií lití. Použití sestává ze tří základních kroků:

- posouzení geometrie součásti;
- simulace tuhnutí;
- analýza výsledků.

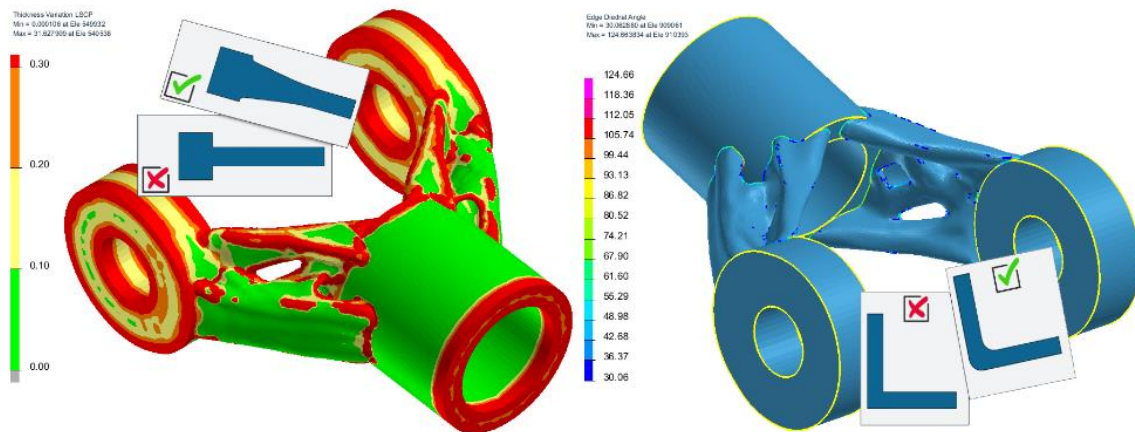
Posouzení geometrie součásti

Navržené konstrukce součásti z GD neberou ve většině případů v potaz její technologičnost výroby. Je třeba součást analyzovat z pohledu její vyrobiteľnosti, což řeší např. ESI Group pomocí modulu nazvaného Co-Design [67]. Tento modul má možnost provést analýzu tloušťky stěny součásti (obr 4.16), na jejímž základě lze rozhodnout o konstrukční změně, případně o umístění zářezů a dalších technologických prvků.



Obr. 4.16 Zobrazení lokálních tloušťek návrhu

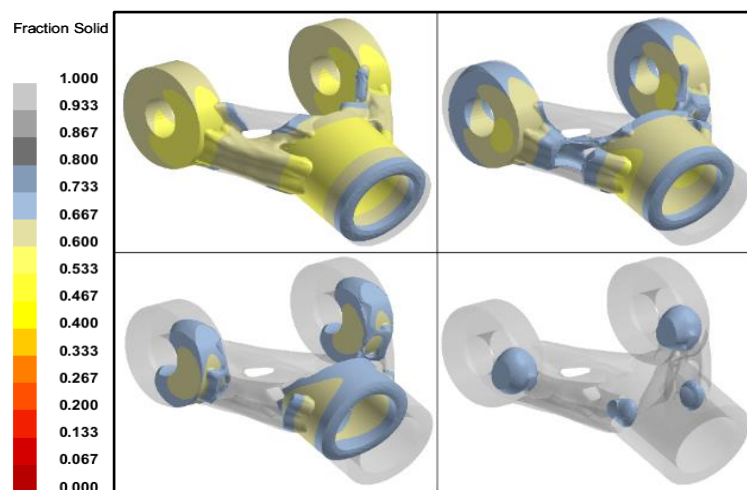
Dále je možné provést analýzu přechodů stěn nebo ostroty úhlů a zvolených rádií, kdy všechny tyto vlivy mohou při výrobě vést ke tvorbě tepelných uzlů, případně ke vzniku trhlin a prasklin (obr. 4.17). Na základě měření zkosení vůči dané ose v rámci souřadného systému lze rozhodnout o vhodnosti volby dělicí roviny. To se však netýká přesného lití, tj. výrobní technologie zvolené v této studii.



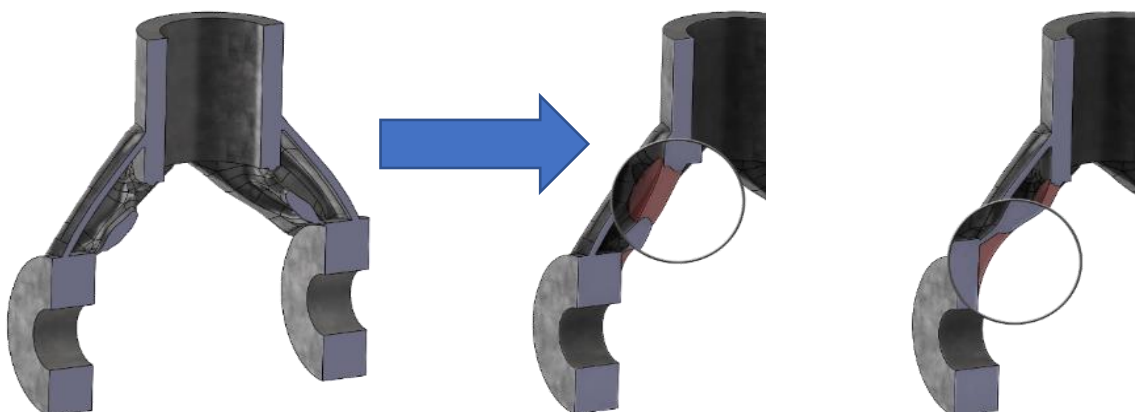
Obr. 4.17 Analýza přechodu stěn

Virtuální výroba

Dalším krokem po Co-designu je modelování virtuální výroby pomocí numerické simulace tuhnutí. Jedná se o určité zjednodušení, které opomíjí fázi plnění, nicméně výsledky dávají naprosto dostačující představu o charakteru tuhnutí a formaci tepelných uzlů – obr. 4.18, tak aby mohl být případně učiněn zásah do konstrukční úpravy součásti – obr. 4.19.

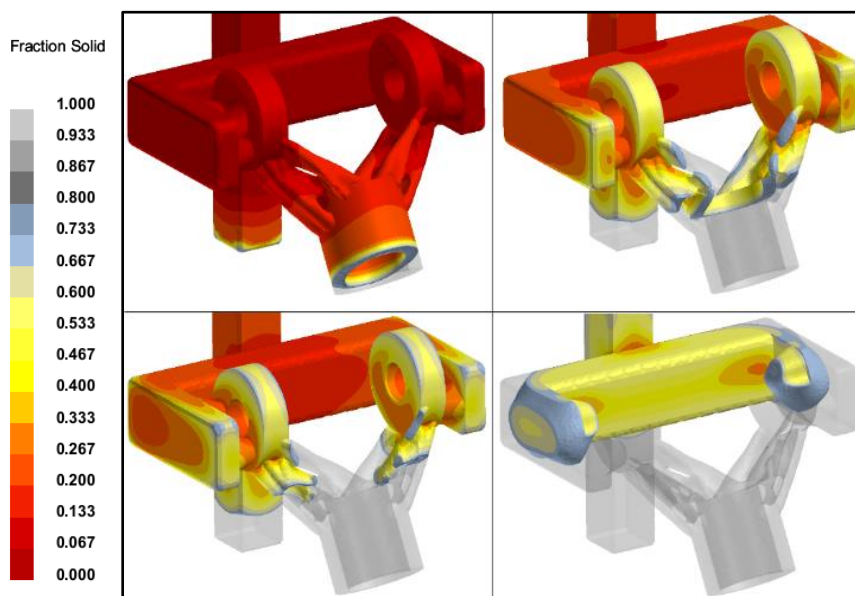


Obr. 4.18 Analýza tepelných uzlů



Obr. 4.19 Geometrická úprava modelu

Finální návrh technologie je následně ověřen simulací celého procesu zahrnující všechny fáze výroby odlitku. V tomto případě technologii IC včetně předehřevu skořepiny, chladnutí na vzduchu, odlévání a přesunu a tuhnutí odlitku ve skořepině – obr. 4.20.



Obr. 4.20 Postup fronty tuhnutí pro optimalizovaný tvar součásti

5. TEKUTOST A ZABÍHAVOST KOVŮ VE VZTAHU K TENKOSTĚNNÝM ODLITKŮM V TECHNOLOGII INVESTMENT CASTING

Aby bylo možné zkoumat výrobu tenkostěnných odlitků ve fázích plnění dutiny formy, je důležité porozumět mechanismu tekutosti a zabíhavosti kovu. Tekutost kovu φ je fyzikálně-chemickou veličinou odlévané slitiny a definuje se jako reciproční hodnota dynamické viskozity η – rovnice 5.1.

$$\varphi = \frac{1}{\eta} [\text{N}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^2] \quad (5.1)$$

Kde:

η dynamická viskozita $[\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}]$

Tekutost je všeobecně určena rychlostí, jíž se látka deformuje působením vnějších statických sil. Nad tavicí teplotou je tekutost dostatečně velká (přetvárný odpor nízký), takže kov mění svůj tvar podle formy, do které je odléván a vyplňuje ji určitou rychlostí (gravitační lití). Na zrychlení toku je možné při odlévání působit i jinými silami, např. odstředivou silou, tlakem pístu při tlakovém lití, případně podtlakem při vakuovém lití [68]. Tekutost taveniny je tím větší, čím je lící teplota výše nad tavicí teplotou daného kovu. Na tekutost kovů a slitin mají zásadní vliv:

- viskozita taveniny;
- povrchové napětí taveniny;
- povrchová a vnitřní čistota taveniny (blány, filmy + inkluze v tavenině);
- ostatní fyzikální vlastnosti slitiny.

Zabíhavost je technologickou vlastností a je definována jako schopnost roztaveného kovu vyplnit dutinu formy [52]. Zabíhavost má pro slévářenskou praxi mnohem větší význam než tekutost, která nebere v úvahu otázku vlivu prostředí, do kterého se odlévá.

Zabíhavost lze tedy označit jako soubor technologických vlastností a je závislá na řadě činitelů, mezi které patří:

- materiál taveniny (chemické složení, viskozita, „čistota“ kovu – oxidy, povrchové napětí, tepelné vlastnosti taveniny, charakter krystalizace);
- materiál formy (tepelné vlastnosti, drsnost, smáčivost, plynotvornost, prodyšnost formy atd.);
- podmínky plnění (teploty kovu (přehřátí) a formy, dynamický a metalostatický tlak taveniny);
- tvar odlitku (geometrie vtokové soustavy, tvar dutiny formy a její tvarová složitost, tloušťka stěn odlitků).

Zabíhavost má dynamický charakter a je spojena se silovým působením na taveninu. K zaplnění dutiny formy je nutné, aby silové působení taveniny bylo větší než odpory, které jsou kovu kladeny ve styku s formou – obr. 5.1. Silové působení a odpory se během plnění mění. V případě, že odpory v některých částech formy převažují nad silovým působením, pak kov přestává téci a v tenkých stěnách dochází ke vzniku slévářenských vad typu nezaběhnutí (non-fill), studené spoje (cold-shut) nebo zavaleniny (mis-run) – obr. 5.2.



Obr. 5.1 Schematické znázornění silového působení při proudění taveniny v keramické formě



Obr. 5.2 Vady odlitku spojené se zabíhavostí taveniny [69], [70], [71]

Zabíhavost v kanálu s přibližně konstantní rychlostí vytékání taveniny byla Flemingem v roce 1962 [72] vyjádřena vztahem (5.2):

$$L = v \times \tau \text{ [m]} \quad (5.2)$$

Kde:

- v rychlost proudění kovu v daném kanále [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
 τ čas, v němž si tavenina udržuje schopnost proudit – čas tuhnutí [s]

Rychlost vytékání proudu kovu je rovna rovnici (5.3):

$$v = \sqrt{\frac{2gH}{1+\sum \xi i}} \text{ [m/s]} \quad (5.3)$$

- H tlaková výška odpovídající hydrostatickému tlaku [m]
 ξ součinitel hydraulických odporů [–]

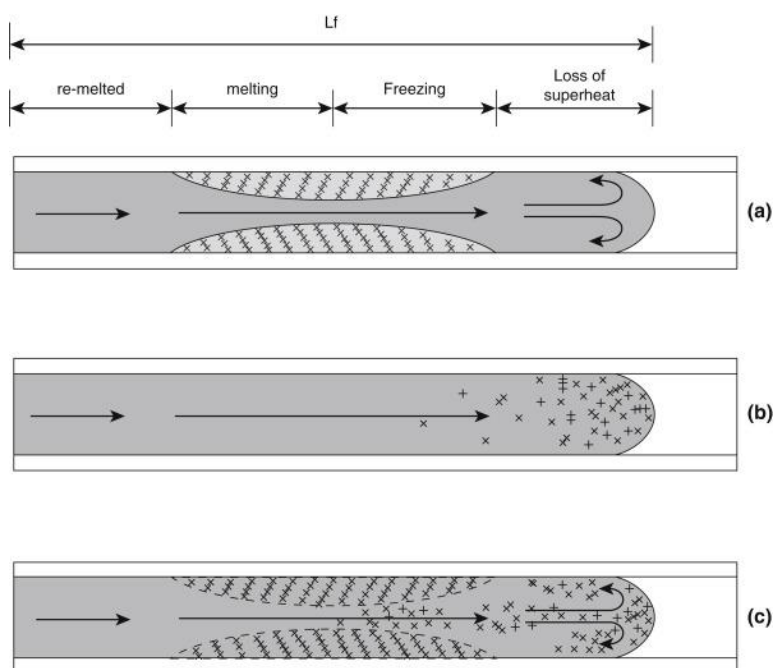
Tento vztah byl původně sestaven a validován pro čisté kovy, případně slitiny s eutektickým složením. Campbell [73] na základě výzkumu Fleminga demonstruje rozdílnou zabíhavost pro čisté a eutektické slitiny a slitiny s širokým dvoufázovým pásmem. Rozdílná zabíhavost je dána

rozdílným typem tuhnutí při proudění taveniny, kdy u čistých kovů hovoří o povrchovém způsobu (za)tuhnutí („skin freezing“) a u kovů se širším dvoufázovým pásmem o krátce kašovitém za(tuhnutí) („pasty freezing for short“). Rozdíl ve způsobu „zamrznutí (ztuhnutí) taveniny“ pro jednotlivé typy materiálů je demonstrován na obr. 5.3.

Dle výzkumů Flemingse [68] je odhadováno, že při určitém % tuhé fáze v tavenině dojde k zastavení proudu kovu. Odhad byl velmi široký v rozmezí 20–50 % tuhé fáze v závislosti na druhu slitiny a tlakové výšce. Studie obsahují vliv turbulentního proudění na růst a charakter růstu dendritů (dendritické sítě) v tavenině během proudění. Na základě zkoumání Campbell uvádí upravenou rovnici (5.4) pro délku zaproudění v kanálech, která koeficientem zohledňuje, že slitiny se širokým pásmem tuhnutí mají až o polovinu kratší délku zaproudění oproti slitinám s tzv. povrchovým (exogenním) způsobem tuhnutí.

$$L = 0,2v \times \tau \text{ (až) } 0,5v \times \tau \quad (5.4)$$

Kde v a τ jsou opět výrazy pro rychlost a dobu proudění taveniny v kanálech, jako tomu bylo v rovnici (5.2).



Obr. 5.3 Schéma „zamrznutí“ proudu kovu [73]

- a) pro čisté a eutektické kovy
- b) pro kovy se širokým pásmem tuhnutí
- c) nový model dle Campbella pro kovy se širokým pásmem tuhnutí

Literatura [73], [74] uvádí, že zabíhavost je třeba u tenkostěnných odlitků zohledňovat ze dvou pohledů. Prvním aspektem je schopnost proudit (**flowability**) a druhým aspektem schopnost vyplnit (**fillability**). Ve slévárenské praxi je flowability dynamickým kritériem a obvykle závisí na vlastnostech taveniny a podmínkách přenosu tepla do formy. Schopnost vyplnit prostor je naproti tomu statickým kritériem a závisí na povrchovém napětí mezi proudící kapalinou a přilehlým materiálem formy [75]. Flowability omezuje zabíhavost, když kov předčasně tuhne v důsledku odvodu tepla do formy, zatímco fillability omezuje zabíhavost, když roztavený kov

nemůže dosáhnout jemných detailů formy kvůli nízkému hydrostatickému tlaku, který je nutný pro překonání povrchového napětí.

Syn a kol. [76] předkládá analytické vyjádření zabíhavosti pro Al slitiny, založené na původní práci Flemingse [72]. Tato rovnice (5.5) lze využít i pro systém kov/skořepina pro deskovitý tvar zkušební tělesa, a to ve tvaru:

$$L_f = \frac{\rho V_0 t (k H_f + C_p T_s)}{2h (T_C - T_M)} \left[1 + \frac{h}{2} \left(\frac{\pi \Delta X}{V_0 C_p k' \rho'} \right)^2 \right] [\text{m}] \quad (5.5)$$

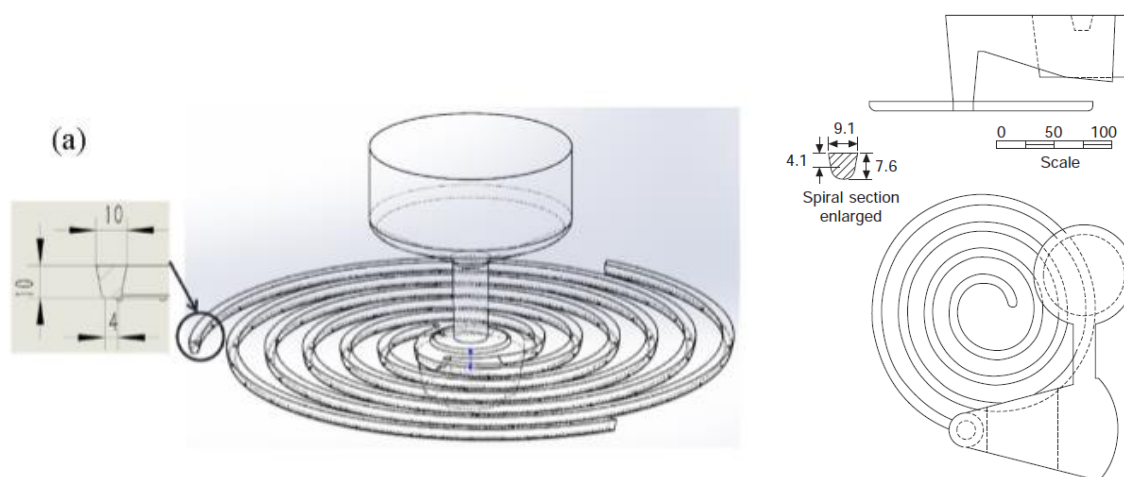
Kde:

ρ	<i>hustota taveniny</i> [kg . m ⁻³]
t	<i>tloušťka stěny</i> [m]
V_0	<i>rychlost taveniny na vstupu do sekce</i> [m . s ⁻¹]
k	<i>podíl tuhé fáze</i> [–]
H_f	<i>entalpie tavení (latentní teplo)</i> [J . kg ⁻¹]
C_p	<i>měrná tepelná kapacita taveniny</i> [J . kg ⁻¹ . K ⁻¹]
T_s	<i>přehřátí taveniny (T_C – T_L)</i> [K]
h	<i>koeficient přestupu tepla na rozhraní kov/forma</i> [–]
T_M	<i>počáteční teplota formy</i> [K]
T_C	<i>teplota taveniny</i> [K]
ΔX	<i>délka zóny tuhnutí</i> [m]
$'$	<i>index označuje termofyzikální vlastnosti pro formu</i>

Rovnice (5.5) uvádí, že zabíhavost je funkcí vlastností kovu a formy (skořepiny). Zabíhavost je také přímo úměrná tloušťce stěny odlitku a součiniteli přestupu tepla. Zvýšení tepelného obsahu slitiny současně se zlepšením izolace formy zvyšuje schopnost proudit (flowability). Je důležité poznamenat, že rovnice popisuje pouze délku zaběhnutí, tj. schopnost proudit, a nepokrývá parametry související se schopností vyplňovat tenké průřezy a malé prvky, rádce, tj. fillability, která je závislá na povrchovém napětí. Capadona [77] uvádí, že tloušťka průřezu (stěny) 1,0 mm je prahová hodnota (gravitačního odlévání u slitin hliníku), kdy se dominantně uplatňuje schopnost vyplnit prostory (fillability). Tyto kritické/prahové hodnoty se v jednotlivých literaturách liší. Tloušťku průřezu 2,5 mm uvádí M. C. Flemings [78] jako limit, pod kterým je povrchové napětí velmi důležité. S ohledem na variabilitu všech možných systémů nelze říci, co je přesný limit, ale je jisté, že s klesající tloušťkou stěn odlitků význam povrchového napětí významně stoupá.

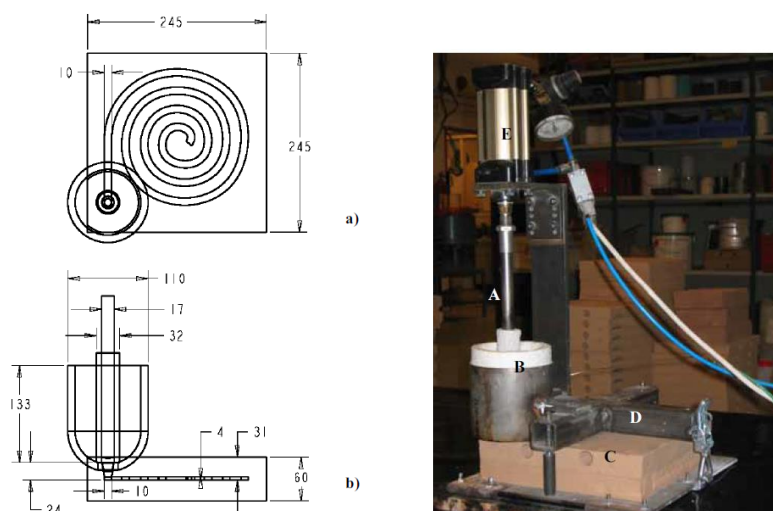
5.1 Zkoušky zabíhavosti

V průběhu posledních desetiletí bylo provedeno mnoho výzkumných prací na téma zabíhavosti pro různé slitiny a byla navržena řada zkušebních těles a forem na její testování. Většinou se jedná o zkušební modely ve tvaru spirály (Curryho spirála – obr. 5.4) s řadou modifikací (obr. 5.5), případně modely ve tvaru pásků a desek obdélníkového průřezu (obr. 5.6), anebo testy založené na nasávání taveniny pomocí vakua (obr. 5.6). Rozdělení testů na provozní a laboratorní a jejich určité porovnání provedl již Flemings v roce 1964 [72] s revizí v roce 1987. Testy prováděné na spirálové zkušence se od sebe liší způsobem odlévání, změnou tlakové výšky a změnou geometrie průřezu lícího kanálu. Široká škála typů jednotlivých modelů a forem a citlivost zabíhavosti na jednotlivé lící parametry brání zavedení jednoho testu, který by byl jednotný a umožnil širší porovnání jednotlivých prací mezi sebou.



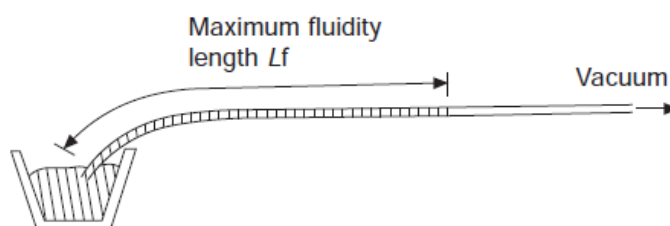
Obr. 5.4 Příklady spirálových testů zabíhavosti [79]

Řada autorů, jako např. Sabatino [80], používá pro eliminaci vlivů způsobu plnění lící nálevky se zátkou (stopper) – obr. 5.4, kde je zaručen konstantní způsob odlévání, průtok v čase a tlaková výška pro zkoumání vlivů jednotlivých parametrů na zabíhavost Al slitin.



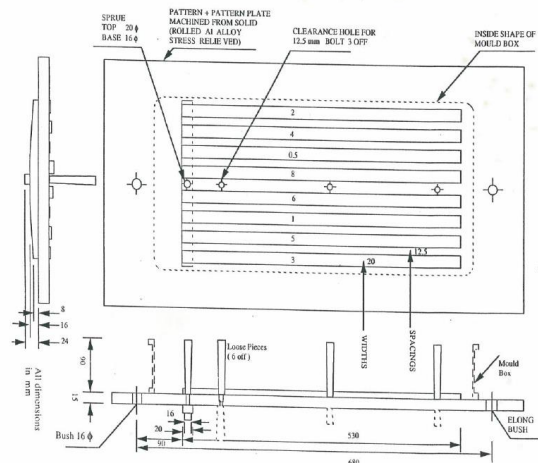
Obr. 5.5 Inovované použití nálevky se zátkovou tyčí [80]

Pro laboratorní testování jsou používány testy s keramickou nebo skleněnou trubičkou, do které je roztavený kov nasáván pomocí vakua [73]. Zde je rovněž měřena maximální délka zaběhnutí L_f .



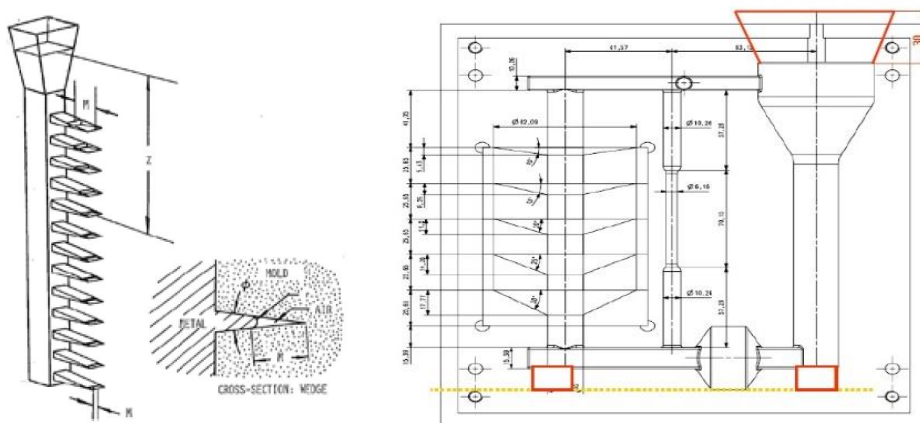
Obr. 5.6 Zkouška zabíhavosti s pomocí nasávání taveniny [73]

Část autorů použila ve svých výzkumech zabíhavosti Al slitin různé testy s pomocí přímých kanálů deskovitého tvaru, které v angličtině nazývají jednotným názvem „strip test“. Jak je naznačeno na obr. 5.7, tak Adefuye [81] používá destičky různých tloušťek, na kterých vyhodnocuje délku zaproudění. Obdobu zkoušky využil Myška ve své práci [82].



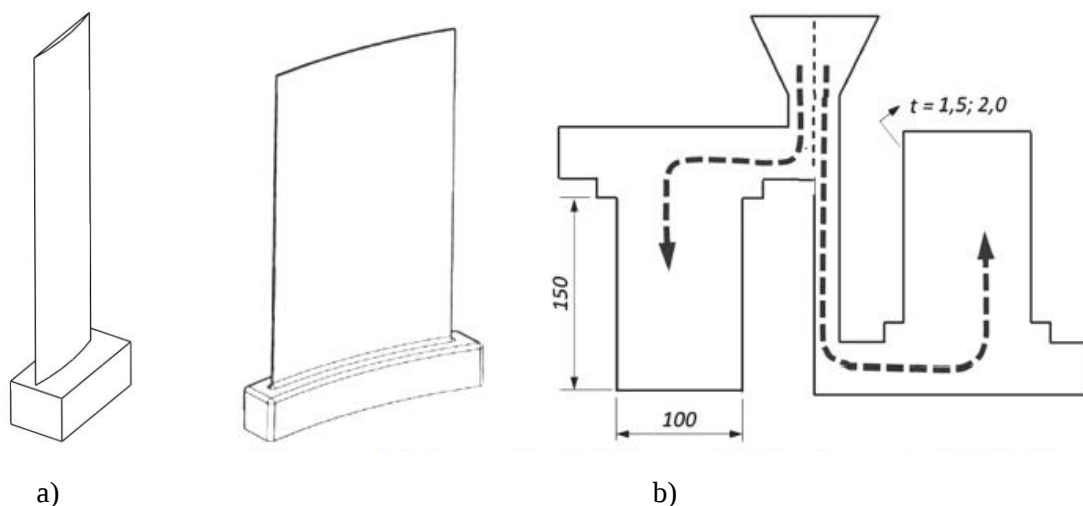
Obr. 5.7 „Strip test“ zabíhavosti dle [81]

Výše uvedené zkoušky spíše posuzují schopnost taveniny proudit, tj. flowability. Pro účely zjištění schopnosti vyplnit jemné dutiny, tj. fillability, se zejména v technologii IC používají testy uvedené na obrázku 5.8. U těchto typů zkoušek je sledována vzdálenost nezaplněné části geometrie, případně úhly, nebo rádie na čele taveniny. Tělesa mohou mít tvar klínů, případně rotačních prstenců s proměnlivou změnou úhlu tenké části, jak je popisováno např. ve výzkumných pracích [74], [83].



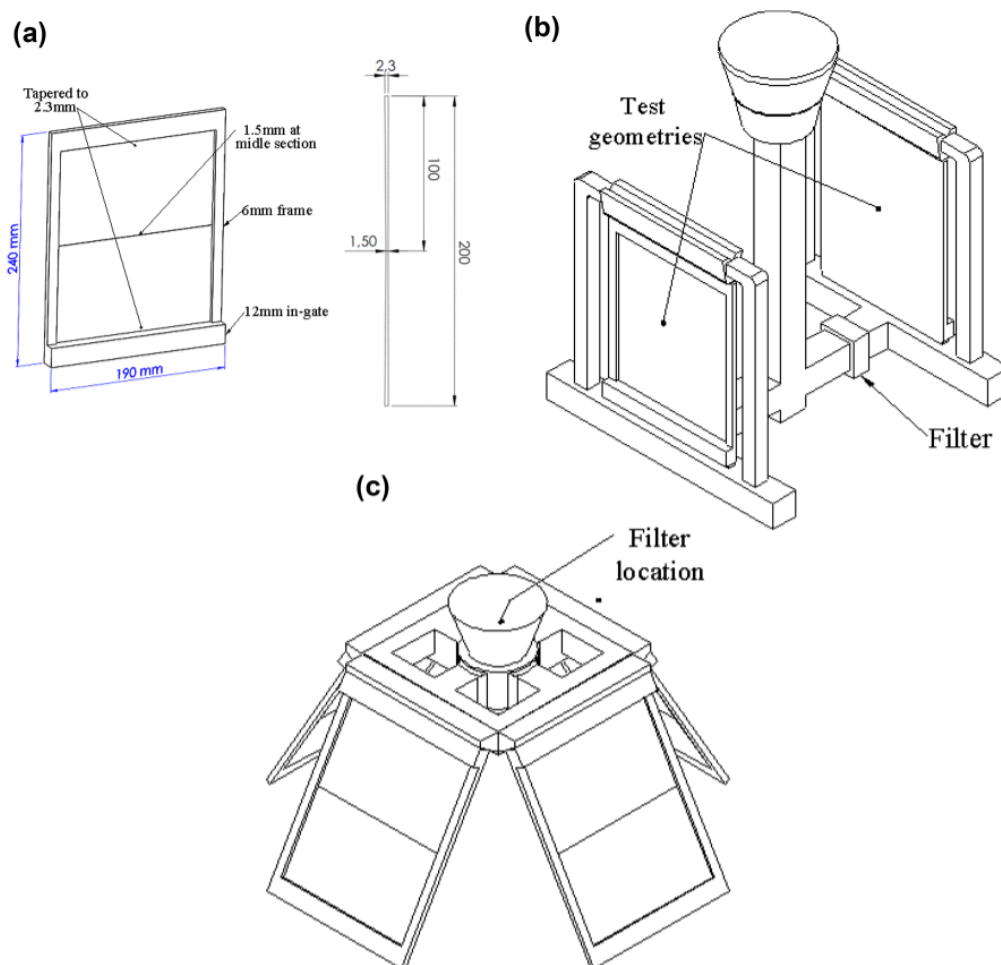
Obr. 5.8 Zkoušky zabíhavosti zaměřené na „fillability“ [74], [83]

V leteckém průmyslu se využívají geometrické tvary korespondující s finálním tvarem odlitku. Jedná se například o geometrii turbínové lopatky, na které test spojuje jak schopnost kovu proudit, tak rovněž vyplnit jednotlivé malé prostory. Na obr. 5.9 a) je znázorněna geometrie, u které středová silnější část vyhodnocuje schopnost vyplnit dutinu a vnější části s téměř nulovým rádiem jsou využity k porovnání schopnosti vyplnit dutinu pro změnu licích parametrů.



Obr. 5.9 Geometrie zaměřené na zkoumání zabíhavosti pro výrobce lopatek (letecký průmysl)
 a) tvar tělesa lopatky [84]
 b) konstantní průřez lopatky s naznačením vtokového systému [85]

Obr. 5.9 b) znázorňuje jiný přístup ke tvaru lopatky a využívá konstantní tloušťku a reprezentuje vliv vtokového systému a pozice odlitku při odlévání. Vyhodnocován je procentuální podíl zaplněné plochy odlitku.



Obr. 5.10 Testovací těleso pro tenkostěnné odlitky v technologii IC [86]

Raza [86] ve své studii představil deskovitý tvar zkušební tělesa pro technologii IC. Těleso má proměnnou tloušťku stěny po výšce – obr. 5.10. Testovány jsou různé typy vtokových systémů se zaústěným vtokem ze spodní i vrchní části. Existuje ještě řada dalších zkušebních těles ve tvaru kruhových tyčinek, licích harf a dalších, které jsou používány pro určitá srovnání zabíhavosti.

Pro účely studia zabíhavosti Al slitin u technologie IC bylo v této práci navrženo a ověřeno zkušební těleso – kapitola 5.2.3, které si klade za cíl zachytit vlivy spojené se schopností taveniny jak proudit, tak vyplnit detaily. Konstrukčně je zpracováno tak, aby zajistilo maximální opakovatelnost měření a eliminovalo vlivy, které přináší jiné zkoušky ve spojení s nedodržením vstupních parametrů, jako je rychlost proudění, tlaková výška a turbulence kovu.

5.2 Parametry ovlivňující zabíhavost v technologii IC

V technologii IC se několik autorů věnuje zabíhavosti systému proces/kov/skořepina [85], [71], [38]. Capadonův přehled zabíhavosti [77] popisuje vliv různých slévárenských parametrů na zabíhavost kovů. Potvrzuje, že zvýšení teploty přehřátí, teploty formy nebo tlakové licí výšky zvyšuje zabíhavost. Dokládá, že složení slitiny má rovněž vliv na tekutost taveniny. Mezi důležitými parametry zmiňuje také průtok taveniny a prodyšnosti skořepin.

Existují také další možnosti, které mohou zlepšit zabíhavost. Vakuové lití je jednou z metod, která se v moderní IC technologii běžně používá a byla prokázána jako účinná vzhledem k zabíhavosti již v roce 1963 [87]. Vakuum odstraňuje odpor vzduchu, který je kladen proudící tavenině. Tato metoda se úspěšně používá i pro gravitační lití s nasáváním – viz kapitola 5.3.3. Vibrace je další metoda, která byla testována na superslitinách v technologii IC [84], [71] a která za určitých podmínek může zvyšovat zabíhavost. Různé materiálové skladby keramických skořepin rovněž ovlivňují tekutost, jak bylo zkoumáno v [88], kde systém z taveného křemene (fused silica) dosahoval lepší zabíhavosti než systém zirkon-alumino-silikát.

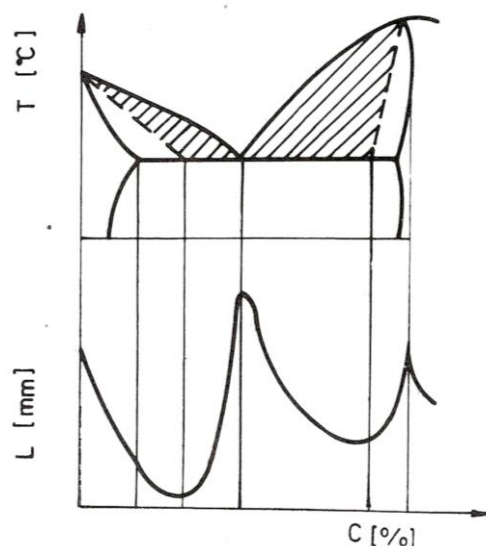
V dalších kapitolách bude rozebrán vliv nejdůležitějších parametrů a vlastností, které ovlivňují zabíhavost v technologii odlévání na vytavitelný model (IC technologie) se zaměřením na odlévání hliníkových slitin.

5.2.1 Odlévaný materiál – AlSi slitiny

Odlévaný materiál svými chemickými a termofyzikálními vlastnostmi ovlivňuje i technologické vlastnosti, mezi něž patří i zabíhavost. Chemické složení, viskozita a latentní teplo jsou faktory ovlivňující chování slitiny ve vztahu k proudění.

a) Vliv chemického složení slitiny

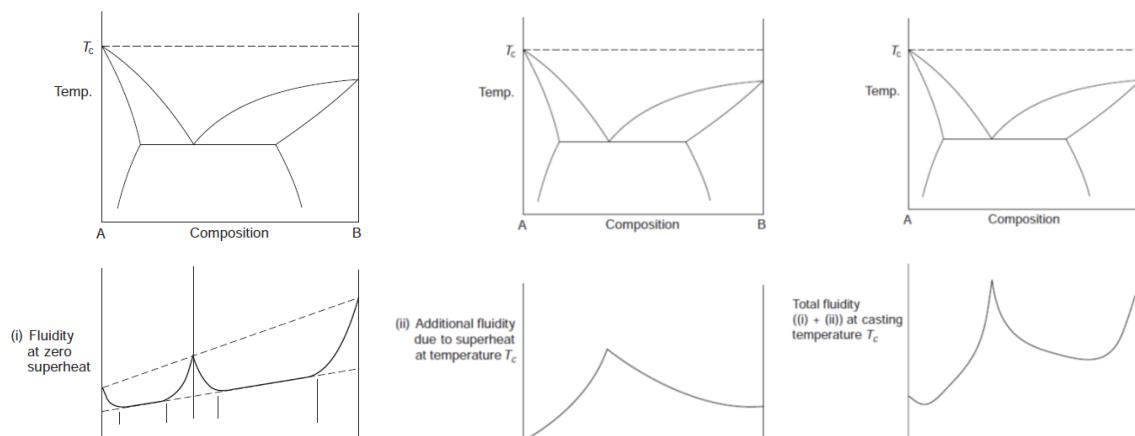
Na základě teoretických rozborů byla sestrojena schémata smluvní zabíhavosti L (konstantní teplota přehřátí) podle charakteru fázového diagramu – obr. 5.11. Z diagramu vyplývá, že nejvyšší zabíhavost mají eutektické slitiny a čisté kovy krystalizující při konstantních teplotách. Se zvyšující se šířkou dvoufázového pásma se zabíhavost slitin snižuje.



Obr. 5.11 Diagram AlSi a vyjádření smluvní zabíhavosti [89]

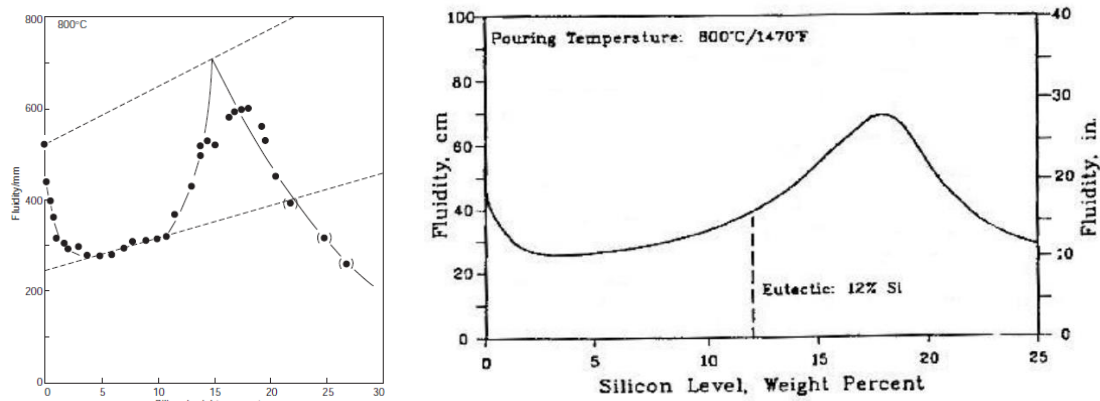
Minimální zabíhavost nebyla zjištěna při koncentracích, kde interval tuhnutí dosahoval největších hodnot, ale v bodě protínání čáry nulové tekutosti (čárkovaná čára v diagramu) s teplotou eutektické přeměny. Rozdíl tekutosti v těchto dvou bodech není velký. Faktický významný vliv na tekutost těchto slitin má oblast mezi likvidem a teplotou nulové tekutosti – šrafovaná oblast.

Campbell [73] uvádí rozdělení zabíhavosti v binárním diagramu s eutektickou přeměnou pro konstantní přehřátí, konstantní teplotu a součtovou zabíhavost (zjednodušené) – obr. 5.12. V této práci prezentuje rozdíl zabíhavosti dle chemického složení a charakteru tuhnutí.



Obr. 5.12 Teoretické vyjádření zabíhavosti pro binární AlSi dle [89]

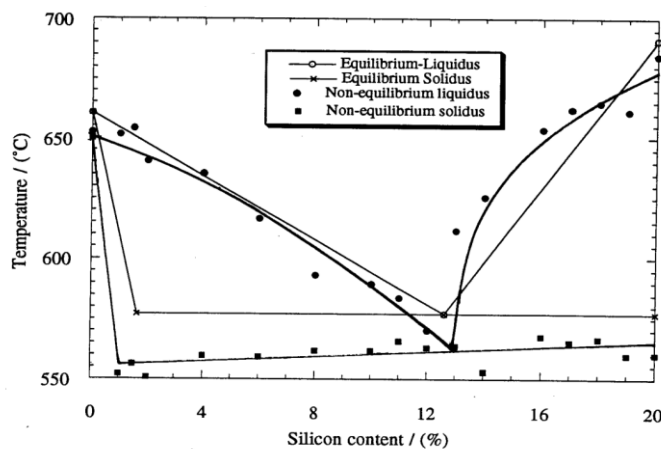
U binárních systémů AlSi byla provedena řada experimentálních měření pro různé typy zkoušek zabíhavosti, jak je popsáno například v literatuře [73], [90], [72], [91]. Uvedené práce se shodují, že tekutost slévarenských slitin AlSi se zvyšuje se zvyšujícím se obsahem Si a dosahuje maxima při 17–18 hmot. %. Je to tedy značně výše nad eutektickým složením těchto slitin (12 hmot. % Si), tj. teoretickou nejvyšší hodnotou zabíhavosti – viz. obr. 5.13. V uvedených pracích byla zabíhavost měřena při konstantní teplotě lití 800 °C.



Obr. 5.13 Vliv obsahu Si na zabíhavost AlSi slitin ([73] – vlevo, [72] – vpravo)

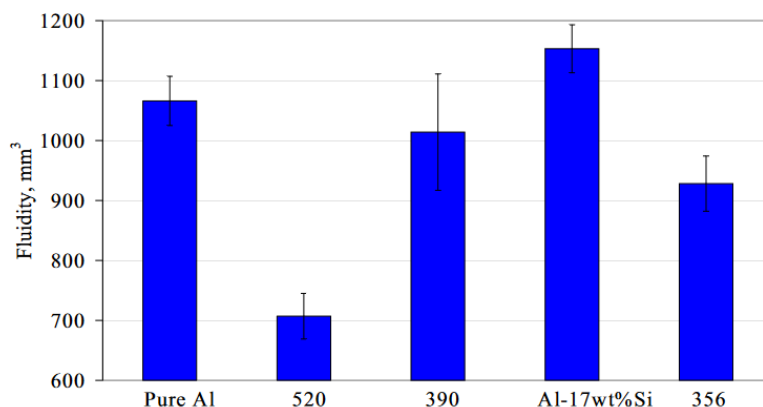
Sabatino a Arnberg [92] a další uvádějí tyto důvody pro vyšší zabíhavosti, než je teoretické eutektické složení:

- Skupenské teplo tání primárního křemíku, které je 4,5krát vyšší než skupenské teplo tání čistého hliníku [93] – delší doba do natuhnutí během proudění taveniny.
- Adefuye [81] prezentuje měřený nerovnovázný Al–Si diagram – obr. 5.14, kde teplota likvidu podeutektických slitin klesá s rostoucím obsahem křemíku. Vzhledem k tomu, že teplota lití slitin je udržována jako konstantní na 750 °C (v případě experimentů [81]), tak přehřátí se zvyšuje se zvyšujícím se obsahem křemíku.
- Literatura [92] uvádí, že primární dendrity hliníku jsou přítomny i při eutektickém složení a tvoří síťové dendrity a tyto dendrity mizí až při vyšším obsahu Si, než je eutektické složení. Po dosažení maxima zabíhavosti budou další přídavky obsahu Si snižovat zabíhavost v důsledku zvýšení počtu částic proeutektického křemíku, který zabraňuje toku taveniny. Maximální tekutosti tedy bude dosaženo při obsahu Si, kde zvýšená interference proeutektického křemíku kompenzuje zvýšené teplo tání z tvorby křemíku [90].
- Legující prvky mohou pozitivně ovlivňovat zabíhavost [94] v těchto ohledech:
 - mění přehřátí v důsledku snížení teploty likvidu;
 - mění šířku dvoufázového pásma, ve kterém dochází k tuhnutí;
 - mění morfologii primárních krystalů, které se tvoří;
 - mění povahu oxidických filmů.



Obr. 5.14 Diagram Al-Si se změnou křivek teploty likvidu a solidu pro rovnovážný a nerovnovážný stav [90]

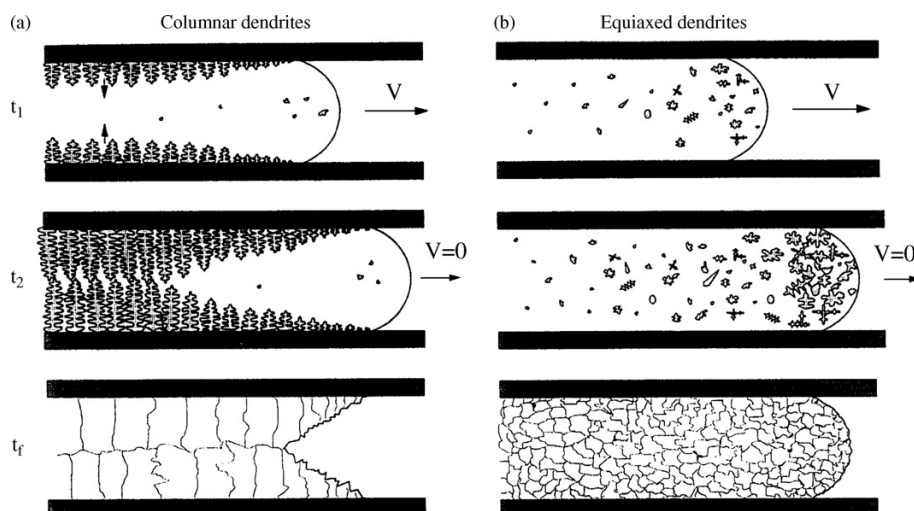
Ve studii [95] byla porovnávána zabíhavost několika Al-Si systémů – obr. 5.15, konkrétně čistého Al (99,999 %), 520 (AlMg10), 390 (AlSi17Cu4), Al-17wt%Si a 356 (AlSi7Mg0,3). Slitiny byly odlévány při konstantním přehřátí taveniny (70 K) a zabíhavost byla měřena na formách pro „strip“ destičkový test. Měření byla vyhodnocována jako objem kovu naplněného v testovacích vzorcích. Výzkumy potvrdily, že nadeutektické siluminy s obsahem 17 % Si mají významně vyšší zabíhavost než standardně používané slitiny s obsahem 7–12 %. Ve studii je dále zmíněno, že zhoršení obrobitelnosti slitin s vyšším křemíkem je zanedbatelné.



Obr. 5.15 Porovnání zabíhavosti pro jednotlivé AlSi slitiny [95]

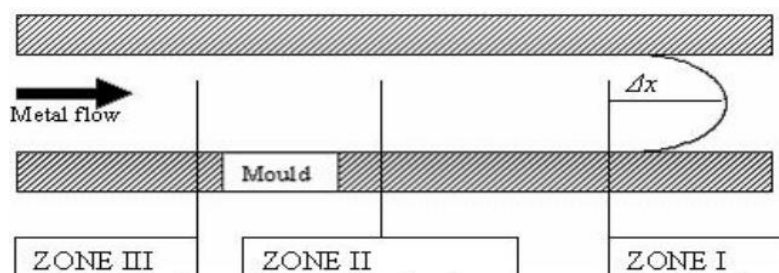
b) Vliv mechanismu tuhnutí pro AlSi slitiny

Zabíhavost je obecně nepřímě úměrná šířce dvoufázového pásma. Vysoká zabíhavost je běžně spojována s čistými kovy a eutektickými slitinami. Exogenní tuhnutí umožňuje proudění taveniny, dokud kanál není definitivně ucpán (obr. 5.16a). Na druhé straně konstituční podchlazení a další jevy způsobují objemovou krystalizaci (endogenní tuhnutí) i v proudící tavenině, což vede k přítomnosti volných krystalů, které mohou zastavit tok, a tím snížit tekutost (obr. 5.16b). Tyto překážky (krystaly) s nahodilým růstem (velkým povrchem) jsou u slitin se širokým pásmem tuhnutí daleko více zastoupeny, než je tomu u litin eutektických nebo u čistých kovů. Proto tedy i zabíhavosti čistých kovů a eutektických slitin jsou vyšší než u slitin tuhnuvších v teplotním rozsahu, a to je důvodem volby eutektických slitin pro výrobu tenkostěnných odlitků. Nicméně nedávné studie Hana a Xua [96] ukázaly, že za podmínek tlakového lití se délka zaproudění zvyšuje pro slitiny s rostoucím intervalem tuhnutí při stejném přehřátí, což je opak tekutosti hliníkových slitin při gravitačním odlévání. Je to dáno tím, že za podmínek vysokého tlaku může tavenina proudit i při vyšším podílu tuhé fáze, než je tomu u gravitačního odlévání. Z tohoto důvodu je vždy nutné zmínit technologii odlévání.



Obr. 5.16 Rozdílné módy v tuhnutí Al slitin: (a) kolumnární růst, (b) equiaxiální růst dle [97]

McParland [98] se zabýval charakterem tuhnutí AlSi při proudění taveniny a pro slitiny s 30 % Si pozoroval tři odlišné zóny – obr. 5.17.



Obr. 5.17 Schéma McParlandova modelu pro nadeutektické slitiny [98]

Zóna I se nachází na lici špičky, má délku Δx a byla nazvána „proeutektická zóna bez Si“, což znamená zóna bez primárního křemíku. Zóna II obsahuje hustě nahromaděné jemné částice křemíku a zóna III obsahuje velké částice křemíku. Z výsledků experimentů McParland usuzuje, že tok taveniny ustává v důsledku opakovaného „přemostění“ (hustě nahromaděné jemné křemíkové částice v licím kanálu) podél délky zóny II. Ačkoli je většina primárních částic křemíku zachycena v zóně II, eutektická tavenina pokračuje v toku a formuje zónu I. Jakmile je zabráněno průchodu taveniny přes zónu II (tvorba mostů), zbývající tavenina tuhne jako zóna III. Navrhovaný model tuhnutí však neverifikuje nejdůležitější komerční podeutektické a nadeutektické slitiny AlSi a je tedy nutný vývoj obecného modelu, který by tuhnutí systému AlSi dostatečně doplnil.

c) Vliv viskozity pro AlSi slitiny

Cooksey a kol. [99] pozorovali, že v systému Al–Si je vztah mezi tekutostí a složením zhruba inverzní vůči vztahu viskozita versus složení. V případě kompozitních suspenzí je však zřídka pozorována přesná reciprocita mezi naměřeným poklesem tekutosti a naměřeným nebo vypočítaným zvýšením viskozity v důsledku přidání částic. Jestliže tekutý kov obsahuje disperzi částic, efektivní nebo zdánlivá viskozita výrazně stoupá nad viskozitu čistých (monolitických) tavenin. Pro extrémně zředěné suspenze (objemová frakce solidu $\varphi < 0,1$) lze předpovědět efektivní viskozitu, μ_c , suspenze pomocí Einsteinovy rovnice (5.6) [100]:

$$\mu_c = \mu_0 (1 + 2,5 \varphi^2 + 10,25 \varphi^2) \quad (5.6)$$

kde:

μ_c	je zdánlivá viskozita kompozitních suspenzí [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$]
μ_0	je viskozita kapalin bez jakýchkoli částic [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$]
φ	je objemový podíl nerozpuštěných částic [–]

V koncentrovaných suspenzích je nutné počítat účinky, jako jsou hydrodynamické interakce, rotace částic a kolize mezi částicemi a tvorbou aglomerátů. V případě vysokoobjemových frakcí se vztah mezi viskozitou a koncentracemi mění na nelineární, a proto je predikce reologického chování velmi komplikovaná. Thomas [101] navrhl následující poloempirický vztah (6) pro viskozitu suspenzí s objemovou frakcí (podílem) do asi 0,6:

$$\mu_c = \mu_0 [1 + 2,5 \varphi^2 + 10,25 \varphi^3 + 0,00273 \exp(16,6 \varphi)] \quad (5.7)$$

Důležitým aspektem je rovněž tvar a velikost částic v suspenzi. Wang a kol. [102] vyvinuli následující rovnici (7) pro viskozitu kompozitní taveniny s ohledem na vliv velikosti částic, tvar i objemový podíl:

$$\mu_c = \mu_0 \left[\left(\frac{\xi(1 + D_p^{0,95})}{(0,01 + 37,35 D_p^{0,95})} \right) \varphi \right] \quad (5.8)$$

Kde:

ξ	je faktor související s poměrem výšky a průměru částic [–]
D_p	je průměr kulových částic [cm]

Dynamická viskozita Al slitin je poměrně nízká, například pod 0,003 Pa/s pro slitinu AlSi7Mg. Studie ukázaly, že změny viskozity s teplotou, anebo mírné změny v chemickém složení slitin nejsou dostatečně velké, aby odpovídaly pozorovaným změnám v zabíhavosti [92]. Tato literatura uvádí, že viskozita pro standardně používané zkoušky zabíhavosti do pískových forem neovlivňuje zabíhavost (v případě přehřátí taveniny). Také Campbell [73] potvrzuje, že zabíhavost roztaveného kovu, měřená spirálovým testem, nezávisí na viskozitě taveniny.

d) Vliv latentního tepla AlSi slitiny

Latentní teplo, které se uvolní při tuhnutí, zpomaluje tuhnutí, a tím podporuje (prodlužuje) zabíhavost většiny slitin. Tímto způsobem práce [72] nebo [92] vysvětlují dobrou zabíhavost nadeutektických AlSi slitin. Je to dáno tím, že čistý křemík má latentní teplo při tuhnutí 4,6krát vyšší, než je tomu u hliníku [93].

Campbell v [73] odvozuje, že v určitém rozsahu % Si se díky latentnímu teplu křemíku zvyšuje zabíhavost asi 3–4krát oproti čistému Al. Tepelný efekt latentního tepla Si na zabíhavost je víceméně zřejmý, přesto se řada autorů domnívá, že tento efekt u nadeutektických slitin není dominantní. Jak naznačují některé výzkumy, např. [81], je zvýšení zabíhavosti nadeutektických slitin především výsledkem přesunu rovnovážného eutektika k vyššímu obsahu Si odpovídající modifikovanému eutektiku. Zdá se, že tento závěr podporují výzkumy Langa [91], v nichž studuje účinek přidání Na do AlSi slitin. Sodík stabilizuje eutektikum a posouvá eutektický bod k hodnotě přibližně 14,5 % Si, což je výrazně více než očekávané rovnovážné eutektikum blízko 12 % Si. Existence maxima tekutosti v rozmezí 14,5–17 % Si byla potvrzena řadou výzkumníků, jak již bylo zmíněno, a potvrzuje to i výzkum Pana a Hua [103], kteří upozorňují na souvislost s kooperativním růstem eutektika při podchlazení.

e) Vliv očkovaní, modifikace a čistoty taveniny u AlSi slitin

Ke zjištění vlivu očkovaní (zjemnění zrna) na zabíhavost hliníkových slitin bylo provedeno značné množství experimentálních prací, avšak výsledky jsou dosti rozporuplné. Tiryakioglu a kol. [104] nezjistili žádný vliv očkovaní na zabíhavost slitiny A356 (AlSi7Mg0,3) testované na Curryho spirále do pískové formy, s přidáním 0,04 hmot. % předslitiny AlTi5B1. Zatímco Lang [91] zjistil významné zvýšení zabíhavosti s přísadami boru v rozsahu 0,04–0,07 hmot. %. Dahle a kol. [97] zkoumali složitější variace a jejich vliv na zabíhavost, a to postupným přidáváním očkovačla AlTi5B1 ve slitinách AlSi7Mg a AlSi11Mg. Zabíhavost se snížila s očkováním pod 0,12 hmot. %, zatímco zvýšení zabíhavosti pozorovali s přidavkem očkovačla nad 0,12 hmot. %. Délka zaběhnutí v kanále klesla o 5 % s 0,01 hmot. %, zatímco až o 9 % vzrostla s dalším přidáním 0,12 hmot. % očkovačla.

Vliv zjemnění zrna očkováním na zabíhavost hliníkových slévárenských slitin je velmi komplexní záležitost, která zahrnuje složité mechanismy, jak popisuje [105]. Vliv zjemnění zrna na zabíhavost závisí na mnoha faktorech: složení slitiny, způsob tuhnutí, typ, disperze a množství očkovačla, doba odeznívání, teplota v pánvi atd. Mezi těmito faktory hraje chemické složení slitiny, a zejména morfologie tuhnutí klíčovou roli. Slitiny s úzkým pásmem tuhnutí tuhnou s volnými rovnoosými zrny v tavenině (exogenní tuhnutí). Mají tendenci dobře proudit a velmi dobře dosazovat kov v podélné délce kanálu. Slitiny se širokým dvoufázovým tuhnutím, jako jsou slitiny AlMg, tuhnou s kašovitou morfologií (endogenně) a dendrity, které brání toku. Zjemnění zrna by tedy mělo mít větší vliv na morfologii tuhnutí, právě u slitin jako např. AlMg [105].

Modifikace eutektika slitin AlSi se řeší použitím modifikátorů na bázi Sr a Na, které mění morfologii křemíku při tuhnutí. Provedené výzkumy, např. Dahle [97], ukazují mírně sníženou zabíhavost s přidáním modifikátorů. Kotte [106] zjistil, že jak Sr, tak Na do určité míry snižují zabíhavost, ale přídavek Na způsobí o něco výraznější snížení zabíhavosti. Obdobné závěry vyslovuje Rao [107] pro zabíhavost v keramických formách. Venkateswaran a kol. [108] rovněž studovali vliv různých modifikátorů na zabíhavost eutektických slitin AlSi. Uvádí, že zabíhavost se snižovala s přidavkem Na, Na + Sr, Ti, Na + Ti a Na + Sr + Ti, zatímco s přidavkem S, Sb, Sb + Ti a S + Ti rostla. Zjistili, že modifikace slitiny AlSi12 snížila zabíhavost o 5 až 7 % v pískové formě a mezi 2 až 3 % ve formě kovové.

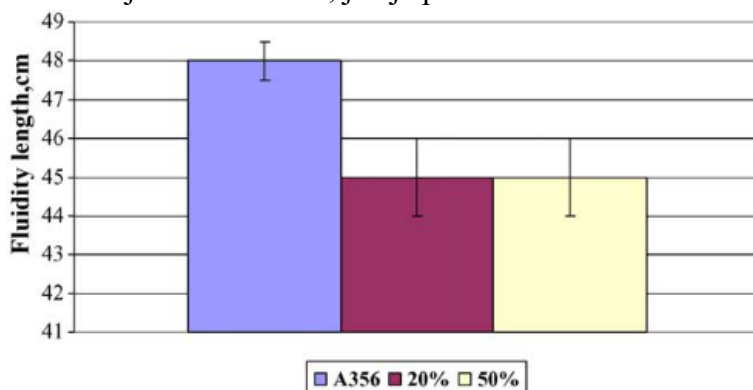
Sahoo a Sivaramakrishnan [109] studovali vliv modifikace Mg na zabíhavost speciálních Al slitin a zjistili, že modifikovaná slitina Mg vykazuje lepší zabíhavost než nemodifikovaná slitina. Vysoce čistý hořčík byl přidán do taveniny udržované při teplotě 880 °C. Přídavek 1 hmot. % Mg poskytl o 15 % lepší zabíhavost než nemodifikovaná slitina. Jako důvod uvádějí, že Mg tvoří fáze, které mají vysoké latentní teplo, a tím zpomalují tuhnutí slitiny.

Sabatino [92] odkazuje, že Groteke zjistil významný vliv čistoty AlSi taveniny na zabíhavost. Až 20% zvýšení zabíhavosti bylo pozorováno, když byla slitiny A319 (AlSi5Cu3) čištěna rafinací inertního a halogenového plynu. Použití samotného inertního plynu však nebylo tak účinné při odstraňování vměstků z taveniny, jako když byly použity halogenové plyny nebo směsi.

Sabatino v práci [92] rovněž odkazuje na práci Crepaua, který uvádí, že tekutost slitiny A356 (AlSi7Mg0,3) se výrazně zvýšila odstraněním nerozpuštěných vměstků v tavenině. Při teplotě liti 704 °C se tekutost zvýšila o 40 %. V nedávných pracích zkoumali Kwon a Lee [110] vliv oxidových inkluzí na tekutost slitin včetně A356 (AlSi7Mg0,3). Měřili tekutost na strip testech

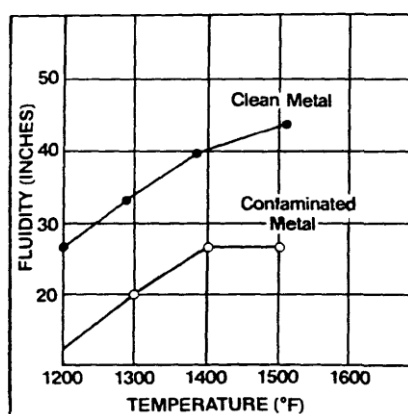
s řízenou úrovní oxidických inkluzí. Výsledky ukázaly, že odlévání na vzduchu zvýšilo množství oxidů v tavenině a zabíhavost kontaminované taveniny se snížila, zejména při nízké teplotě lití. Zabíhavost v kontaminované tavenině se snížila v důsledku snížení kritické tuhé frakce, která zapříčiňuje zastavení toku, což závisí na množství vměstků v kanálu, kterým tavenina proudí.

V současných výzkumech se autoři rovněž zabývají recyklací hliníkových slitin a vlivem vratného (sekundárního) materiálu na vlastnosti AlSi slitin, a to včetně např. vlivu na zabíhavost. V práci [111] bylo zjištěno, že přidáním kontaminovaných soustružnických třísek se výrazně zvyšuje obsah vměstků a oxidů v tavenině. Procento sekundárního materiálu mezi 20–50 % však již mělo stejnou zabíhavost, jak je prezentováno na obr. 5.18.



Obr. 5.18 Měření zabíhavosti pro 3 slitiny, standardní A356, A365 + 20 % vratu a A365 + 50 % vratu [111]

Oxidy, nekovové částice a intermetalické sloučeniny v roztaveném kovu způsobují snížení zabíhavosti, jak bylo zmíněno výše. Výroba čistého roztaveného kovu pomocí filtrace může podstatně zvýšit tekutost – až o 30 % při normálních provozních teplotách, jak uvádí [112]. Vliv filtrace na tekutost kovu je demonstrován na obrázku 5.19. Jedná se však o filtraci pomocí technologie PoDFA, ne o filtraci taveniny pomocí keramických filtrů, umístěných ve vtokové soustavě.



Obr. 5.19 Efekt filtrace na zabíhavost kovu [112]

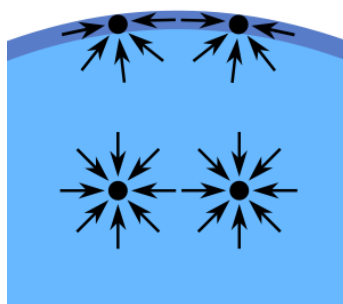
5.2.2 Rozbor povrchového napětí a smáčivosti (fillability)

Řada užitných vlastností materiálu závisí na druhu a stavu povrchu. Tyto vlastnosti tak přímo ovlivňují nejen některé fyzikální a chemické, ale i technologické a mechanické vlastnosti

slitiny. S povrchem materiálu tak úzce souvisí jevy týkající se opotřebení, koroze, tvorby trhlin při mechanickém zatěžování, pohlcování světla, ale např. i povrchové napětí či smáčivost.

a) Povrchové napětí

Povrchové napětí kapalin je vyvoláno přitažlivými silami molekul, které jsou těsně při povrchu taveniny, pokud se stýká s plynnou fází, s níž nereaguje. Atomy a molekuly v povrchové vrstvě se nachází v jiném prostředí než atomy a molekuly v objemové fázi. V objemové neboli vnitřní fázi jsou tyto částice obkloповány svými sousedy ze všech stran. Výslednice působících sil je tedy nulová. Molekulám na povrchu (pevné či kapalné látky) však tyto sousedé chybí. Chybějící sousedé např. v případě kapaliny způsobí, že výslednice přitažlivých sil je nenulová a míří dovnitř kapaliny – obr. 5.20. Vznikají tedy síly kolmé k povrchu taveniny směřující dovnitř taveniny, a tak dochází k tlaku na vnitřní vrstvy těsně pod hladinou [113].



Obr. 5.20 Grafické zobrazení silového působení na kapalinu [114]

Povrchová vrstva kapaliny se tak chová jako pružná blána o tloušťce 10^{-9} až 10^{-8} m. Vlastnosti této blány lze charakterizovat veličinou, která se nazývá povrchové napětí γ . Povrchové napětí odpovídá tečné síle působící v rovině povrchu taveniny (dF) kolmo na délku myšleného řezu (dl) v téže rovině, viz rovnice (5.9).

$$\gamma = \frac{dF}{dl} [\text{N} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (5.9)$$

Čím je povrchové napětí kapaliny vyšší, tím snáze se mohou cizí tělesa na povrchu této kapaliny udržet. Pokud by na kapalinu nepůsobily vnější síly, měla by kulový tvar, protože koule má ze všech těles stejného objemu nejmenší povrch. Při působení vnějších sil je situace poněkud složitější. Vždy se však volný povrch kapaliny snaží snížit velikost celkového povrchu na co možná nejmenší možnou míru. Vysoké povrchové napětí ztěžuje proces smáčení i zabíhavost taveniny v dutině formy.

Povrchové napětí lze měřit několika experimentálními způsoby. Experimenty se rozdělují na statické a dynamické metody. Pro vysoké teploty se hodí spíše metody statické [115]. Hodnoty experimentálně měřených hodnot u vybraných slitin uvádí tab. 5.1.

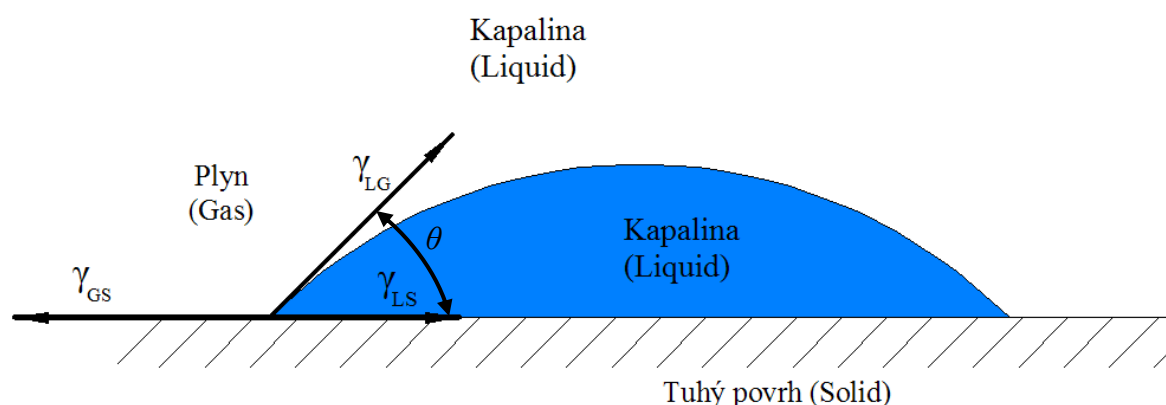
Tab. 5.1 Tabulka měřených povrchových napětí některých kovů a slitin [116]

Kov	Měřeno při teplotě [°C]	Povrchové napětí [N . m ⁻¹]
Cín	230	0,526
Hliník	700	0,300
Měď	1 181	1,103
Ocel 0,3 %C	1 520	1,500
Šedá litina 3,9 %C	1300	1,150
Bílá litina 3,1 %C	1 420	1,500
Voda	20	0,081

b) Smáčivost a úhel smáčení

Smáčivost je schopnost kapaliny udržovat kontakt s pevným povrchem, vyplývající z mezimolekulární interakce. Stupeň smáčení je určen projevem adhezních a kohezních sil, což jsou přitažlivé a odpuzivé síly mezi částicemi povrchových vrstev dvou stýkajících se látek. Smáčivost a povrchové síly, které řídí smáčení, jsou rovněž odpovědné za další související efekty, včetně tzv. kapilárního efektu [117].

Mírou smáčení kapaliny na pevném povrchu je **tzv. úhel smáčení θ** , který svírá tečna k povrchu kapky, vedená v bodě styku kapky s rozhraním. Hlavní charakteristika tvaru kapky kapaliny umístěné na povrchu nerozpustné tuhé látky (obr. 5.21) je závislá na vlastnostech vzniklého mezifázového rozhraní.



Obr. 5.21 Kapka kapaliny umístěná na rovinném povrchu. Je zde vyznačena rovnováha sil povrchového napětí na obvodu smáčení. G značí plyn (gas), L kapalinu (likvid) a S pevnou látku (solid) [118]

V soustavě dle obr. 5.21 existují tři různé stykové plochy na rozhraní fází, tj. tuhá látka – plyn, kapalina – plyn a kapalina – tuhá látka. Každému mezifázovému rozhraní odpovídá příslušné povrchové γ . Křivka γ_{LG} , ve které se stýkají všechna fázová rozhraní, se nazývá linie smáčení. Kontaktní úhel θ – obr. 5.26, se nazývá úhel smáčení.

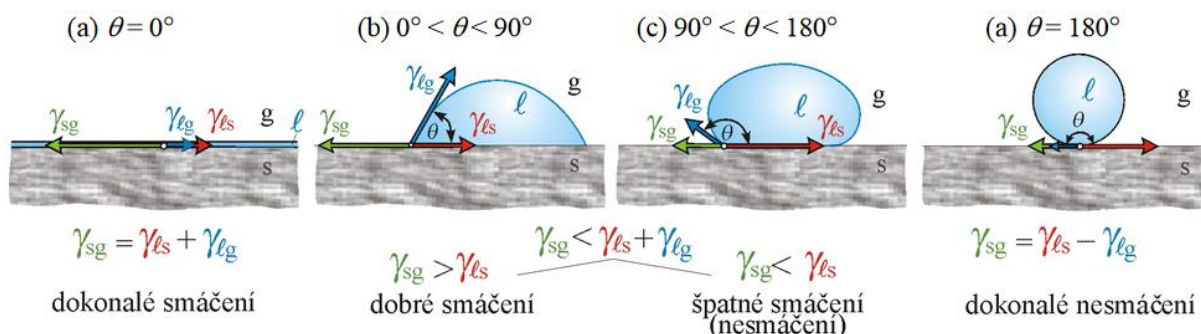
Vztah mezi úhlem smáčení θ a jednotlivými mezifázovými rozhraními je dán Youngovou rovnicí (5.10).

$$\gamma_{GS} - \gamma_{LS} = \gamma_{LG} \cos \theta \quad (5.10)$$

nebo

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{GS} - \gamma_{LS}}{\gamma_{LG}} \quad (5.11)$$

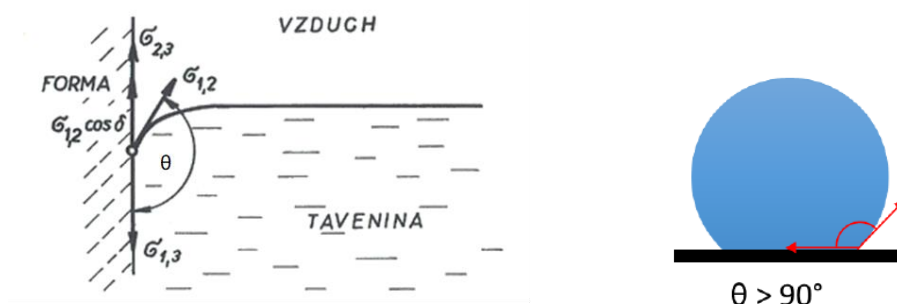
V (5.11) představuje $\gamma_{(xx)}$ hodnotu mezifázového napětí na rozhraní příslušných dvou fází. Tento tvar rovnice předpokládá ideálně hladký homogenní povrch. Podle velikosti úhlu smáčení rozlišujeme, zda kapalina povrch smáčí, či nikoliv. Jestliže je úhel smáčení menší než 90° , kapalina tuhou látku dobře smáčí. Kontaktní úhel větší než 90° většinou znamená, že kapalina tuhou látku špatně smáčí, nebo nesmáčí – obr. 5.22.



Obr. 5.22 Chování kapky kapaliny na povrchu pevné látky [119]

V případě tavenin rozeznáváme tři stavy povrchu formy:

- **Metalofobní (nesmáčivý)** – v tomto případě jsou síly, které navzájem vážou atomy kapaliny větší než síly mezi kapalinou a např. stěnou formy. Nerovnováha sil se projeví vypouklou hladinou kovu – obr. 5.23. Forma klade odpor proti styku kovu s ní a je nesmáčivá. Nesmáčivost formy snižuje zabíhavost taveniny do dutiny formy, ale na druhou stranu zabraňuje, aby tavenina vnikla do pórů na povrchu formy – zabraňuje vzniku mechanických zapečení.



Obr. 5.23 Metalofobní stav povrchu [120]

- **Indiferentní** – je-li stejné povrchové napětí mezi taveninou a formou i mezi vzduchem a formou, je forma indiferentní. Nenastává ani elevace, ani deprese taveniny na styku taveniny a formy – obr. 5.24.



Obr. 5.24 Indiferentní stav povrchu [120]

- **Metalofilní (smáčivý)** – v tomto případě dochází ve styku hladiny a formy ke zvednutí hladiny, kdy kov na stěnu formy vzlíná – 5.25. Forma je smáčivá a umožňuje kovu dobře vyplnit dutiny. Nicméně tento stav podporuje vznik zapečenin na odlitcích odlévaných do pískových forem.



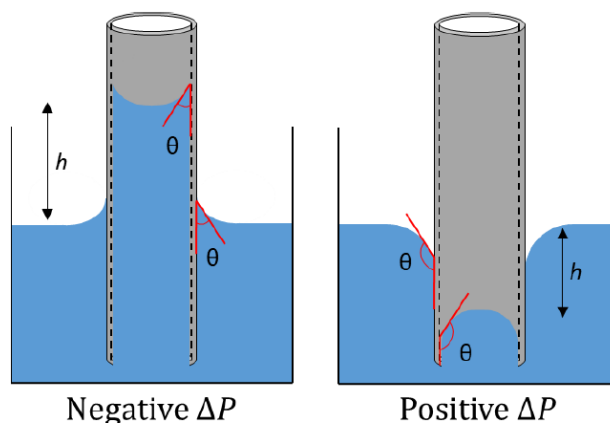
Obr. 5.25 Metalofilní stav povrchu [120]

Rozdíly mezi smáčivými a nesmáčivými systémy lze demonstrovat na příkladu vzlínivosti jednotlivých systémů. V systémech, které jsou smáčivé, je kapalina vtahována do tenkých průřezů. Nesmáčivý systém odolá vyplnění malých prvků. Většina systémů tavenina/keramika je nesmáčivých, což vede k problémům s plněním při odlévání složitých tenkostěnných geometrií.

Pro zakřivený povrch taveniny na rozhraní kapalina–forma–plyn, je tlakový rozdíl označován jako kapilární tlak a je vyjádřen rovnicí (5.12):

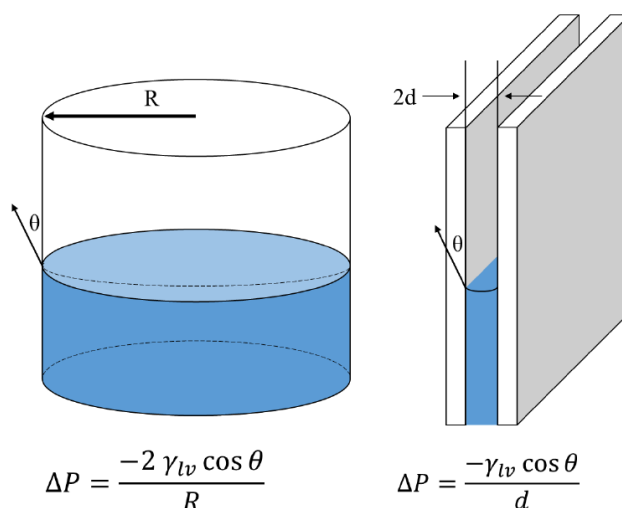
$$\Delta P = P_{Liquid} - P_{Gas/Vapor} = \gamma_{LG} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (5.12)$$

Negativní kapilární tlak bude mít za následek konkávní rozhraní, které vtáhne kapalinu do dutiny, zatímco pozitivní kapilární tlak bude mít za následek konvexní rozhraní, které bude odolávat vtlačení do dutiny – obr. 5.26. Tvar zakřiveného rozhraní je založen na geometrii dutiny a kontaktním úhlu. Zakřivení rozhraní je závislé na kapilárním tlaku ΔP a povrchovém napětí γ_{LG} a lze jej vypočítat pomocí Young-Laplaceovy rovnice pro povrch v nulové gravitaci, kde r_1 a r_2 jsou ortogonální poloměry zakřivení – viz obr. 5.26.



Obr. 5.26 Schematické znázornění kapilárních tlaků pro smáčivý a nesmáčivý systém [38]

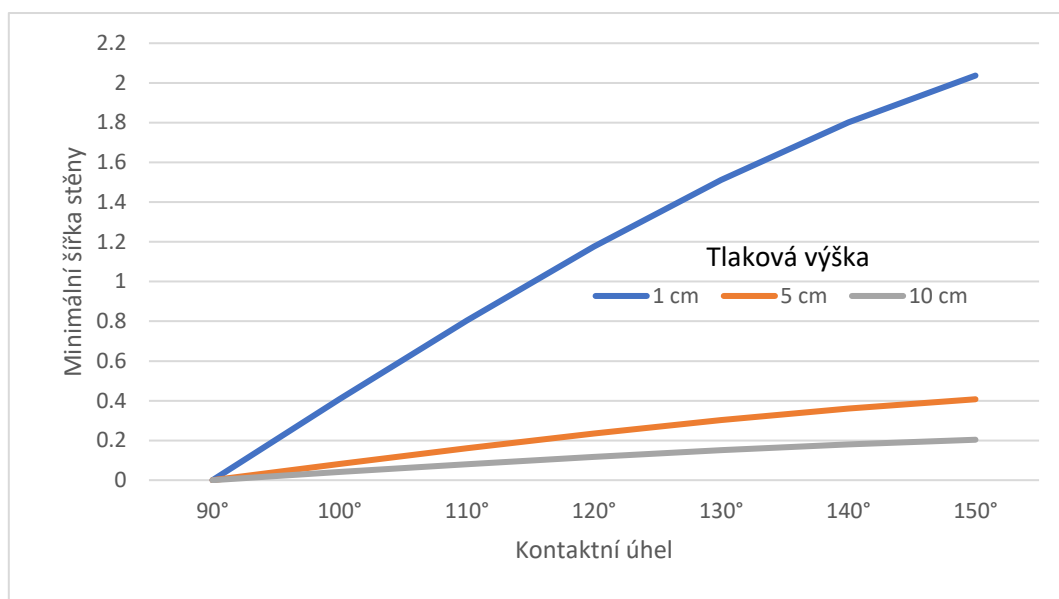
Pro jednoduché geometrie existují analytická řešení pro výpočet kapilarity systému, jak je definováno Young-Laplaceovými rovnicemi. Tyto rovnice spojují tlak potřebný k vyplnění prvku s kontaktním úhlem, povrchovým napětím a geometrií prvku. Tato řešení předpokládají, že pevné povrchy jsou dokonale ploché a že kontaktní úhel je konstantní. Řešení pro kruhový válec a rovnoběžné desky je znázorněno na obr. 5.27.



Obr. 5.27 Vyjádření kapilárních tlaků pro geometrii válce a rovnoběžné desky [38]

V grafu 5.1 je naznačen výsledek výpočtu pro minimální tloušťku mezi dvěma rovnoběžnými deskami, kterou může proniknout tekutý kov s hustotou $2,7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ a povrchovým napětím $0,3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, typickým pro hliníkové slitiny. Výpočet je proveden pro rozsah tlakových výšek 1–10 cm. Tlak aplikovaný na kanál je dán vztahem $\Delta P = h \rho g$.

Pro typický kontaktní úhel 120° , který lze předpokládat mezi taveninou a keramickou formou, se zvýšením tlakové výšky z 1 cm na 10 cm snižuje teoretická minimální šířka kanálu z 1,18 mm na 0,12 mm. Pro tentýž kov a tlakovou výšku 5 cm se změnou kontaktního úhlu ze 100° na 140° mění min. šířka kanálu z 0,1 mm na 0,36 mm. Tyto příklady ukazují, jaký vliv může mít kontaktní úhel a aplikovaný tlak na schopnost taveniny vyplnit jemné detaily formy – tj. fillability.



Graf. 5.1 Výpočet teoretické minimální šířky stěny Al odlitku pro změnu tlakové výšky a kontaktního úhlu

Faktory ovlivňující úhel smáčení v systému kov/keramika

Youngova-Laplaceova rovnice platí především v případech, kdy se podmínky pro měření blíží ideálnímu stavu, nebo v ideálním stavu jsou [121]. Tento stav předpokládá následující:

- povrch smáčeného materiálu je rovný a hladký;
- materiál podložky (substrátu) je chemicky homogenní;
- netečnost materiálu substrátu vůči kapalině, která povrch smáčí;
- materiál substrátu je stabilní za vysokých teplot.

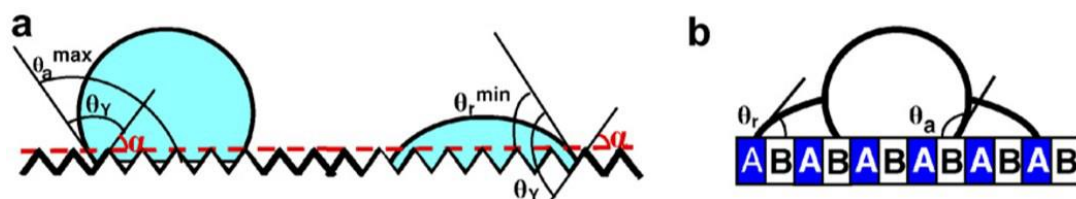
Reálné povrchy však nelze připravit v ideálním stavu. Kontaktní úhel (úhel smáčení) je velice citlivý na lokální změny povrchové energie a na topografii povrchu. Měřený úhel se tak v praxi liší od ideálního Youngova kontaktního úhlu. Úhel může nabývat jak vyšších, tak nižších hodnot. Tento fenomén se nazývá hystereze úhlu smáčení a jeho hodnota je dána rozdílem extrémních hodnot, tedy dle rovnice 5.13:

$$\Delta\theta = (\theta_{max} - \theta_{min}) \quad (5.13)$$

Kde je:

$\Delta\theta$	rozdl naměřených extrémních úhlů [°]
θ_{max}	je nejvyšší hodnota naměřeného úhlu [°]
θ_{min}	nejnižší hodnota naměřeného úhlu [°].

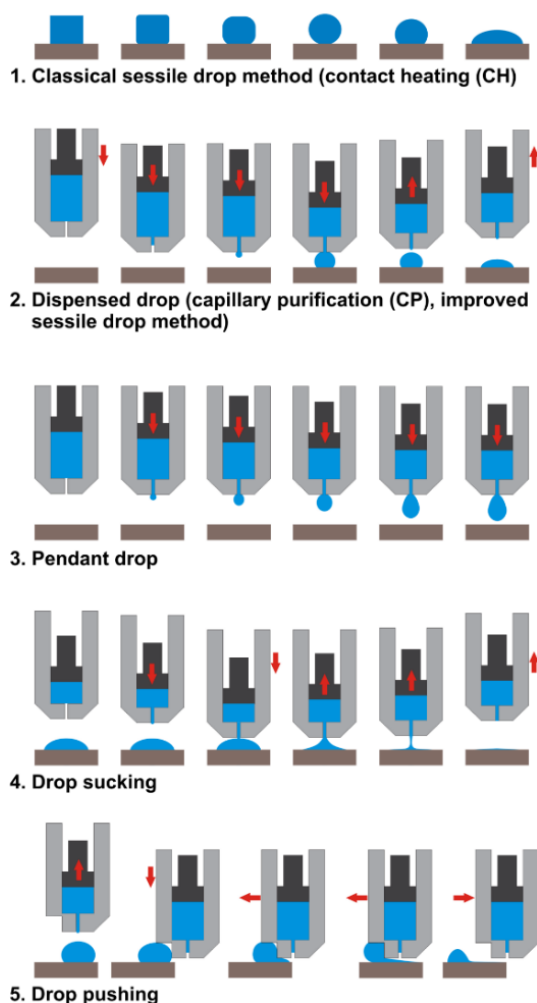
Mezi nejčastější zdroje těchto výkyvů hodnot řadíme topologickou nehomogenitu způsobenou drsností povrchu, nebo jeho pórovitostí, či chemickou nehomogenitu (rozdělení jednotlivých zrn, přítomnost kontaminantů a inkluzí). Vliv těchto faktorů na úhel smáčení je znázorněn na obr. 5.28 a). Mezi další vlivy lze zařadit plynné prostředí a stupeň interakce kovu s podložkou – obr. 5.28 b).



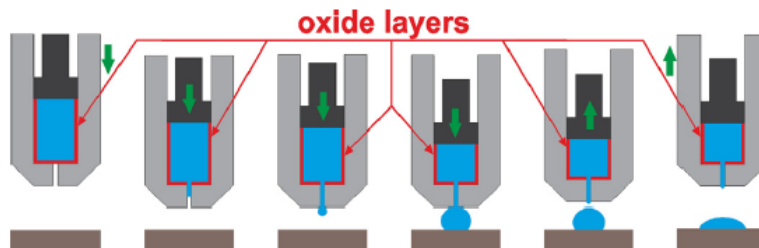
Obr. 5.28 Vliv topografie povrchu (a) a chemické nehomogenity (b) na úhel smáčení [121]

Měření smáčivosti je možné realizovat mnoha způsoby (metoda ležící kapky, metoda visící kapky, měření úhlu smáčení na naklánějící se destičce aj.), které se liší jak experimentálním uspořádáním, tak také přesností poskytnutých výsledků. Mezi přímé metody s nejlepší reprodukovatelností výsledků se řadí metoda ležící kapky. Obr. 5.29 shrnuje různé metody a modifikace klasického měření ležící kapky [122].

Z průzkumu literatury vyplývá, že dostupné práce se většinou týkají experimentů zahrnujících klasickou metodu ležící kapky v kombinaci s kontaktním ohřevem (CH), jak je znázorněno na obr. 5.33. V tomto uspořádání byl v případě reaktivních materiálů pozorován negativní vliv tzv. nativních oxidických filmů na povrchu kapky. Tyto filmy ovlivňovaly výsledky měření, a proto byla vyvinuta testovací metoda dávkování kapky pomocí kapilárního čištění [122] – obr. 5.30.



Obr. 5.29 Testovací metody měření kontaktních úhlů [122]



Obr. 5.30 Schéma zkoušky vysokoteplotní smáčivosti klasickou metodou ležících kapek (SD) v kombinaci s kapilárním čištěním (CP)

Při postupu CP se kov i substrát zahřívají odděleně až na zkušební teplotu. Na začátku experimentu se kov umístí do kapiláry, která je nad substrátem a po dosažení zvolené testovací teploty se kov protlačí otvorem kapiláry. Tato metoda má dvě zásadní výhody:

- Bezkontaktní ohřev dvojice – tj. nežádoucí účinek historie ohřevu je zanedbatelný, což je relevantní v případě vysoce reaktivních systémů.
- Čištění kapky od povrchové oxidové vrstvy – jak je znázorněno na obr. 5.30. Nativní oxidické filmy se mechanicky odstraňují během mačkání kapky z kapiláry, což umožňuje měření skutečných hodnot kontaktního úhlu.

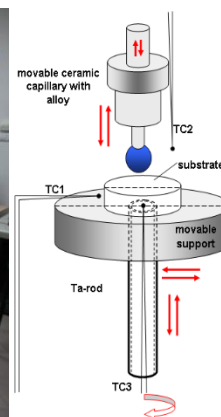
Tato metoda byla zvolena jako způsob měření kontaktních úhlů pro námi studovaný systém kov–keramika.

5.2.2.1 Experimentální stanovení úhlu smáčení pro systém AlSi/keramika

Zkoušky smáčivosti při vysoké teplotě byly prováděny metodou ležící kapky s kapilárním čištěním prováděnou pomocí experimentálního zařízení navrženého společností Łukasiewicz – KIT – obr. 5.31.



(a)

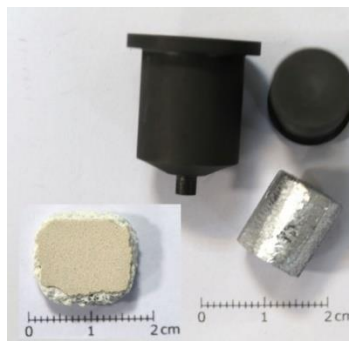


(b)

Obr. 5.31 Experimentální zařízení pro studium procesů za vysokých teplot (a) a schéma jeho pohyblivých prvků umožňující zkoumání různými zkušebními metodami a postupy (b)

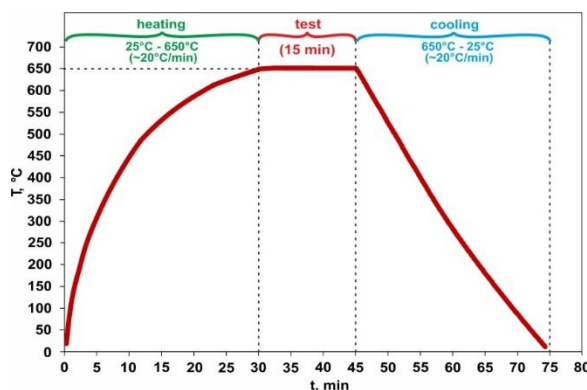
Všechny testy byly prováděny při teplotním rozsahu kovu $T = 720\text{--}620\text{ }^{\circ}\text{C}$ za použití postupu kapilárního protlačení a čištění (CP). Z kontrolních důvodů byl navíc v každém konkrétním testu do experimentální komory vložen malý kousek slitiny („marker“) a podroben kontaktnímu ohřevu (CH) se substrátem A, aby bylo možné sledovat jeho chování při tavení a zajistit, že slitina je v

kapalném stavu po vytlačení roztavené kapky. Jednotlivé materiály použité v experimentech jsou znázorněny na obr. 5.32.



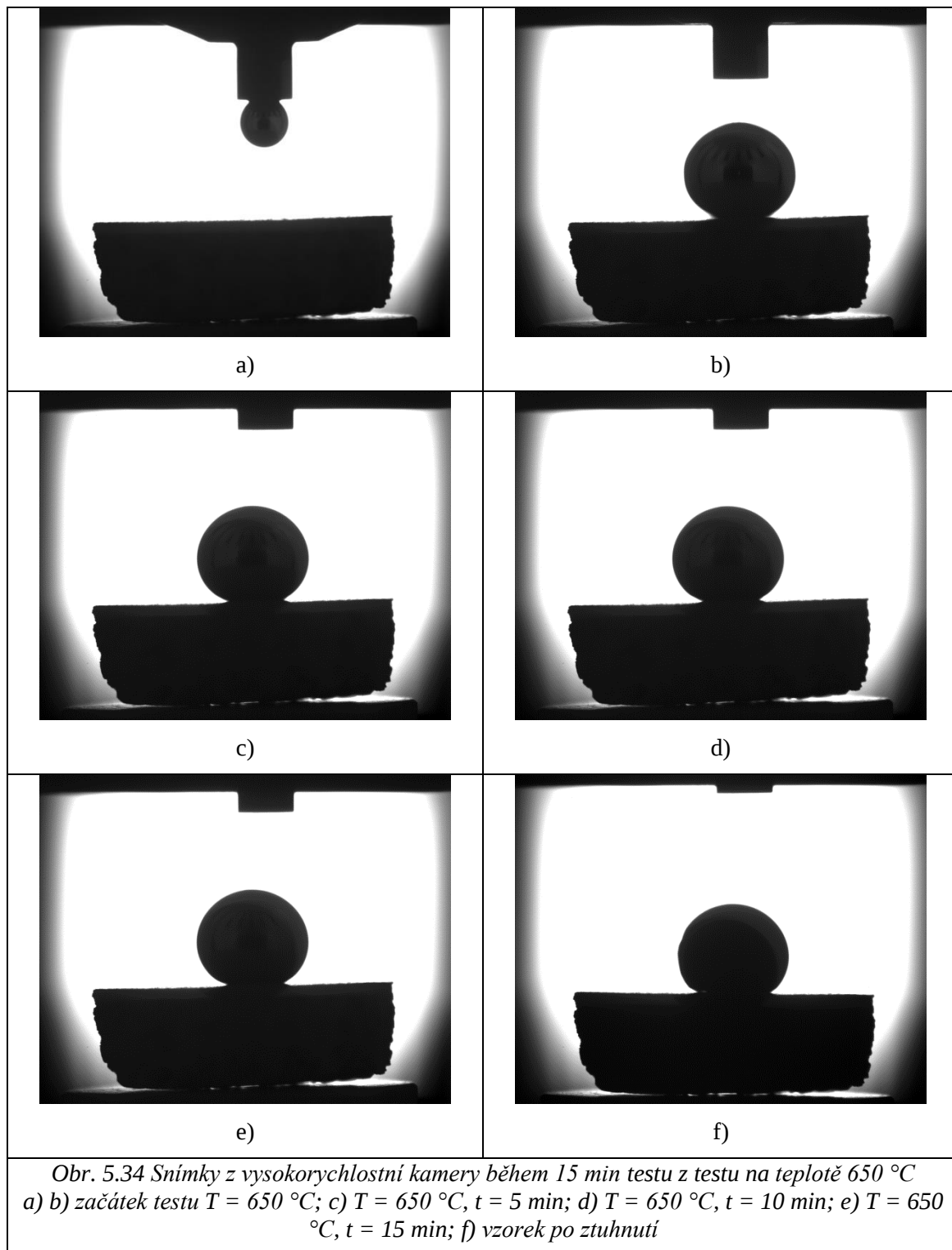
Obr. 5.32 Přehled materiálů použitých pro měření (keramická skořepina, AlSi slitina, grafitová kapilára)

Před zkouškami smáčivosti byl každý kovový vzorek mechanicky a ultrazvukem čištěn v isopropanolu, zatímco každá kapilára z grafitu byla přehřátá na vzduchu na 1000 °C tak, aby se odstranily nečistoty a případná vlhkost. Poté byla slitina vložena do kapiláry a přesunuta do experimentální komory. Na vzorky substrátu nebylo aplikováno žádné speciální ošetření. Všechny vysokoteplotní testy byly provedeny podle teplotního profilu uvedeného na obr. 5.33. Zahřívání bylo zahájeno po odčerpání experimentální komory do vysokého vakua $p = 5 \times 10^{-6}$ mbar a po dosažení teploty 500 °C byl zaveden proudící Ar, aby se potlačily problémy s odpařováním materiálu vzorku.

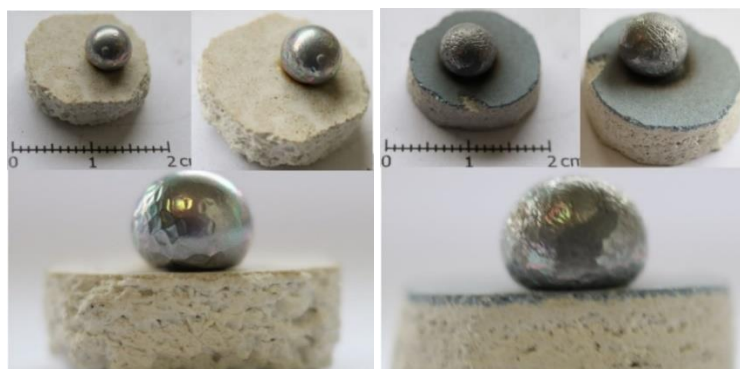


Obr. 5.33 Příklad teplotního profilu použitého při experimentu

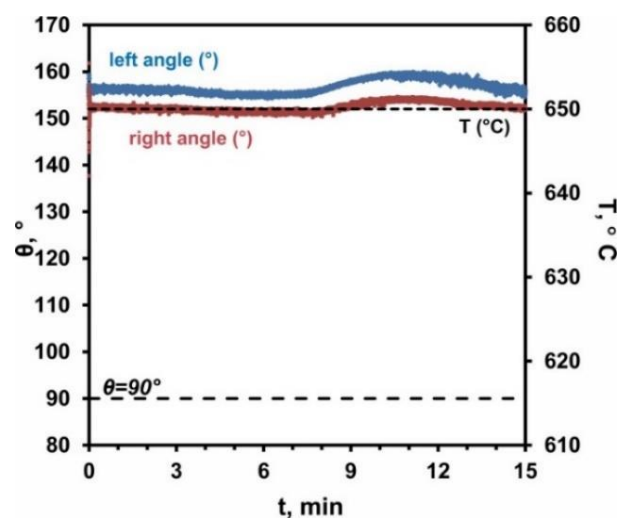
Následující obrázky 5.34 a–f prezentují průběh jednoho experimentu pod označením B. Výsledky jsou snímány vysokorychlostní kamerou, která zaznamená průběh celého teplotního cyklu. V této sadě měření byl vždy použit stejný materiál kovu, a sice AlSi7Mg0,3, a 3 typy keramických systémů, tzv. substrátů. Tyto systémy se od sebe lišily použitou skladbou primárních vrstev, které jsou značeny A, B, C. Cílem experimentů je tedy zjistit kontaktní úhel, který následně může být využit pro analytické výpočty, a druhým cílem byl následný výpočet povrchových napětí, pro který byl zvolen pendant drop test.



Na obrázku 5.35 je zachycen stav kapek po provedeném testu. Obrázek 5.36 zachycuje průběh měření a vyhodnocení kontaktních úhlů, a to jak pravého, tak i levého úhlu. Následně jsou přepočítávány průměrné hodnoty. Je patrné, že časově se úhel smáčení příliš nemění a všechny hodnoty pro jednotlivé varianty svědčí o nesmáčivých systémech.



Obr. 5.35 Již ztuhlé kapky taveniny na různých substrátech (skořepinách)



Obr. 5.36 Záznam měření kontaktních úhlů experimentu B pro pravý i levý úhel

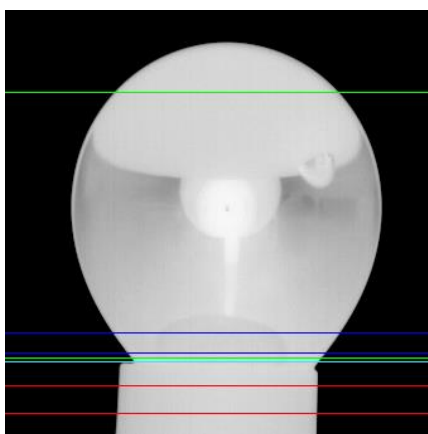
No of sample	Alloy	Substrate	Atmosphere	Procedure	Temp. [°C]	Images from test		θ [°]		Wettability kinetics	Photos of samples after test
						t = 0 min	t = 15 min	0 min	15 min		
3375	AlSi7Mg0.3	substrate "A"	Initial ultra-high vacuum ($p=5 \times 10^{-6}$ mbar). Introduction of flowing argon $\Delta p_{Ar} N_{60}$, $p = 760-870$ mbar	Capillary Purification (CP) graphite capillary	550			-	-		
3376		substrate "B"			650			154	154		
3377		substrate "A"						135	136		
3378		substrate "C"-shell						142	144		
3379		substrate "C"-core						149	150		

Obr. 5.37 Záznam měření kontaktních úhlů experimentu B pro pravý i levý úhel

Obrázek 5.37 zobrazuje výsledky experimentů ve variantách A, B a C, které se od sebe liší použitým substrátem, tj. keramickou skořepinou. A, B jsou průmyslově vyráběné keramické skořepiny s rozdílnou vrstvou primární vrstvy. Systém C je keramické jádro se speciální povrchovou vrstvou. Další směřování výzkumu je orientováno do přípravy povrchové vrstvičky, která bude za uvedených podmínek smáčivá a umožní tak snadnější pronikání taveniny do tenké stěny.

5.2.2.2 Experimentální stanovení povrchového napětí pro systém AlSi/keramika

Stanovení povrchových napětí navazuje na měření kontaktních úhlů a využívá obrazové analýzy pro skenování tvaru kapky při pendant drop testu a výpočtového modulu nelineární regrese dle modelu Maze and Burnet, který do automatické podoby upravil Liggieri [123].



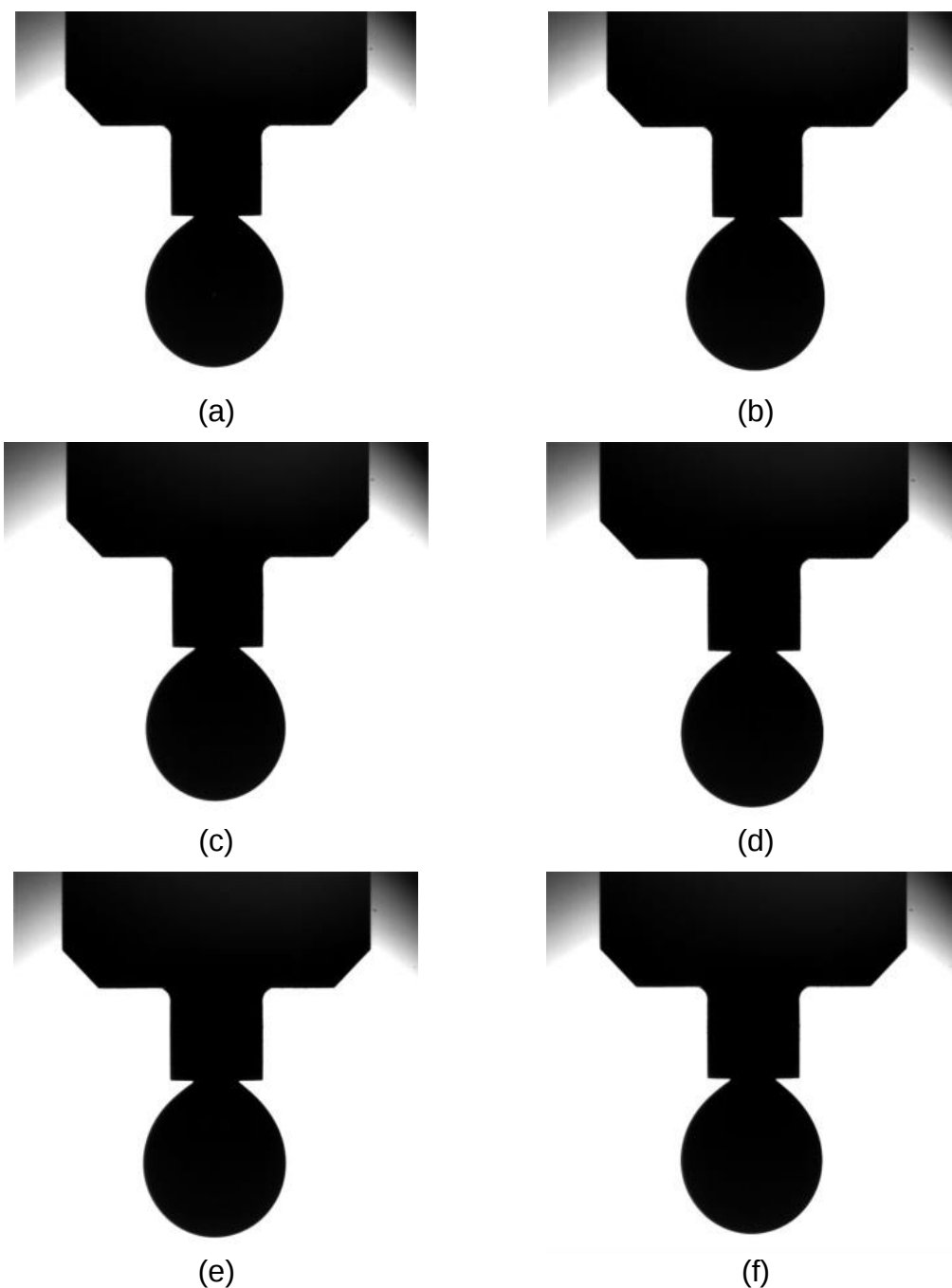
Obr. 5.38 referenční roviny PD testu vyhodnocené pomocí obrazové analýzy ASTRAview

Každý obraz kapky je naskenován v horizontálním a vertikálním směru a poloha okraje je určena jako bod, kde absolutní odchylka v úrovni šedé je maximální, nebo na prahové hodnotě stanovené pro optimalizaci snímaného tvaru kapky – obr. 5.38. Z rozměru a tvaru sledované kapky jsou dále počítány parametry mezifázového rozhraní.

Hodnoty povrchového napětí se vypočítají z profilu pádu kapky pomocí metody nelineární regrese. Metoda se v zásadě skládá z nelineární regrese procedury, ve které je počet zvolených souřadnicových bodů na profilu klesající kapky proložen vypočítanou Laplaceovou křivkou a nejlepší shoda je získána optimalizací dvou parametrů: poloměru vrcholu a faktoru tvaru [123].

Výhodou této metody je, že měřený profil při poklesu kapky je popsán sadou souřadnicových bodů. K zahájení procesu prokládání potřebuje použitý algoritmus odpovídající hodnoty faktoru tvaru kapky a velikosti kapky, aby podpořil konvergenci vypočítané Laplaceovy křivky použité k rekonstruovanému profilu kapky. Algoritmus Maze and Burnet není vhodný pro výpočet povrchového napětí a kontaktního úhlu pro zploštělé kapky silně ovlivněné gravitací. Ve skutečnosti kapky kapalin s nízkým povrchovým napětím končí zploštěním blízko vrcholu a obtížnost rekonstruovat profil kapky pomocí sady souřadnicových bodů blízko oblasti vrcholu může způsobit velkou chybu. Přístup sw ASTRAview překonává tento problém (při přibližování se k oblasti vrcholu) převodem metody detekce profilové hrany z horizontálního skenování na vertikální.

Snímky z pendant drop testu jsou zaznamenány opět vysokorychlostní kamerou pro zvolený interval teplot – obr. 5.39.



Obr. 5.39 Snímky zaznamenané v pětiminutovém intervalu pendant drop testu při teplotách a) $T = 720\text{ }^{\circ}\text{C}$; b) $T = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$; c) $T = 680\text{ }^{\circ}\text{C}$; d) $T = 660\text{ }^{\circ}\text{C}$; e) $T = 640\text{ }^{\circ}\text{C}$; f) $T = 620\text{ }^{\circ}\text{C}$

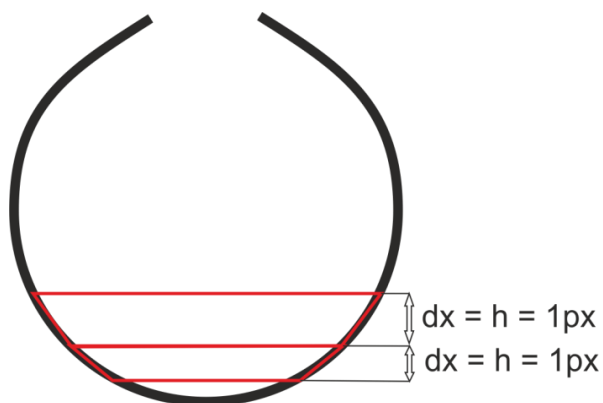
Ztuhlá tavenina (kapka) po ukončení testu je zobrazena na obrázku 5.40.



Obr. 5.40 Ztuhlá slitina po ukončení testu

Hustota pevné látky byla vypočtena na základě Archimedovy metody. Převod na hustotu kapaliny se skládá z několika kroků:

1. Převod pixelu na stupnici v mm na základě průměru hrotu kapiláry.
2. Výpočet objemu kapky v pevném stavu – objem se vypočítá na základě součtu objemů stěnových kuželů (označených červeně) vyznačených na obrysu kapky v pevném stavu, která je schematicky znázorněna na obr. 5.41.



Obr. 5.41 Schéma výpočtu objemu kapky v pevném stavu

3. Výpočet hmotnosti zaznamenané kapky v pevném stavu. Předpokladem je, že se hmotnost vymáčkuté kapky během měření nemění.
4. Výpočet objemu při zkušební teplotě pomocí součtu objemů kuželové metody. Přepočet hmoty ztuhlé kapky na objem při dané teplotě.

Tab. 5.2 Hustota a povrchové napětí vypočtené z experimentálních testů

Slitina	Testovací teplota [°C]	Hodnota hustoty [g · cm ⁻³]	Průměrná hodnota povrchového napětí [mN · m ⁻¹]	Minimum [mN · m ⁻¹]	Maximum [mN · m ⁻¹]
AlSi7Mg0,3	720	2,613	887,8	882,9	968,1
	700	2,546	856,6	804,1	908,1
	680	2,543	867,8	806,8	935,3
	660	2,554	889,6	815,2	974,4
	640	2,548	894,8	832,2	956,5
	620	2,560	891,8	819,4	965,2

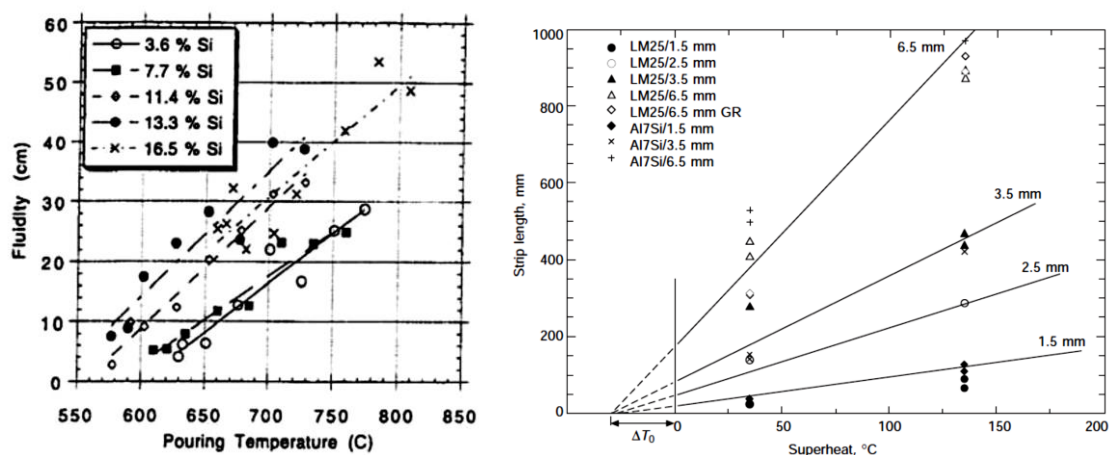
Tab. 5.2 shrnuje výsledky měření a výpočtu hustot a povrchového napětí. Vůči hodnotě uvedené v tab. 5.1 – $0,3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ se námi měřené hodnoty $0,8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ významně liší. Tato měřená hodnota byla následně podkladem pro definici úlohy v numerické simulaci – kapitola 7.

5.2.3 Vliv podmínek odlévání

Správná volba podmínek odlévání významnou měrou ovlivňuje zabíhavost ve slévárenských formách. Jedná se zejména o volbu licích teplot (tj. velikosti přehřátí taveniny), volbu rychlosti plnění a potažmo tlakových výšek. Jsou to podmínky, které jsou nejčastěji využívány v případech výskytu vad typu nezaběhnutí.

a) Přehřátí (superheat), teplota lití

Přehřátí neboli rozdíl mezi teplotou odlévání a likvidem je základním způsobem ovlivňování zabíhavosti ve slévárnách. Závislost zvýšení zabíhavosti s rostoucí teplotou odlévání (přehřátím) byla zkoumána řadou autorů, kteří na široké variabilitě experimentálních testů potvrzovali téměř lineární závislost těchto veličin. Kolsgaard [124] uvádí, že délka zabíhavosti slitiny AlSi7Mg0,6 měřená Curryho spirálou v pískové formě se lineárně zvyšuje se zvyšujícím se přehřátím. Nárůst teploty taveniny o 1°C v teplotním intervalu $700\text{--}760^\circ\text{C}$ prodlužuje délku zabíhavosti o 1 %. Lineární závislost – obr. 5.42 – potvrzují i další autoři pro široké spektrum slévárenských slitin [73], [72], [95].



Obr. 5.42 Zabíhavost v závislosti na licí teplotě a přehřátí pro spirálovou zkoušku dle [90] vlevo a pro vertikální „strip test“ dle [52] vpravo

Zvýšení teploty lití, a tím i přehřátí taveniny, zpožďuje nukleaci a růst jemných zrn na špičce proudícího kovu v testovacím kanálu, což ovlivňuje délku zaproudění. U nadeutektických slitin AlSi bylo zjištěno [98], že tekutost se zvyšuje se zvyšujícím se přehřátím taveniny až do úrovně $100\text{--}150^\circ\text{C}$. Jakékoli další zvýšení přehřátí nepřineslo žádné další zvýšení zabíhavosti. Jako důvod uvádí další vlivy spojené s turbulentním prouděním v testovacích kanálech včetně již známého vlivu vyššího obsahu Si, a tedy vlivu latentního tepla. Zvyšování přehřátí taveniny u AlSi slitin však vede ke zvýšenému výskytu metalurgických vad a vyššímu stahování slitiny.

b) Tlaková výška a rychlost plnění

Tlak taveniny vytékající z určité výšky lze vyjádřit součinem tlakové výšky, hustoty taveniny a gravitačním zrychlením. Tlak a tlaková výška ovlivňují jak schopnost taveniny proudit (flowability), tak rovněž schopnost taveniny vyplnit tenké průřezy dutiny formy, tedy fillability.

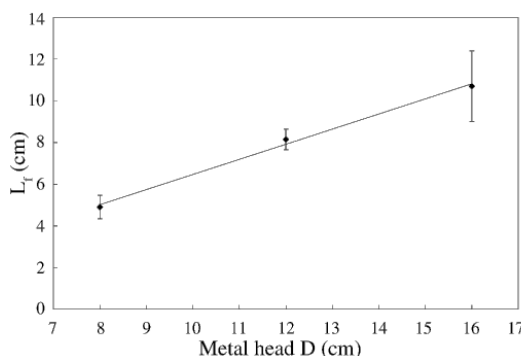
Vyšší tlaková výška prodlužuje délku zabíhání taveniny a zvyšuje schopnost vyplnit tenké průřezy v důsledku vyšší síly, kterou je tavenina vtlačována do úzkých sekcí, v nichž hraje dominantní roli povrchové napětí. Za předpokladu nesmáčivých podmínek na rozhraní tavenina/forma je třeba splnit následující podmínky v rovnici (5.14), aby se kov dostal do tenkého průřezu [38]:

$$\rho gh - P_{\text{formy}} \geq \frac{\gamma}{R} \quad (5.14)$$

Kde:

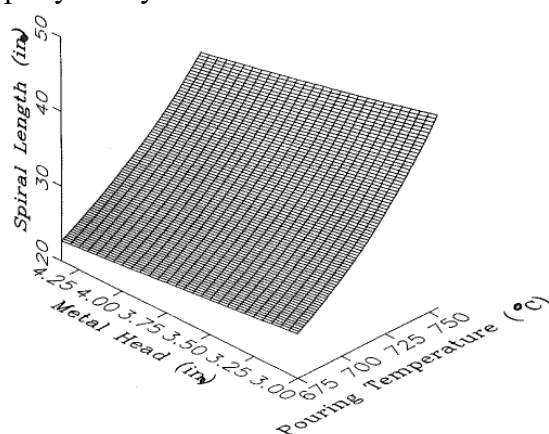
P_{formy} je protitlak plynů ve formě [Pa]
 γ je povrchové napětí [$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$]
 R poloměr zakřivení menisku v ose x [m]

Snížení protitlaků plynů ve formě lze dosáhnout zvýšenou prodyšností formy, případně použitím odvzdušnění. V technologii IC se velmi často využívá odlévání ve vakuu. Téměř lineární závislost tlakové výšky na zabíhavosti je naznačena na obr. 5.43 [76] odlévaný z AlSi slitiny z teploty 750 °C do kovové formy o teplotě 300 °C a tl. stěny s 1,3 mm.



Obr. 5.43 Zabíhavost v závislosti na tlakové výšce [76]

Naopak Tiryakioğlu [104] zjistil, že malé změny metalostatického tlaku, tedy tlakové výšky, zabíhavost významně neovlivňují. Dokonce na obrázku 5.44 prezentoval, že zvýšení tlakové výšky mělo nepříznivý vliv na finální zabíhavost. Tato tendence byla zdůvodněna zvýšením turbulence taveniny při zvýšené tlakové výšce. Tyto protichůdné závěry výše uvedených autorů jsou významně ovlivněny testovacími geometriemi, na kterých byly výzkumy prováděny. Při určitých geometrických konfiguracích jednotlivých testů mají dominantní vliv jiné faktory, např. teploty přehřátí a teploty formy.



Obr. 5.44 Zabíhavost v závislosti na tlakové výšce a teplotě [104]

Je zřejmé, že zvýšení tlakové výšky může způsobit vyšší namáhání skořepiny, zvýšit turbulenci kovů, zvýšit tvorbu a zahlcení oxidických plen, a tím nepříznivě ovlivnit kvalitu odlitků.

c) Rychlost plnění

Aby bylo možné zaplnit tenkostěnné odlitky, měla by být rychlost taveniny na vstupu do kanálů a stěn poměrně vysoká. Pokud jsou rychlosti nízké, může dojít k předčasnému zatuhnutí a vzniku nedolití. Proto je velmi důležitý design vtokového systému a zářezů. Flemings [68] pro vodorovně umístěné tenkostěnné odlitky odvozuje tuto rovnici pro rychlost taveniny:

$$v = \sqrt{\frac{2g(Z-y)}{1+K''}} \quad [\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.15)$$

Kde:

Z	<i>je výška od hladiny kovu v lici jamce po vstupu do kanálu [cm]</i>
K''	<i>je ztrátový součinitel (bezrozměrný) na vstupu do kanálu (hodnota K'' se pohybuje od 0,05 pro velké poloměry do 0,8 pro ostrý roh) [-]</i>
y	<i>změna užitečné metalostatické výšky jako funkce povrchového napětí [cm]</i>

V případě nesmáčivé formy platí:

$$y = \frac{4\gamma}{R\rho g} \quad [\text{cm}] \quad (5.16)$$

Kde:

R	<i>poloměr zakřivení u vstupu do testovacího kanálu [m]</i>
γ	<i>povrchové napětí [$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$]</i>

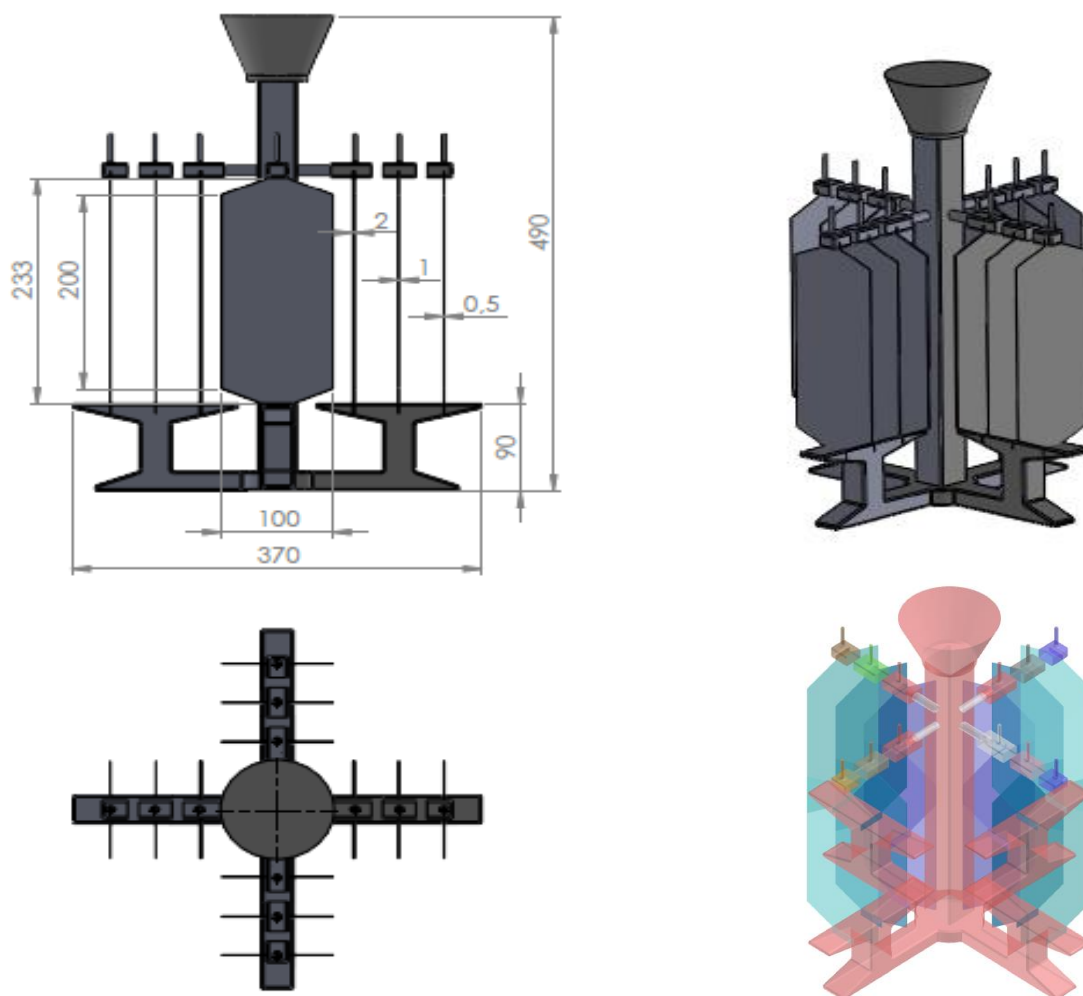
Ze vztahu (5.16) vyplývá, že povrchové napětí je důležitým faktorem ovlivňujícím i rychlost proudění taveniny. Nevýhodou při zvyšování rychlosti je vyšší turbulence a s tím spojené vyšší riziko vad v odlitku. Proto je velmi důležité, aby turbulence byly minimální, a to zvláště u Al slitin. Na druhou stranu, pokud je rychlost lití příliš pomalá, dojde k poklesu teploty taveniny v důsledku rozdílu v teplotě kovu a formy, což způsobí snížení zabíhavosti a bude mít za následek vznik nezaběhnutí. Užitečným výrazem pro hodnocení chování proudění uvnitř dutiny formy je Reynoldsovo číslo. Nízké Reynoldsovo číslo znamená méně turbulentní proudění. U hliníkových slitin je proto často doporučováno použití plochých průřezů pro snížení turbulence taveniny v dutině formy [8].

5.2.4 Vliv parametrů formy

Forma v technologii IC hraje při odlévání tenkostěnných odlitků velmi významnou roli. Jedná se zejména o materiálové složení keramické formy, její pevnosti a prodyšnosti, teploty přehřevu a tloušťku skořepiny.

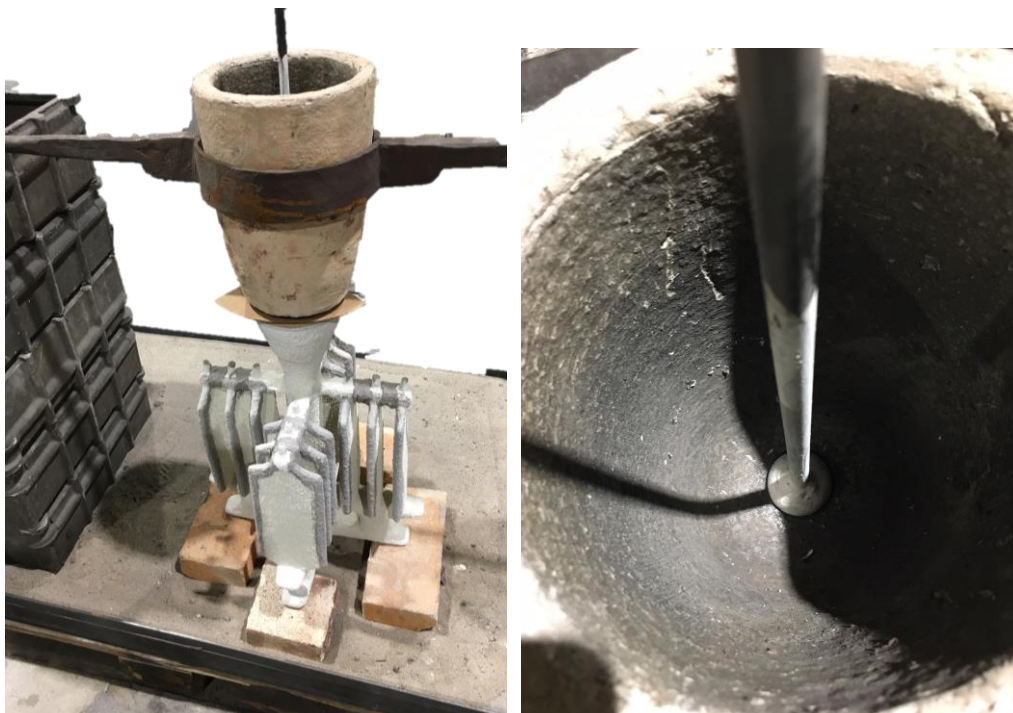
Pro posouzení zabíhavosti tenkostěnných odlitků z Al slitin pro technologii IC bylo v této práci navrženo testovací těleso ve formě destiček o rozměru 100 mm × 200 mm a tloušťkách 2, 1 a 0,5 mm. Testovací tělesa ve tvaru destiček byla vybrána záměrně, aby bylo možné testovat jak schopnost proudit, tak schopnost vyplnit tenké části, kde dominantní roli přebírá povrchové napětí. Vtoková soustava je zaústěna ze spodní části zkušebních desek, tak aby ve spodní soustavě došlo k uklidnění proudu kovu a bylo eliminováno turbulentní proudění taveniny a tvorba oxidických plen ještě ve vtokové soustavě. Na obrázku 5.45 je znázorněna geometrie

licí sestavy, která se skládá ze čtyř ramen, na kterých jsou vždy umístěna tělesa o třech tloušťkách. Tato sestava nám umožňuje současné porovnání zabíhavosti na čtyřech stejných tělesech, tj. posouzení odchylek při stejných podmínkách. Dále umožňuje pro stejné podmínky plnění sledovat jednotlivé vlivy (teploty, prodyšnost, povrchové napětí) na zabíhavost v jednotlivých tloušťkách odlitku.



Obr. 5.45 Koncept experimentálního tělesa pro tenkostěnné odlitky

Licí sestava je plněna z licího kelímku se spodní výpustí, který je postaven na keramickou licí nálevku. Licí kelímek obsahuje tzv. stopper, tj. zátkovou tyč, která uzavírá spodní výpust' kelímku. Tento mechanismus stejně jako v [95] eliminuje variabilitu rozdílných podmínek při odlévání – obr. 5.46.



Obr. 5.46 Schéma experimentální testovací sestavy

Spodní plnění a masivní spodní část navržené testovací sestavy zaručují podle numerické simulace velmi klidný vstup kovu do testovacích těles. Vstupní rychlost a podmínky jsou uvedeny v kapitole 7.5. Na obrázku 5.47 je zachycena příprava modelu a výroba keramické skořepiny. Pro sestavu bylo využito hybridní technologie s kombinací voskového vtoku a 3D tištěného modelu z materiálu PolyCAST™.



Obr. 5.47 Příprava modelu a výroba testovací skořepiny

Tabulka 5.3 uvádí základní parametry keramického systému, který byl v této práci použit na základní zkoušky zabíhavosti. Obalování probíhalo kombinací ručního obalování (1.–3. obal) a obalování pomocí zařízení Cyclone. Sušení bylo vždy prováděno na vzduchu s 50% vlhkostí s použitím proudícího vzduchu.

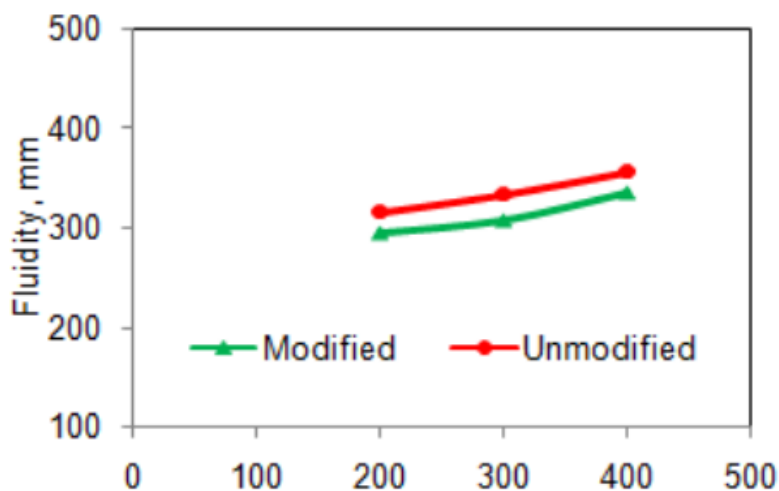
Tab. 5.3 Struktura použitých keramických systémů

	Suspenze A – „primár“	Suspenze B „zesilovací“
Pojivo (koloidní silika – vodní báze)	Primcote® binder	Primcote® binder
Plnivo	Zirkon – 200 mesh	Ranco-Sil™ 4 – fused silica – 200 mesh
Posyp	Zirkon – 50/150	Mulitte – 30/80 Molochite 16/30
Počet obalů	1	1 + 7

a) Teplota skořepiny (pre-heating)

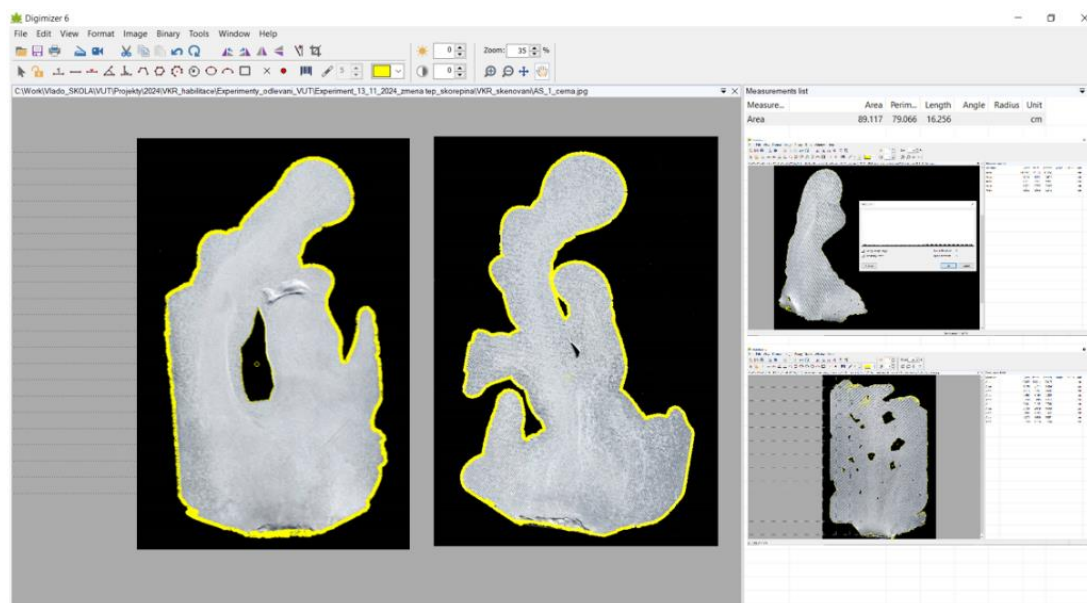
Schopnost taveniny proudit je závislá na tepelném toku z taveniny do formy a dále do okolí. Je tedy zřejmé, že zvýšení teploty keramické formy povede ke zpomalení počátku tuhnutí kovů ve fázi plnění, a tím lze předpokládat zvýšení délky zaběhnutí taveniny. V rovnici (5.4) je zabíhavost nepřímo úměrná rozdílu teploty kovu T_C a teploty formy T_M . U tenkých stěn odlitku a v případě nízkých teplot keramické formy dochází k velmi rychlému tuhnutí kvůli intenzivnímu odvodu tepla a zvyšování vnitřního odporu a tavenina přestává proudit. V případě schopnosti vyplnit taveninou tenké stěny a jemné kontury dutiny formy však toto zcela neplatí a výrazné zvýšení teploty nemusí nutně vést k vyplnění jemných rádiů a detailů. Velkou roli zde má povrchové napětí taveniny.

Řada výzkumů [87], [52], [77] potvrzuje zvýšenou zabíhavost se zvýšením teploty formy. V literatuře však nalezneme i nevýznamné zvýšení zabíhavosti se zvyšující se teplotou formy, a to zejména ve spojení se snižující se tloušťkou stěny, a tedy tam, kde povrchové napětí hraje dominantní roli. Oliff a kol. [125] rovněž uvádí, že vliv teploty formy klesá, když se snižuje tloušťka stěny odlitku a to zvláště, když je rychlost taveniny vstupující do rozváděcího kanálu nízká. Nevýznamný vliv teploty formy v tenkostěnných partiích odlitku lze přičíst skutečnosti, že odpor (protitlak) vyvolaný povrchovým napětím roste a snižuje tak rychlost plnění v kanále. V případě superslitin je vliv teplot formy sledován v řadě studií. U Al slitin jsou výsledky publikovány v daleko menším rozsahu. V publikaci [107] byl sledován vliv na zabíhavost pro modifikované a nemodifikované eutektické slitiny AlSi v závislosti na teplotě skořepiny – obr. 5.48. Zkoušky byly provedeny na Curryho spirále při konstantní, avšak velmi vysoké lící teplotě 800 °C. Výsledky potvrzují zvyšující se zabíhavost taveniny pro vyšší teploty přehřátí a je ještě demonstrován vliv modifikace na určité snížení zabíhavosti, jak je popisováno v kapitole 5.31. Každopádně je nutné zmínit, že Curryho spirála není reprezentativní zkouškou pro tenkostěnné odlitky.



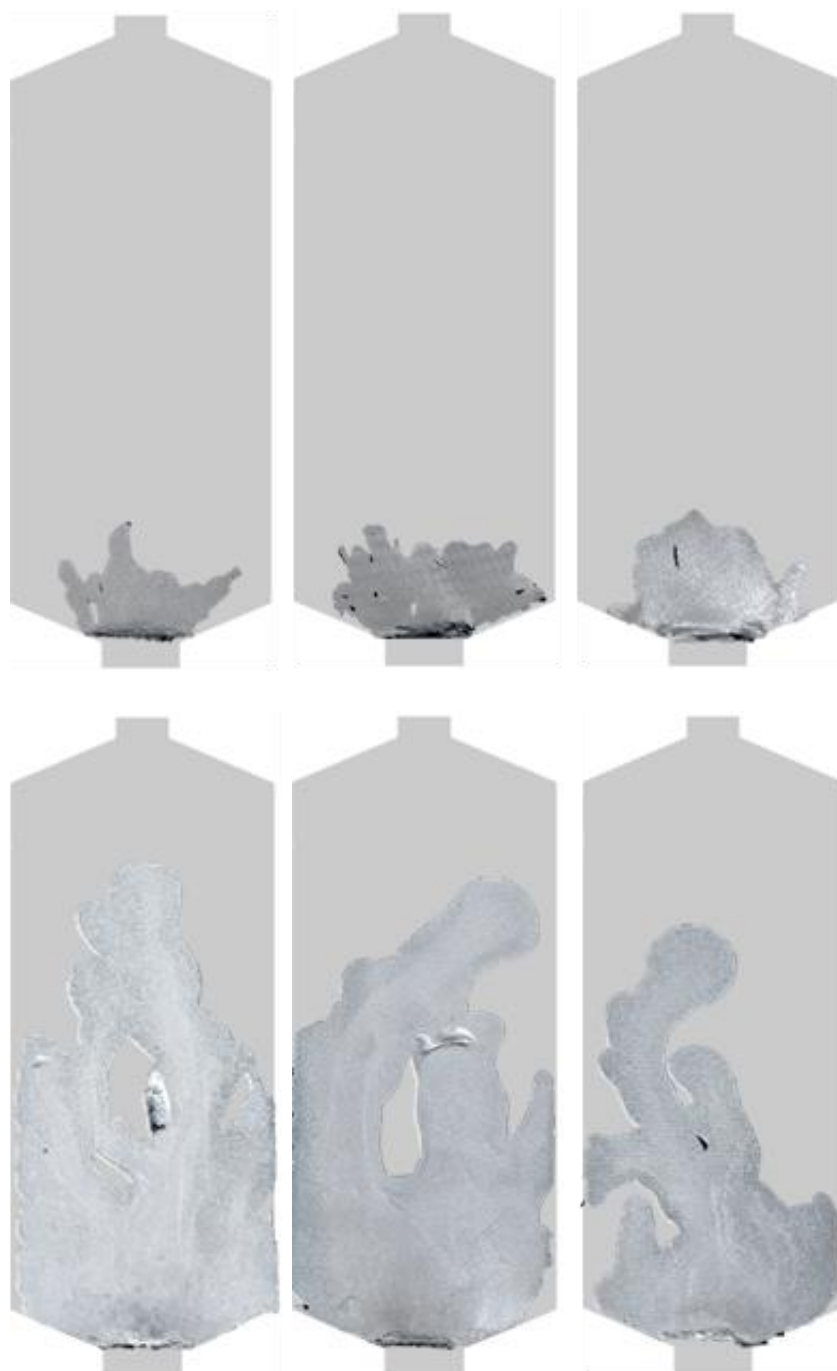
Obr. 5.48 Vliv zabíhavosti na teplotě skořepiny [107]

Zvýšení teploty skořepiny blíží se teplotě solidu slitiny nebyl ani v jedné studii proveden. Pro zvolené testovací těleso uvedené na obr. 5.45 byly provedeny experimentální zkoušky pro slitinu AlSi7Mg0,3 a pro teploty předehřevu skořepiny 300, 550 a 700 °C. Jak je patrné, v tomto experimentu byla testovaná teplota předehřevu skořepiny dokonce nad teplotou likvidu odlévané slitiny. Cílem experimentu bylo zjištění vlivu teploty skořepiny na procentuální podíl zaplněné plochy/objemu u zvoleného testovacího tělesa. Zkoušky eliminovaly vliv licí teploty, která byla zvolena pro všechny zkoušky konstantní v úrovni $690\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$. Jednotlivá testovací tělesa byla následně odstraněna ze vtokového systému, byla naskenována a vyhodnocena pomocí obrazové analýzy, a to na podíl zaplněné plochy – obr. 5.49.



Obr. 5.49 Zjištění zaplněné plochy pomocí obrazové analýzy

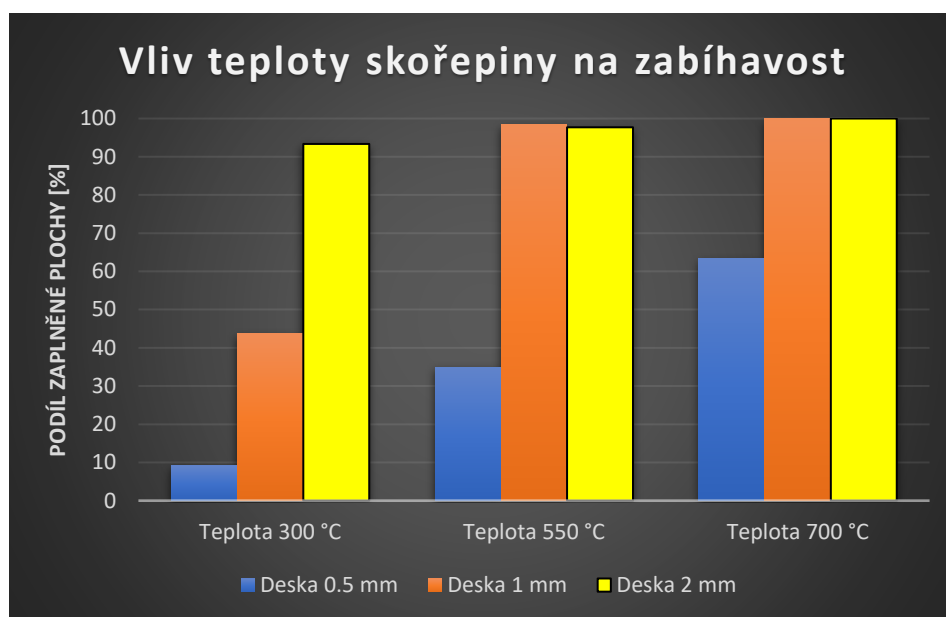
Na jedné licí sestavě byla vždy odlita 4 stejná tělesa a 3 různé tloušťky. Výsledky pro jednotlivé tloušťky stěn byly následně vyhodnoceny. Geometrické tvary „zaprouděného“ kovu pro teplotu skořepiny 300 °C a tělesa 0,5 mm jsou znázorněny na obr. 5.50.



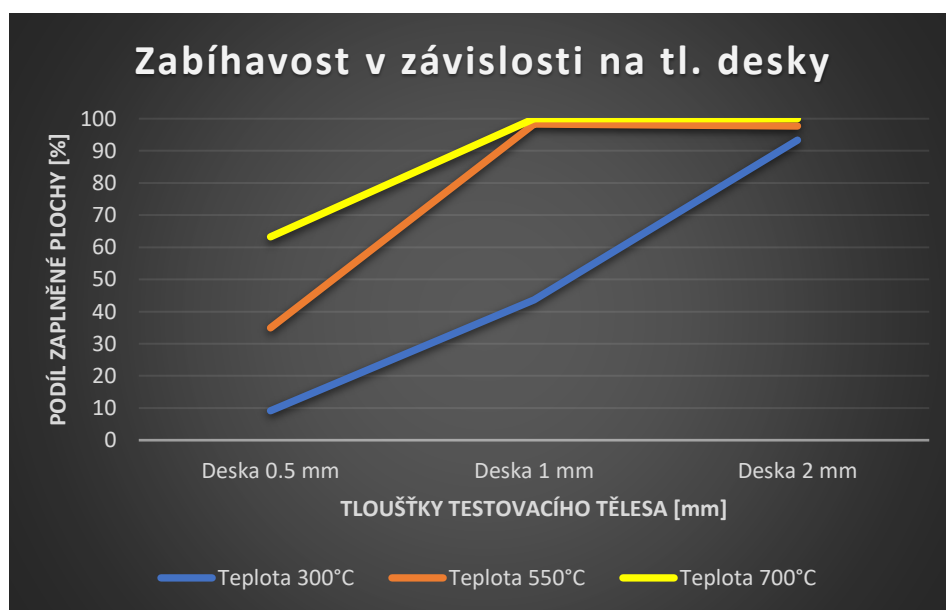
Obr. 5.50 Výsledky experimentálního odlévání zkušební tělesa o tloušťce 0,5 (nahore) a 1 mm (dole) pro teplotu předehřevu skořepiny 300 °C

Jak vyplývá z obrázku 5.50, je pro jednu sestavu částečně rozdílná plocha zaplnění jednotlivých destiček a rovněž tvar zaproudění, přestože destičky jsou umístěny na kříži ve stejné vzdálenosti a plnění je ze stejné metalostatické výšky a stejným průtokem. Rozdíl je daný složitostí proudění, kdy při zvolené šířce destičky se jednotlivé proudy přes sebe „přeskupují“ a následně tuhnou.

Z grafů 5.2 a 5.3 je zřejmé, že ani teplota předehřevu skořepiny nad teplotu odlévání nezabezpečí zaběhnutí destičky o tloušťce 0,5 mm. V tomto případě je zabíhání řízeno zejména povrchovým napětím a případně metalostatickou výškou, která však byla konstantní pro všechny experimenty.



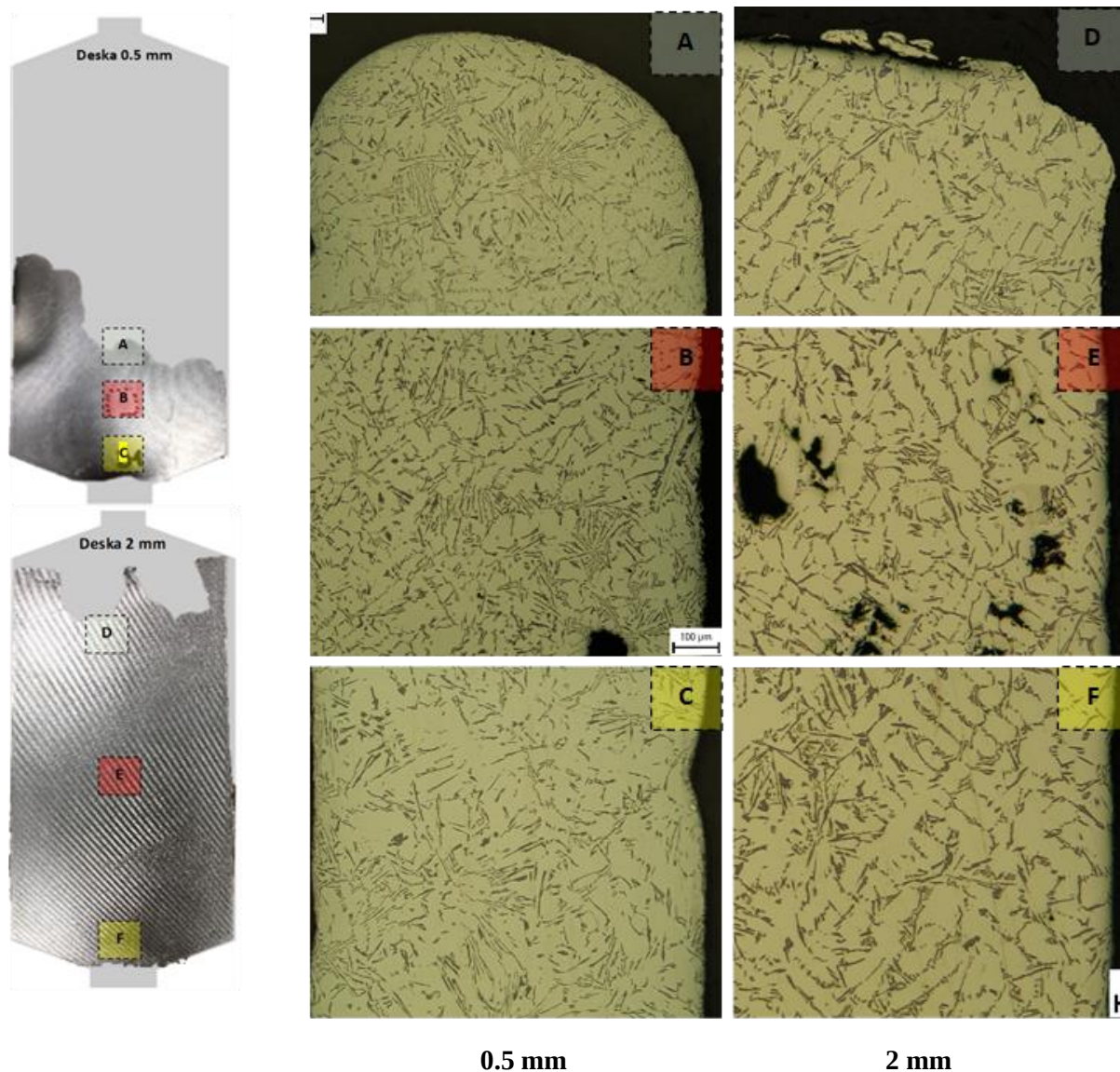
Graf 5.2 Závislost zabíhavosti na teplotě skořepiny



Graf. 5.3 Vizualizace zabíhavosti pro jednotlivá testovaná tělesa

V rámci vlastního výzkumu byly následně metalograficky analyzovány vzorky po výšce testovací destičky – obrázek 5.51. V níže uvedeném případě se jedná o podeutektickou slitinu ENAC- AlSi7Mg0,3 (ENAC42100) odlévanou z teploty 690 °C do keramické skořepiny o teplotě 550 °C. Na provedených výbrusech nebyly v průřezu jednotlivých vzorků nalezeny žádné rozsáhlejší oxidické pleny. V rozsahu několika mikronů byla na čele proudu metalograficky zjištěna tenká oxidická vrstva. Je to zřejmě dáno velmi krátkou dobou oxidace a tím, že dochází postupně k natuhnutí čela a „převalení“ dalšího proudu nezoxidované taveniny ze zářezu. Významnější rozdíl mezi destičkou 0,5 mm a 2 mm je patrný pouze ve velikosti dendritů. Na destičce 0,5 mm je výraznější nahromadění jehlic křemíků v určitých oblastech,

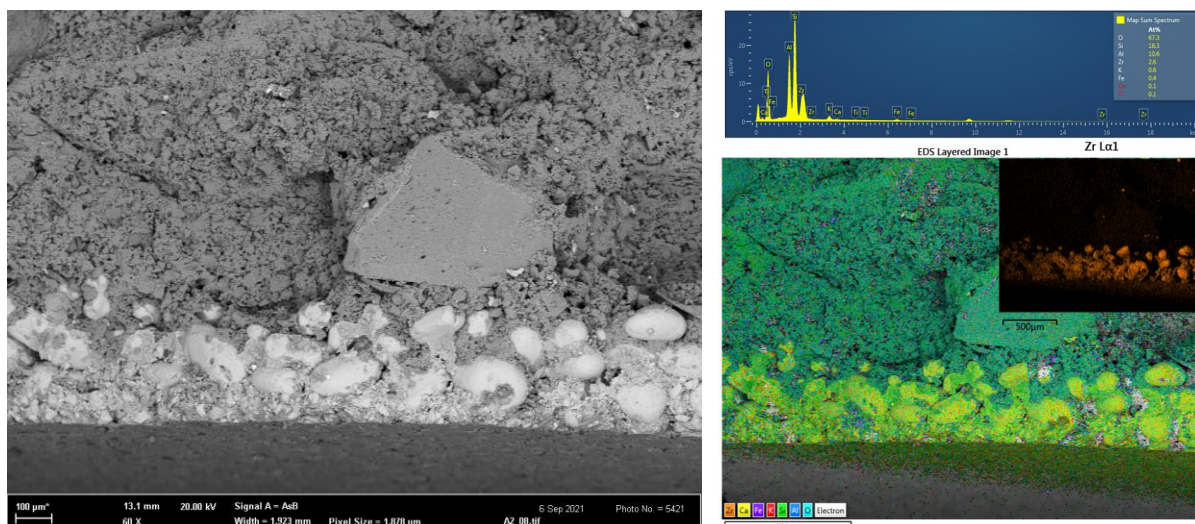
avšak pro vyslovení určitých závěrů je nutné provést další zkoumání vzorků pomocí elektronové mikroskopie.



Obr. 5.51 Metalografické výbrusy pro destičku 0,5 mm a 2 mm

b) Prodyšnost

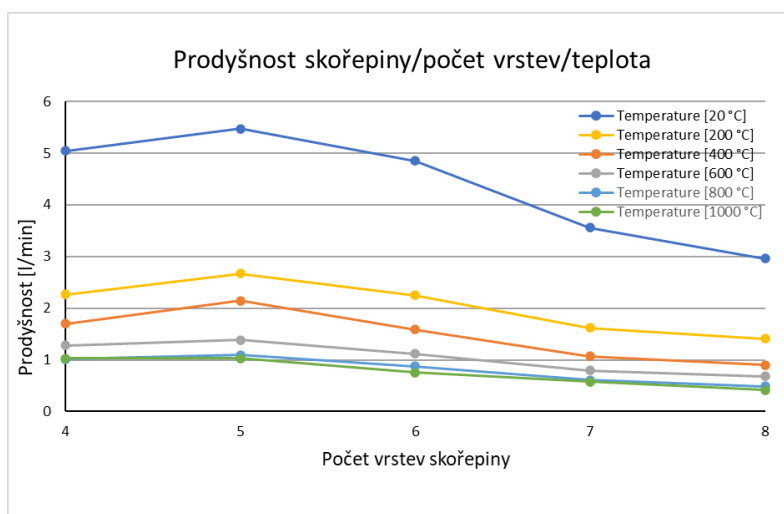
Prodyšnost je důležitou vlastností materiálu keramické skořepiny, která ovlivňuje hodnotu protitlaku plynů ve formě během plnění dutiny formy taveninou. Dobře prodyšná forma tedy umožňuje dobrý odvod plynů z formy a snižuje odpor působící proti proudění taveniny. Významný vliv na prodyšnost má primární vrstva keramické skořepiny, která obsahuje vyšší podíl pevných látek v pojivu a má tedy nižší prodyšnost, než je tomu u následné zesilovací vrstvy. Důležitou roli pro celkovou prodyšnost má celkový počet obalů skořepiny. Obr. 5.52 ukazuje lícní primární vrstvu testované skořepiny, která je tvořena zirkonovou keramikou.



Obr. 5.52 Zobrazení a analýzy primární vrstvy skořepiny vyráběné v rámci experimentů na VUT FSI v Brně [126]

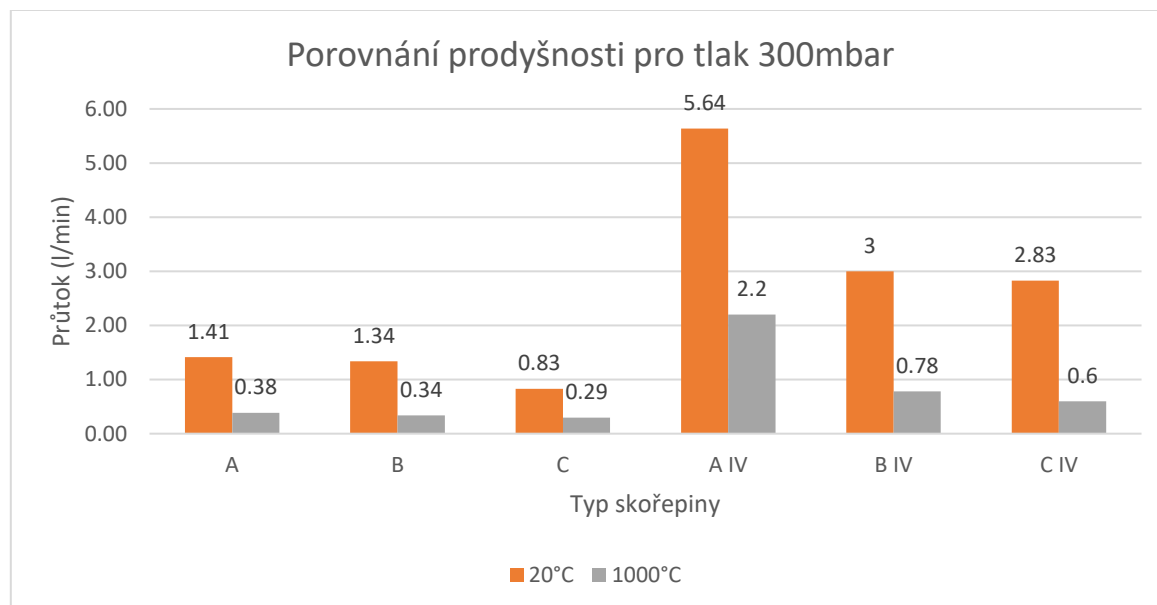
Brezina [127] uvádí, že protitlak plynů ve formě je nepřímo úměrný prodyšnosti $1/K$, kde K je prodyšnost. Snow a kol. [88] hodnotili prodyšnost keramické skořepiny pro tavený oxid křemičitý (fused silica) a hlinitokřemičitan (mollochite) a dospěli k závěru, že tavený oxid křemičitý má vyšší prodyšnost než hlinitokřemičitan. Tento závěr je však diskutabilní, jelikož u zkoumaného keramického systému vždy záleží na zrnitosti, morfologii ostríva a pevných látkách v pojivu. Prodyšnost lze ovlivnit použitím speciálních vláken a případně využitím odvodu keramické formy.

Pro měření prodyšnosti bylo na VUT v Brně v rámci vlastního výzkumu vyvinuto experimentální zařízení, které kombinuje jak měření prodyšnosti v závislosti na teplotě žhání, tak destruktivní tlakový test (burst test), který po naměření prodyšnosti na vzorku měří maximální pevnost v tlaku před prasknutím skořepiny. Na tomto zařízení byla provedena měření, která shrnuje graf 5.4., a to pro různý počet obalů a pro různé teploty [128]. U všech teplot skořepin došlo k navýšení prodyšnosti s pátým obalem, což dosud nebylo vysvětleno a bude nutné provést další analýzy.



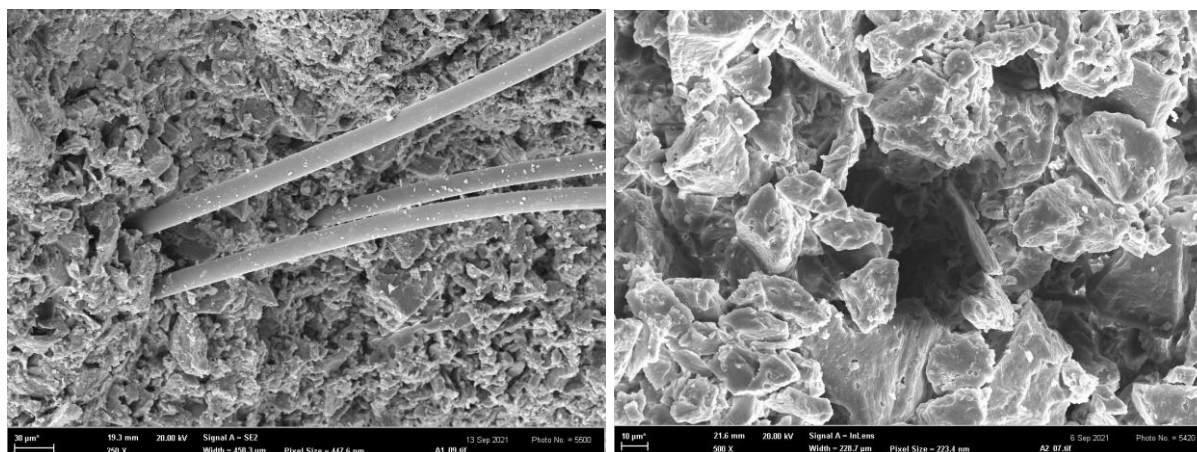
Graf. 5.4 Měření prodyšnosti na keramických skořepinách v závislosti na teplotě

Jak již bylo zmíněno, jednotlivé keramické systémy skořepin vykazují rozdílné prodyšnosti a tím rozdílné odpory, které jsou kladeny proudící tavenině. Graf 5.5 prezentuje rozdíly v jednotlivých keramických systémech, které byly testovány na VUT v Brně v rámci inovačních projektů [126]. Systémy se lišily skladbou primárních a zesilovacích obalů a systém „A“ byl doplněn o organická vlákna, a to jak v primární, tak zesilovací suspenzi.



Graf. 5.5 Prodyšnosti jednotlivých systémů pro teploty 20 °C a 100 °C

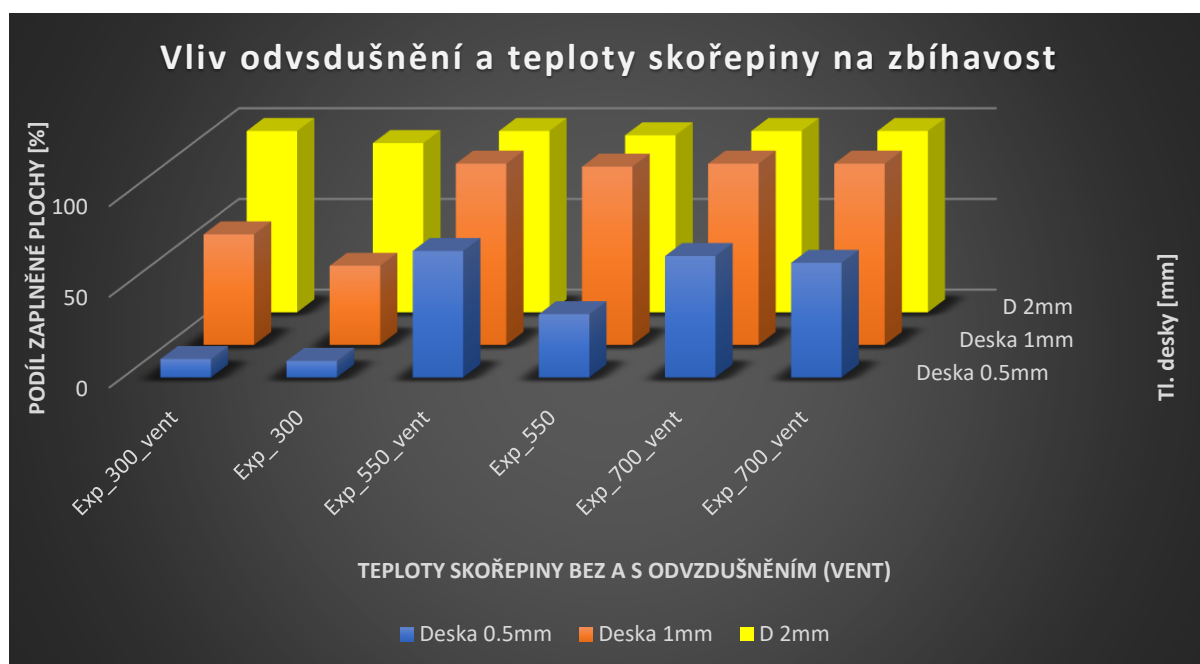
Nejvyšší hodnoty prodyšností byly zjištěny u systému s organickými vlákny, která byla aplikována do zesilovací suspenze. Vlákna v zesilovacím obalu a následná tvorba dutinek po žhání skořepiny je zobrazena na obr. 5.53.



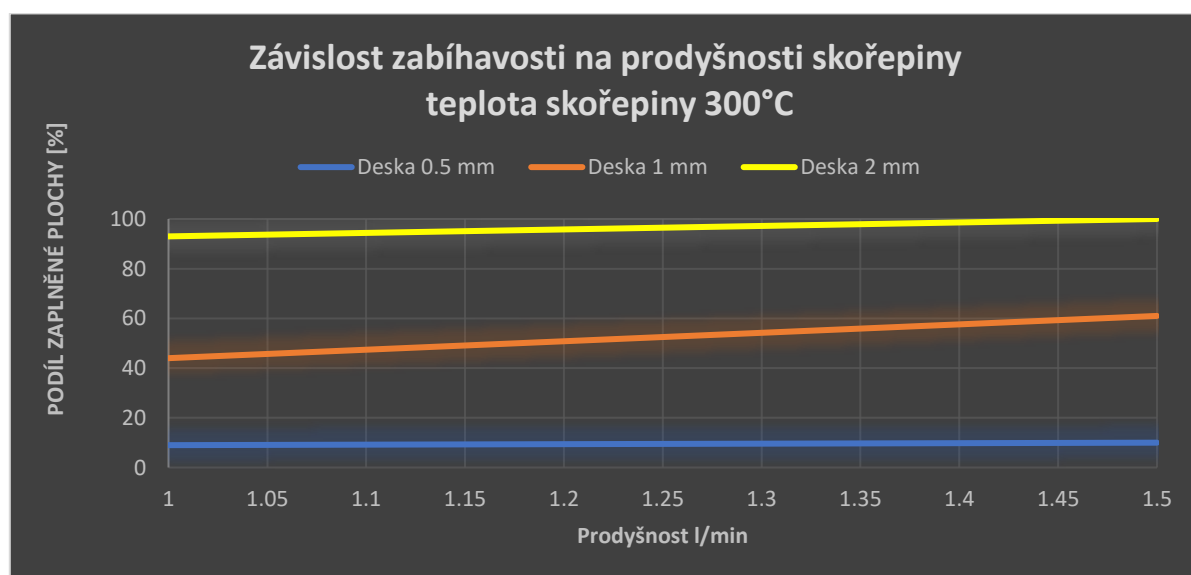
Obr. 5.53 Zobrazení organických vláken před a po žhání keramické skořepiny

V rámci současných experimentů na pracovišti VUT v Brně jsou prováděny testy zabíhavosti pro několik úrovní prodyšnosti skořepiny. Jsou použity systémy s vlákny, zcela neprodyšná skořepina (uzavřená vrstvou tmele – seal coat) a skořepina s odvzdušněním). V době sepsání této práce ještě nebylo provedeno vyhodnocení všech provedených testů. Na ukázkou je v grafu 5.6 vyhodnoceno porovnání standardně vyráběné skořepiny a skořepiny otevřené do atmosféry. Z grafu 5.6 u destičky o tloušťce 0,5 mm vyplývá, že odvzdušnění skořepiny nemělo na vyplnění odlitku žádný vliv u teploty 300 °C a teploty 700 °C. U teploty 550 °C je rozdíl patrný,

ale bude nutné provést další experimenty k potvrzení tohoto zjištění. Každopádně ani u nejvyšší teploty a odvzdušnění nedošlo k odlití celého objemu tělesa (pouze 60 %), což opět potvrzuje dominantní vliv povrchového napětí u této tloušťky. U destičky 1 mm a při teplotě 300 °C je již patrný významný vliv odvzdušnění na zabíhavost (označení „vent“). Je zřejmé, že odpory proti vyplnění dutiny formy taveninou jsou tedy složeny z více složek a odpor vzduchu zde bude již zásadní složkou. U vyšších teplot skořepin a tloušťky stěny odlitku 2 mm není patrný rozdíl mezi skořepinou s odvzdušněním a bez odvzdušnění. Graf 5.7 prezentuje závislost prodyšnosti na podílu zaplnění formy pro jednotlivé testované tloušťky odlitku. Tyto testy budou rozšířeny o další skořepiny s rozdílnou prodyšností, s využitím vláken a jiným počtem obalů, aby byly získány statistiky významnější závislosti u sledovaných parametrů.



Graf. 5.6 Vliv odvzdušnění skořepiny na zabíhavost



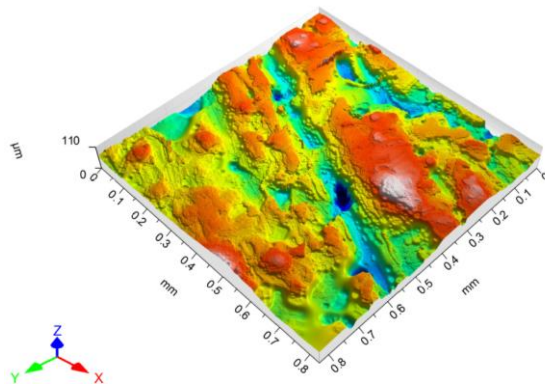
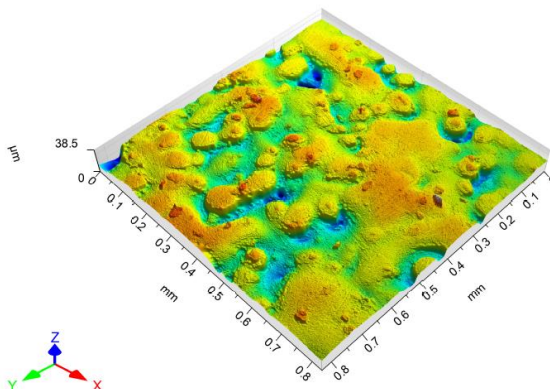
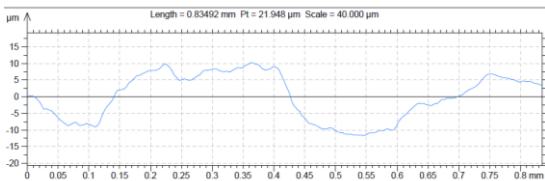
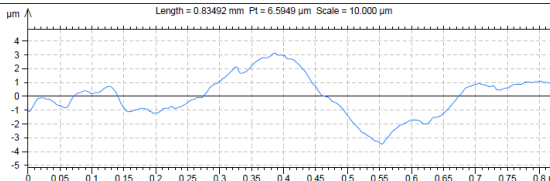
Graf. 5.7 Vliv odvzdušnění skořepiny na zabíhavost pro teplotu skořepiny 300 °C

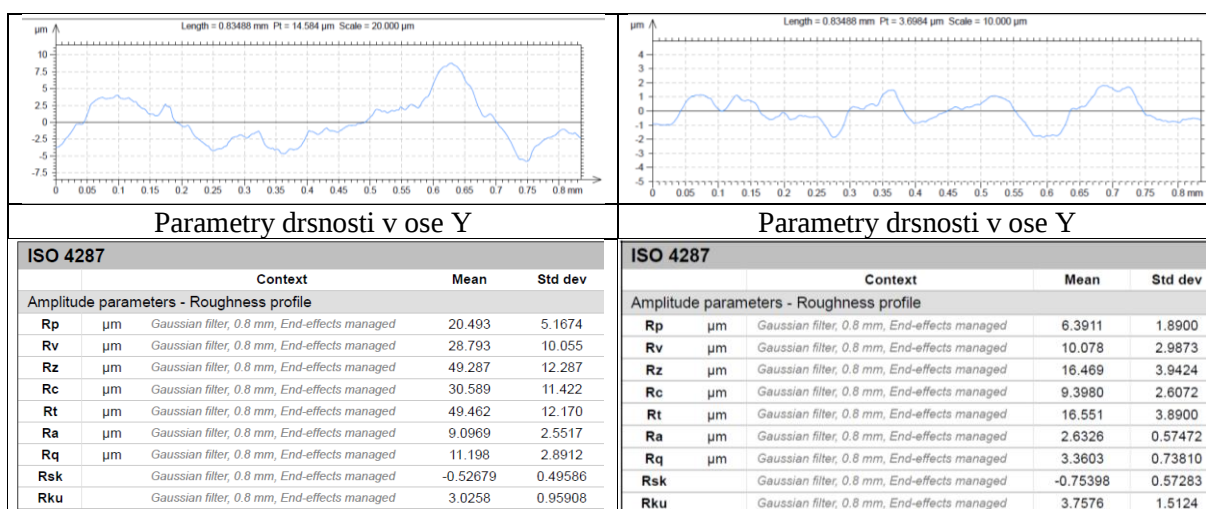
c) Drsnost formy

Drsnost keramické skořepiny je důležitým parametrem nejen co se týče povrchové jakosti odlitků, ale do určité míry může ovlivňovat i zabíhavost slitin. V kapitole 5.3.1 je rozebírán vliv drsnosti substrátu z hlediska kontaktních úhlů. Drsnost rovněž ovlivňuje intenzitu přestupu tepla (HTC koeficient) na rozhraní tavenina/skořepina, a tím ovlivňuje tuhnutí taveniny. Literatura [92] odkazuje na určité práce, které se týkají drsnosti a zabíhavosti, ale spíše ve vztahu k použití nátěrů na pískové formy, které se používají k odlévání Al slitin. Bylo zjištěno, že vyšší drsnosti formy kladou větší odpor proudění taveniny, ale současně snižují HTC a kontaktní úhel, čímž se zabíhavost může zvyšovat.

Drsnost povrchu keramické formy se výrazně mění v případě použití voskových modelů, oproti modelům z 3D tisku, které jsou nyní hojně využívány k rychlé výrobě prototypů, případně pro tvarově velmi komplikované díly. V tab. 5.4 je analýza drsnosti modelu zkoumána pomocí 3D profilometru, který je založen na principu koherenční korelační interferometrie. Měření byla provedena pro voskový model a model tištěný pomocí technologie binder jetting [129].

Tab. 5.4 Vyhodnocení profilů drsnosti pro dvě technologie výroby modelů

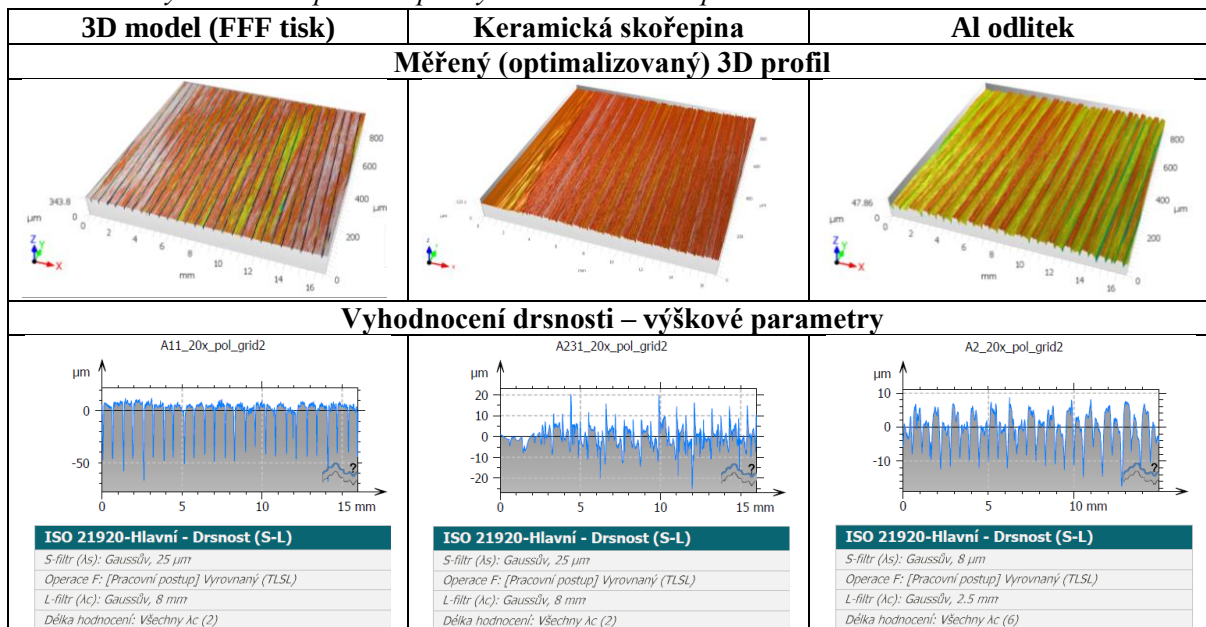
Vzorek A	Vzorek B																																																																																																																								
3D tisk – PMMA (binder jetting)	Voskový model – kovová forma																																																																																																																								
3D model textury vzorku	3D model textury vzorku																																																																																																																								
																																																																																																																									
Základní profil v ose X	Základní profil v ose X																																																																																																																								
																																																																																																																									
Parametry drsnosti v ose X	Parametry drsnosti v ose X																																																																																																																								
<table><tr><th colspan="5">ISO 4287</th></tr><tr><th></th><th></th><th>Context</th><th>Mean</th><th>Std dev</th></tr><tr><td colspan="5">Amplitude parameters - Roughness profile</td></tr><tr><td>Rp</td><td>μm</td><td>Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed</td><td>23.905</td><td>4.6995</td></tr><tr><td>Rv</td><td>μm</td><td>Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed</td><td>37.363</td><td>8.4300</td></tr><tr><td>Rz</td><td>μm</td><td>Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed</td><td>61.267</td><td>9.3446</td></tr><tr><td>Rc</td><td>μm</td><td>Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed</td><td>36.299</td><td>6.8536</td></tr><tr><td>Rt</td><td>μm</td><td>Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed</td><td>61.610</td><td>10.143</td></tr><tr><td>Ra</td><td>μm</td><td>Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed</td><td>11.342</td><td>1.2883</td></tr><tr><td>Rq</td><td>μm</td><td>Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed</td><td>14.252</td><td>1.7696</td></tr><tr><td>Rsk</td><td></td><td>Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed</td><td>-0.63854</td><td>0.42180</td></tr><tr><td>Rku</td><td></td><td>Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed</td><td>3.0898</td><td>1.0218</td></tr></table>	ISO 4287							Context	Mean	Std dev	Amplitude parameters - Roughness profile					Rp	μm	Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	23.905	4.6995	Rv	μm	Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	37.363	8.4300	Rz	μm	Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	61.267	9.3446	Rc	μm	Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	36.299	6.8536	Rt	μm	Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	61.610	10.143	Ra	μm	Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	11.342	1.2883	Rq	μm	Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	14.252	1.7696	Rsk		Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	-0.63854	0.42180	Rku		Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	3.0898	1.0218	<table><tr><th colspan="5">ISO 4287</th></tr><tr><th></th><th></th><th>Context</th><th>Mean</th><th>Std dev</th></tr><tr><td colspan="5">Amplitude parameters - Roughness profile</td></tr><tr><td>Rp</td><td>μm</td><td>Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed</td><td>6.4978</td><td>2.2816</td></tr><tr><td>Rv</td><td>μm</td><td>Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed</td><td>8.9097</td><td>3.2849</td></tr><tr><td>Rz</td><td>μm</td><td>Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed</td><td>15.407</td><td>4.6032</td></tr><tr><td>Rc</td><td>μm</td><td>Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed</td><td>9.1498</td><td>2.6223</td></tr><tr><td>Rt</td><td>μm</td><td>Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed</td><td>15.537</td><td>4.6126</td></tr><tr><td>Ra</td><td>μm</td><td>Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed</td><td>2.6822</td><td>0.65408</td></tr><tr><td>Rq</td><td>μm</td><td>Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed</td><td>3.3345</td><td>0.84969</td></tr><tr><td>Rsk</td><td></td><td>Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed</td><td>-0.53273</td><td>0.53335</td></tr><tr><td>Rku</td><td></td><td>Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed</td><td>3.2073</td><td>1.7899</td></tr></table>	ISO 4287							Context	Mean	Std dev	Amplitude parameters - Roughness profile					Rp	μm	Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	6.4978	2.2816	Rv	μm	Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	8.9097	3.2849	Rz	μm	Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	15.407	4.6032	Rc	μm	Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	9.1498	2.6223	Rt	μm	Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	15.537	4.6126	Ra	μm	Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	2.6822	0.65408	Rq	μm	Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	3.3345	0.84969	Rsk		Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	-0.53273	0.53335	Rku		Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	3.2073	1.7899
ISO 4287																																																																																																																									
		Context	Mean	Std dev																																																																																																																					
Amplitude parameters - Roughness profile																																																																																																																									
Rp	μm	Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	23.905	4.6995																																																																																																																					
Rv	μm	Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	37.363	8.4300																																																																																																																					
Rz	μm	Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	61.267	9.3446																																																																																																																					
Rc	μm	Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	36.299	6.8536																																																																																																																					
Rt	μm	Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	61.610	10.143																																																																																																																					
Ra	μm	Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	11.342	1.2883																																																																																																																					
Rq	μm	Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	14.252	1.7696																																																																																																																					
Rsk		Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	-0.63854	0.42180																																																																																																																					
Rku		Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	3.0898	1.0218																																																																																																																					
ISO 4287																																																																																																																									
		Context	Mean	Std dev																																																																																																																					
Amplitude parameters - Roughness profile																																																																																																																									
Rp	μm	Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	6.4978	2.2816																																																																																																																					
Rv	μm	Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	8.9097	3.2849																																																																																																																					
Rz	μm	Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	15.407	4.6032																																																																																																																					
Rc	μm	Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	9.1498	2.6223																																																																																																																					
Rt	μm	Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	15.537	4.6126																																																																																																																					
Ra	μm	Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	2.6822	0.65408																																																																																																																					
Rq	μm	Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	3.3345	0.84969																																																																																																																					
Rsk		Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	-0.53273	0.53335																																																																																																																					
Rku		Gaussian filter, 0.8 mm, End-effects managed	3.2073	1.7899																																																																																																																					
Základní profil v ose Y	Základní profil v ose Y																																																																																																																								



U zkoumané metody 3D tisku (BJ) se průměrná aritmetická odchylka profilu drsnosti Ra pohybuje v rozmezí 9.1–11.3 µm (osa Y, X) a u vstříkovaného voskového modelu 2.6 µm (v obou osách). Znamená to tedy výrazný rozdíl v drsnosti modelu, která se bude dále přenášet na skořepinu a finální odlitek.

Další experimentální studie navazovala na předchozí výsledky a profily povrchu byly měřeny jak pro 3D tištěný model a skořepinu, tak pro odlitek. V tomto případě byla metodou 3D tisku zvolena metoda FFF (Fused Filament Fabrication), která je využívána pro rychlé prototypování a velmi levnou výrobu modelů. Pro měření bylo využito optické snímání topografie povrchu přístrojem Alicona InfiniteFocus 5G. Tab. 5.5 níže shrnuje zjištěné hodnoty profilů drsnosti.

Tab. 5.5 Analýza drsnosti povrchů pro systém model–skořepina–odlitek



Výškové parametry			Výškové parametry			Výškové parametry		
Rq	12.96	μm	Rq	5.072	μm	Rq	4.554	μm
Rsk	-2.731		Rsk	-0.1076		Rsk	-0.7805	
Rku	9.783		Rku	4.946		Rku	3.484	
Rt	80.29	μm	Rt	45.74	μm	Rt	26.18	μm
Rpt	12.01	μm	Rpt	20.39	μm	Rpt	8.730	μm
Rp	10.71	μm	Rp	20.00	μm	Rp	7.670	μm
Rvt	68.27	μm	Rvt	25.34	μm	Rvt	17.45	μm
Rv	67.62	μm	Rv	22.74	μm	Rv	13.58	μm
Rzx	78.98	μm	Rzx	44.94	μm	Rzx	24.97	μm
Rz	78.33	μm	Rz	42.74	μm	Rz	21.25	μm
Ra	7.822	μm	Ra	3.800	μm	Ra	3.549	μm

V tab. 5.5 je mapována změna drsnosti v přechodu z tištěného modelu do povrchu skořepiny a následně až po finální odlitek. Je patrné, že v keramické skořepině dochází k eliminaci schodovité struktury vzniklé aditivní technologií metodou FFF, a to až na polovinu Ra ve finálním odlitku.

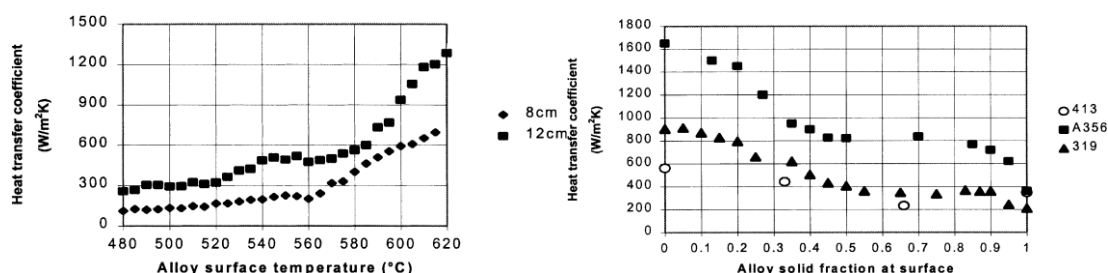
Vliv drsnosti na zabíhavost u IC technologie a speciálně na schopnost vyplnit detaily nebyl dosud studován. Byly provedeny určité výzkumné práce, které řeší vlivy nátěrů u pískových forem, ale spíše s ohledem na prostup tepla. Toto je tedy další téma, které je silně inovativní a bude vhodné se na něj zaměřit v dalším výzkumu.

d) Materiál keramické skořepiny

Vzhledem k tomu, že schopnost proudit (flowability) je řízena přenosem tepla, bude mít na zabíhavost vliv několik parametrů ovlivňujících tyto tepelné děje. Jedná se o koeficient přestupu tepla na rozhraní tavenina/keramická forma, termofyzikální vlastnosti formy a emisivitu skořepiny.

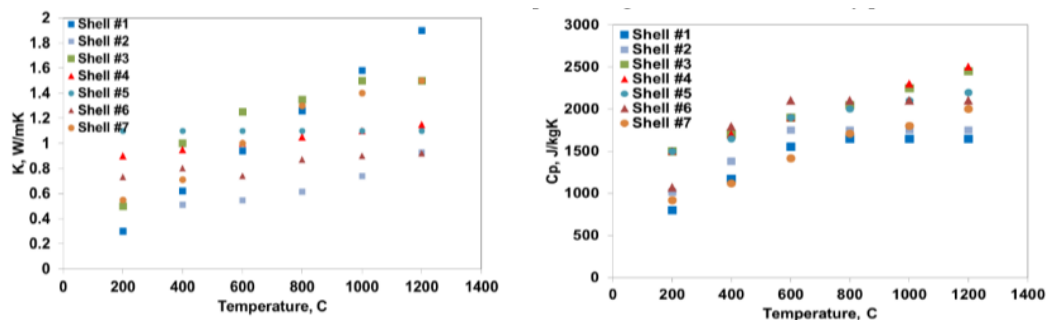
Součinitel přestupu tepla na rozhraní tavenina–forma je teplotně závislý, ovlivněný kontaktním tlakem, jednotlivými materiály odlitku i formy a charakterem stykové plochy, tj. drsností povrchu. Pokud se uvažuje plochý hladký povrch mezi kovem a skořepinou, kde celý povrch je v dobrém kontaktu, dá se předpokládat vysoký součinitel přestupu tepla α , často označovaný jako HTC (Heat Transfer Coefficient). Je-li však povrch drsnější, dochází ke kontaktu mezi povrchy pouze na vrcholech nerovností, očekáváme i nižší hodnotu koeficientu HTC. Toto chování zaznamenal i Campbell u odlévání horizontálně umístěných desek [75].

Browne a kol. velmi podrobně studovali průběh koeficientu tepla pro jednotlivé slitiny v systému AlSi–skořepina [130]. Na obr. 5.54 je záznam HTC v závislosti na teplotě a podílu tuhé fáze.



Obr. 5.54 HTC v závislosti na teplotě a FS pro slitinu AlSi5Cu3

Termofyzikální parametry skořepin, jako jsou tepelná vodivost, hustota a měrná tepelná kapacita, jsou rozdílné pro jednotlivé materiály posypů skořepiny. Termofyzikální data pro jednotlivé systémy velmi podrobně popisuje práce týmu Xu, Lekah a Richards publikovaná v [131] – obr. 5.55. Je zde patrná značná variabilita jak v tepelné vodivosti, tak v měrné tepelné kapacitě jednotlivých systémů. Tato práce je výjimečná v tom, že porovnává tyto vlastnosti nejen na jednotlivých sypaných materiálech, ale přímo na vyrobených skořepinách a kombinacích primárních a zesilovacích obalů.



	Prime coat		Backup coat		Seal coat	Firing temperature, °C
	Slurry	Stucco	Slurry	Stucco	Slurry	
Shell #1	Fused silica + Zircon	Fused silica	Fused silica	Fused silica	Fused silica	850
Shell #2	Fused silica + zircon	Zircon	Fused silica	Fused silica	Fused silica	982
Shell #3			Fused silica			850
Shell #4			Alumina + silica			850
Shell #5			Alumina			850
Shell #6	Fused silica + zircon	Aluminosilicate	Aluminosilicate + fused silica	Aluminosilicate + fused silica	Aluminosilicate + fused silica	850
Shell #7			Zircon + aluminosilicate (rapid shelling process)			850

Obr. 5.55 Termofyzikální vlastnosti keramických systémů

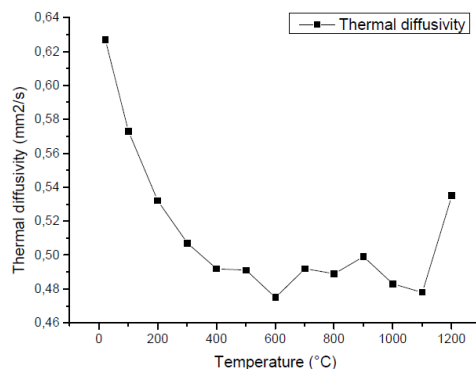
Vliv těchto parametrů lze u nestacionárních dějů vyjádřit koeficientem teplotní vodivosti:

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} [m^2 \cdot s^{-1}] \quad (5.17)$$

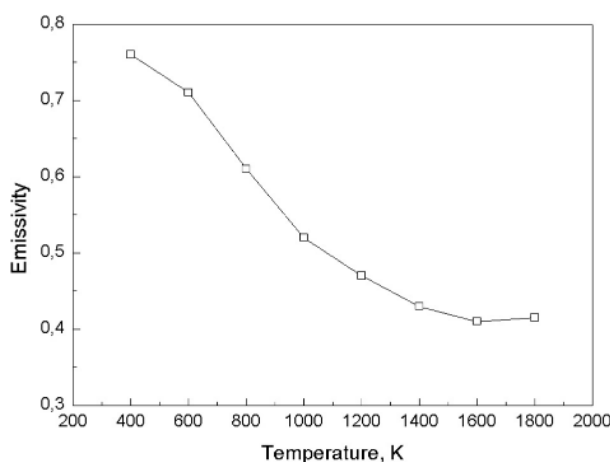
Kde:

- λ je tepelná vodivost [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
 ρ je hustota [$kg \cdot m^{-3}$]
 c_p měrná tepelná kapacita [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]

Podle hodnoty součinitele teplotní vodivosti lze usuzovat na rychlost změny teploty v určitém místě materiálu v důsledku změny jeho povrchové teploty. Snížením teplotní vodivosti a tedy zvýšením izolačního účinku materiálu formy se zabíhavost může zvyšovat. Obr. 5.56 zachycuje závislost teplotní vodivosti na teplotě. V práci [88] je uvedeno, že pro tenkostěnné odlitky je vhodnější tavený oxid křemičitý než skořepina vyrobená z aluminosilikátu, případně zirkonu, a to s ohledem na nižší tepelnou kapacitu. Tepelná kapacita taveného oxidu křemičitého dosahuje hodnoty 78 % $ZrSiO_4$, který se často používá v primárních vrstvách keramických skořepin. Snow [88] také odkazuje na práci provedenou v Rolls Royce, kde výsledky ukázaly, že vyplnění tenké části odlitku bylo nejlépe dosaženo použitím taveného oxidu křemičitého jako primární vrstvy, následovaného aluminosilikátem, $ZrSiO_4$ a oxidem hlinitým.



Obr. 5.56 Teplotní vodivost keramické skořepiny v závislosti na teplotě pro ZrSiO_4 primární vrstva + aluminosilikát zesilovací vrstvy [86]



Obr. 5.57 Závislost emisivity na teplotě pro aluminosilikát [132]

Významný podíl při přestupu tepla v systému tavenina/skořepina hraje emisivita, jejíž význam narůstá s teplotou skořepiny. V literatuře uváděná emisivita je naznačena na obr. 5.57. Prostup tepla v technologii IC je dále ovlivněn tzv. vzájemným osáláváním, které je dáno pozicí jednotlivých odlitků na licím stromečku, použitím izolací atd. Tímto tématem se zabýval Roučka a kolektiv v práci [133]. V provedené práci je studován vliv izolace a vzájemného osálávání na posunutí tepelné osy v odlitku a vliv na typ a velikost zrn testovacích odlitků.

e) Tloušťka keramické skořepiny

Chandraseckariah a kol. [84] předložili studii o účincích tloušťky skořepiny na zabíhavost pro testovací geometrii ve tvaru turbínové lopatky odlévané ve vakuu ze slitiny na bázi Ni. Byl pozorován nelineární vztah mezi tloušťkou skořepiny a zabíhavostí. Pozorovali pokles zabíhavosti s nárůstem tloušťky skořepiny, ale pouze do určité tloušťky. Trend byl obdobný pro různé teploty formy. Odlévání bylo v uvedené studii prováděno ve vakuu (13 Pa).

5.2.5 Vliv tvaru odlitku a zabíhavost v tenkých stěnách

Tvar odlitku z hlediska technologičnosti konstrukce byl rozebírán v kapitole 4.1. U tenkostěnných odlitků je významným faktorem způsob tuhnutí odlitků během proudění taveniny (kapitola 5.3.1). Z rovnice (5.2) je zřejmé, že čím delší je doba tuhnutí τ , tím větší vzdálenost může kov urazit před ztuhnutím. Prodloužení doby do ztuhnutí proudu kovu je optimálnější způsob podpory zabíhavosti než zvyšování rychlosti proudění, které vede

k větší turbulenci kovu. Pro podmínky, ve kterých materiál formy řídí rychlost odvodu tepla, je dle Flemingse [78] doba do ztuhnutí dána vztahem 5.18 (značení viz rovnice 5.5):

$$\tau = \frac{\pi}{4\lambda_M \rho_M c_M} \left\{ \frac{V}{S} \right\}^2 \left\{ \frac{\rho_S H}{(T_C - T_M)} \right\} \quad (5.18)$$

V rovnici jsou rozměry odlitku charakterizovány pomocí poměru V/S , jak je ve slévárenské terminologii označován modul odlitku.

V případech, kde je pro přestup tepla dominantní koeficient přestupu tepla, lze rovnici zjednodušit do vztahu 5.19.

$$\tau = \frac{\rho_S H V}{\alpha (T_C - T_M) S} \quad (5.19)$$

a) Modul odlitku

Vliv tloušťky a tvaru kanálu (stěny) na dobu tuhnutí kovu je možné vyjádřit pomocí modulu M jako poměr „objemu k ochlazované ploše“ odlitku [73].

Zjednodušením rovnice (5.18) lze uvést tvar:

$$\tau = k_M M^2 \quad (5.20)$$

kde k_M je konstanta tuhnutí, kterou lze stanovit experimentálně a je v jednotkách $s \cdot m^{-2}$. Vztah platí tam, kde je tepelný tok z odlitku řízen tepelnou vodivostí formy (spíše masivní odlitek v pískové formě). Pro případ, kdy tepelný tok řídí přenos tepla na rozhraní (tepelný odpor / koeficient přestupu tepla), jako je v kokilách nebo tenkostěnných odlitcích, se rovnice (5.20) upraví do vztahu:

$$\tau = k_i M / \alpha \quad (5.21)$$

kde k_i je konstanta tuhnutí a α je koeficient přestupu tepla. Campbell [73] úpravou rovnic a dosazením do (5.21) uvádí vztah pro tenkostěnné odlitky a délku zaproudění ve znění:

$$\frac{L}{M} = \frac{k_i v}{\alpha} \quad (5.22)$$

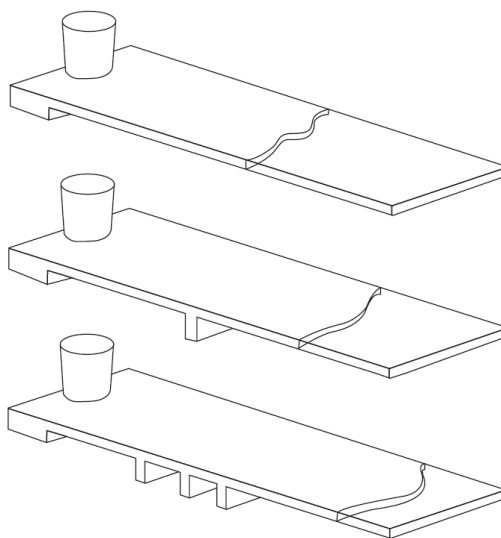
Použití výše uvedené rovnice na tenkostěnné pískové odlitky ukazuje, že poměr zabíhavosti k modulu L/M je pro daný materiál formy konstantní. Například u slitin hliníku odlévaných do pískových forem s tenkým průřezem zkušenosti ze sléváren ukazují, že poměr zabíhavosti k tloušťce průřezu je kolem 100 (tj. tloušťka průřezu 4 mm by měla umožnit, aby kov tekl 400 mm před ztuhnutím). Tento poměr je jiný u odlévání do kokil nebo do keramických forem. Přínos konceptu modulu spočívá v tom, že lze mezi sebou porovnávat jednotlivé geometrické tvary kanálů (průřezů).

b) Tvar odlitku pro zvýšení zabíhavosti

V předchozích odstavcích byla zabíhavost a její ovlivnění probíráno zejména z pohledu vlastního materiálu odlitku, případně formy. Slévárenská technologie umožňuje ovlivnit proudění i pomocí tvaru modelu, případně správným umístěním vtokového systému. Na obr. 5.57 je ilustrativně znázorněna délka zaproudění pro tenkostěnný odlitek desky a použití tzv. „přetoků“. Tento systém představil Hiratsuka ve svých studiích k zabíhavosti v roce 1998 [134]. U těchto průřezů demonstroval, že ochlazený kov může vniknout do přetoku a další

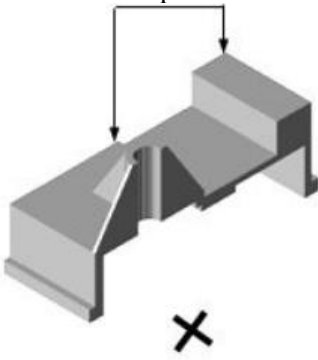
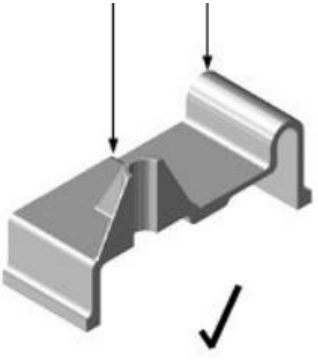
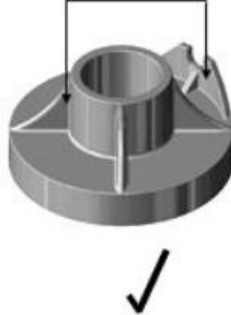
plnění je řízeno „čerstvým“ kovem. Tento způsob byl ověřován zejména u tenkostěnných odlitků odlévaných do pískových forem (původně odlévání litinových odlitků).

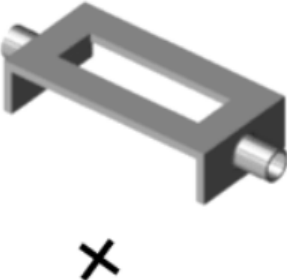
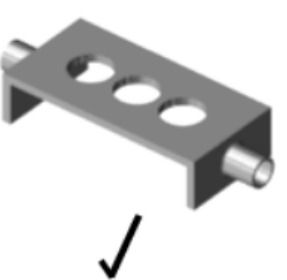
Použití technologických žeborů pro řízení proudění je ve slévárenské praxi hojně využíváno, zejména u kovů se špatnou zabíhavostí. V tab. 5.6 níže jsou ukázky některých úprav odlitků, které vedou ke zlepšení zabíhavosti tenkostěnných odlitků. Geometrie odlitků uvedené v tab. 5.6 byly použity ze zdroje [135].



Obr.5.57 Zvýšení zabíhavosti tenkostěnných odlitků pomocí systému „přetoků“ [134].

Tab. 5.6 Možnosti změny tvaru odlitku za účelem zvýšení zabíhavosti

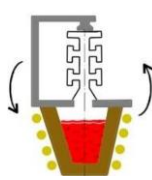
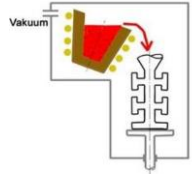
Popis	Nevhodné	Vhodnější
Tvar odlitku musí umožnit rychlé zaplnění tvaru bez tvorby turbulencí při proudění taveniny. Zaoblené přechody a jednotné tloušťky sekcí (stěn) jsou nutnou podmínkou.	Ostré rohy způsobují turbulenci a roztrhání proudu kovu 	Zaoblené rohy – stejná tl. sekce 
Výstupky a náboje je obtížné zaplnit. Žebrování a náběhy pomáhají zaplnit daný tvar a zvyšují tuhost celé součásti.	Obtížně zaplnitelné 	Přídavná žebrování, náběhy 

Dlouhá vybrání a odlehčení způsobí nerovnoměrné rozložení teplotních polí a rozdělení proudu taveniny. Navíc kruhové otvory snižují vrubový účinek ostrých rohů u obdélníkového vylehčení.		
---	---	---

6. TECHNOLOGIE ODLÉVÁNÍ TENKOSTĚNNÝCH ODLITKŮ METODOU INVESTMENT CASTING

Technologie keramických skořepin využívá řadu způsobů plnění dutiny formy, a to s ohledem na odlévaný materiál, tvarovou náročnost odlitku a požadavky na kvalitu odlévaných dílů. V tab. 6.1 je uveden souhrn nejdůležitějších technologií..

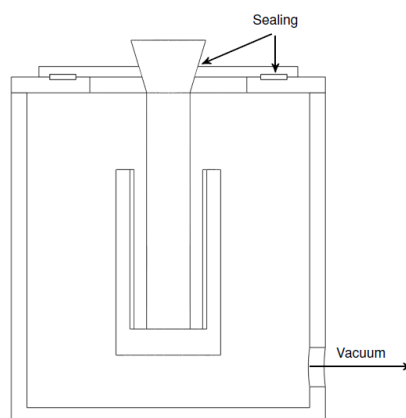
Tab. 6.1 Přehled technologií používaných v IC [136]

Název technologie lití	Schéma	Popis
Gravitační lití		- Technologie odlévání na vzduchu - Možno odlévat z lící pánve nebo přímo z tavicí pece - Kov ve styku s okolní atmosférou – nebezpečí oxidace - Technologie citlivá na lidský faktor – rozdílný způsob odlévání - U Al odlitků možné využití spodního plnění
Sklopné lití		- Kov je nataven ve speciální otočné peci, na jejíž víko je přiložena a utěsněna keramická skořepina - Otočením pece dojde k naplnění dutiny skořepiny - Jedná se o tzv. kontaktní lití – eliminace strhávání a nasávání vzduchu - Předpoklad usměrněného tuhnutí – plnění vždy přes lící nálevku
Tavení a odlévání ve vakuu		- Tavení a odlévání ve vakuu (nutné pro reaktivní prvky) - Vysoká čistota odlévaných materiálů (nízký obsah O a N) - Použití jednorázových tavicích kelímků – eliminace kontaminace taveniny - Použití především u superslitin - Moderní dvoukomorové agregáty – 10^{-4} mbar
Odstředivé lití		- Jedná se o vertikální odstředivé lití - Kov vyplňuje dutinu pomocí odstředivé síly - Použití u Ti slitin, kde teplota skořepiny je snížena na 150–300 °C - Odlévání tenkostěnných odlitků
Vakuové nasávání (Hitchiner Process) CLA (Chandler-Lamb Air) CLV (Chandler-Lamb Vacuum)		- CLA – forma je umístěna nad kelímkem s roztaveným kovem, který se do skořepiny nasaje pomocí podtlaku - Po ztuhnutí odlitků se uvolní podtlak a neztuhlý kov z lícího systému vytéká zpět do kelímku, což umožňuje vysoké využití kovu - Určeno pro slitiny Al, Ni, Fe - Metoda CLV je rozšířena o tavení kovu ve vakuu (dvoukomorový systém) - CLV – pro slitiny, které vyžadují tavení ve vakuu – Ni, Ti, Co - Držitel patentu uvádí odlití tenkostěnných odlitků až do stěn 0,28–0,9 mm

6.1 Technologie asistovaného vakua a vakuové nasávání

Vakuové odlévání, které nemůžeme zaměňovat s tavením ve vakuu, se velmi často nazývá technologie asistovaného vakua. Je to určitá inovace, kterou lze použít u standardního gravitačního odlévání a která napomáhá odstranění plynů z dutiny skořepiny a překonání odporů vůči proudění. Existují dvě základní metody v závislosti na tom, zda je tavenina nalévána ve směru gravitace, nebo nasávána proti směru gravitace. Obě metody prokazatelně zlepšují zabíhavost [76].

Na obr. 6.1 je naznačen princip asistovaného vakua při gravitačním lití. Skořepina je vložena do utěsněného boxu (může být vložena i do perforovaného rámu) a během odlévání je vzduch vysáván spodní částí. Přes vtokový systém působí atmosférický tlak a odpor vzduchu, případně plynů, je minimalizován použitím vakua v dutině formy. Tímto způsobem je zvýšena jak schopnost taveniny proudit, tak schopnost vyplňovat tenké průřezy dutiny formy. Částečné vakuum je možné udržovat i během tuhnutí.



Obr. 6.1 Technologie asistovaného vakua [137]

Sin a kol. [76] prokázali efekt vakuově asistovaného lití hořčíkových zkušebních spirál o tloušťce 1,6 mm. Odlitek bez asistovaného vakua nebyl gravitačně při zvolených podmínkách nikdy zcela zaběhnutý, zatímco forma s použitím vakua byla kompletně vyplněna kovem. Vainer a kol. [138] využili pomoc částečného vakua při odlévání CuAlNi slitiny. Pro odlévání bronzu použili děrovaný rám, ve kterém měnili propustnost plochy. Měnili rovněž tlak vakua a zkoumali, jak tyto parametry ovlivňují zabíhavost. Jako testovací tělesa použili spirálu s tloušťkou 2 a 3,8 mm. Zjistili, že při pětinasobném zvýšení aktivní vakuové oblasti (plochy rámu) byla pozorována třikrát lepší zabíhavost. Zvýšená zabíhavost 1,2 až 1,5krát byla rovněž prokázána, když se účinnost čerpadla zvýšila 1,4krát. Matsuna a kol. [139] zvolil asistované vakuum pro odlévání tenkostěnného ocelového oběžného kola o hmotnosti 22 kg. V této práci uvádí, že s asistovaným vakuem (26,6 kPa) bylo možné odlévat tloušťku stěny tenké lopatky o rozměru 0,9 mm.

Capadona a kol. [77] uvádí, že vakuovací kanál by měl být umístěn přibližně ve dvou třetinách po straně rámu (pláště). Pokud je podtlakový kanál umístěn na dně komory, existuje riziko, že účinek podtlaku bude na místě, kde není potřeba, tedy na dně formy, kde tlaková výška má svůj maximální účinek. Umístěním kanálu do vyšší pozice zabezpečíme efektivnější funkci celého systému.

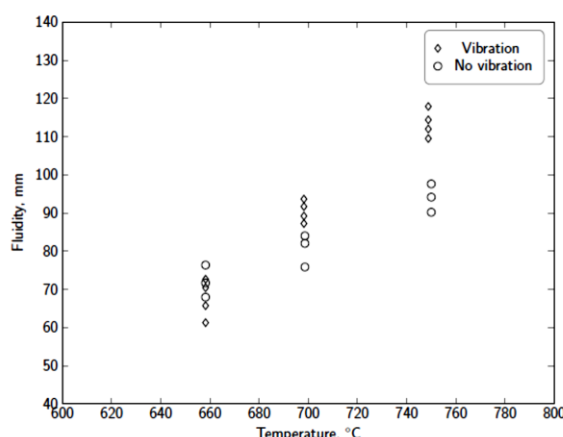
Technologie CLA využívá podtlak nebo vakuum k nasávání taveniny do dutiny formy. Mezi velkou výhodou této technologie patří možnost přesného řízení zaplňování dutiny formy,

minimalizace turbulencí a tím omezení vzniku slévárenských vad. Další výhodou je maximalizace využití tekutého kovu, kdy po ztuhnutí odlitků a uvolnění vakua je kov vrácen zpět do pánve. Lze rovněž použít menší počet obalů skořepiny a vložit ji do boxu se suchým pískem, který následně zaručuje pevnost během lití.

Hitchiner proces je metoda proti gravitačnímu lití vyvinutá pro technologii IC a patentovaná společností Hitchiner Manufacturing Co., Inc. Milford a označovaná jako CLV [140]. Při této metodě se slitina taví v indukční peci. Předehřátá forma je umístěna v komoře nad pecí a tlakový rozdíl dosažený použitím vakua využívá plnění směrem nahoru. Chandley a kol. [141] uvádějí odlití prototypu výstupní vodící lopatky pro proudový motor o tloušťce stěny 0,375 mm. Jedná se o poměrně malý odlitek, ale CLV prokázala velmi vysokou účinnost. Je nutné uvést, že u všech těchto metod, které využívají nasávání, je nutné zajistit dobrou prodyšnost skořepin.

6.2 Technologie asistované vibrace

Použití vibrací se ukázalo jako další možný způsob pro zvýšení zabíhavosti při odlévání tenkostěnných odlitků. A. Karem a kol. [71] zkoumali vliv vibrací při odlévání hliníkových slitin. Obr. 6.2 demonstruje pozitivní vliv vibrace na zabíhavost, a to zejména při vyšších teplotách lití. Flemings [68] spojuje zvýšení zabíhavosti s využitím vibrace se zvýšením tlakové výšky přidavným zrychlením.



Obr. 6.2 Ilustrace efektu s využitím vibrace během odlévání lití [71]

Někteří autoři nesouhlasí s vysvětlením přidavného zrychlení taveniny, ale spíše s tím, že vibrace působí rozrušení určitých spojení (oxidické pleny na povrchu, zárodky) v proudící tavenině. Během vibrací se vazba mezi sousedními zárodky přeruší a tavenina má nižší viskozitu. Při nižších teplotách vazba zesílí a vibrace tak nejsou schopny rozbít tato spojení na menší části. U Al slitin to znamená, že povrch oxidu je porušen, a proto dává tavenině nižší viskozitu.

7. SIMULACE TECHNOLOGIE INVESTMENT CASTING

Numerická simulace slévárenských procesů je v současné době zpracována pro většinu běžně používaných technologií výroby odlitků. Jedná se zejména o technologie gravitačního odlévání do pískových, keramických, skořepinových a kovových forem, dále jsou zpracovány modely pro lití do forem za zvýšených sil, metodu lost foam a pro tzv. semi-solid procesy. Technologové mohou využít simulaci jako komunikační linku, s jejímž využitím se snaží zvolit nejvhodnější řešení nejrůznějších problémů. Zpracovávají a analyzují návrhy vtokových a nálitkových soustav, a to jak z hlediska optimálního rozložení teplotních polí, tak rovněž s ohledem na využití tekutého kovu. Pomocí technologických zásahů se snaží minimalizovat vznik nedolití, studených spojů, pórovitosti, trhlin a prasklin v odlitku, avšak mohou být limitováni konstrukčním návrhem a rovněž výrobní technologií.

Numerické simulace ve slévárenství se začaly rozvíjet v osmdesátých letech dvacátého století s tím, jak se rozšiřovaly možnosti v použití HW. První výpočty byly zaměřeny na výpočty tuhnutí a výsledkem bylo nestacionární teplotní pole v odlitku. Následně se modelování začalo zabývat prouděním roztaveného kovu ve formě a posléze termomechanickými výpočty zaměřenými na napětí v odlitcích, deformace a vznik trhlin a prasklin. Na teplotní historii z tuhnutí a chladnutí navazovaly modely pro predikci mikrostruktury a mechanických vlastností. Od univerzitních výpočtových kódů se přešlo na komerční programy (ProCAST, MAGMASoft, Flow-3D, NovaCast atd.), které v dnešní době aktivně využívá většina sléváren. Rozlišují se výpočty v makroměřítku (macroscale) a mikroměřítku (microscale), které lze využít i na simulace nukleace a růstu zrn.

Technologie odlévání na vytavitelný model využívá velmi bohatě CAE přístup a od simulací vstřikování vosku do matečné formy jsou modelovány všechny části IC procesu. Tato technologie má svá specifika v přenosu tepla a stala se hybatelem ve vývoji modelů pro výpočet proudění v tenkých stěnách a rovněž pro modely popisující nukleaci a růst zrn. Níže jsou uvedeny základní přístupy, na kterých je numerická simulace založena.

7.1 Numerická simulace proudění taveniny

V makroskopickém měřítku se k výpočtům proudění a tuhnutí přistupuje pomocí modelů kontinua. K formulaci matematického modelu jsou použity obecné zákony zachování hmotnosti, hybnosti a energie. Přístup je založen na řešení soustav s několika diferenciálními rovnicemi pomocí různých metod diskrétní reprezentace, které známe pod názvy metoda konečných prvků (FEM/MKP), metoda konečných diferencí (FDM), metoda konečných objemů (FVM) a další. Na rozdíl od řešení analytickými metodami, kdy se z diferenciální rovnice získává spojitá informace o neznámé veličině, při numerickém řešení se tato spojitá informace nahradí diskrétními hodnotami v daných bodech. Tato diskretizace jak řešené veličiny, tak řešené oblasti, umožňuje nahradit diferenciální rovnici, jejíž exaktní řešení ve většině případů není možné jednoduchými algebraickými rovnicemi. Nové výpočtové jazyky vedly k vývoji tzv. Computational Fluid Dynamics (CFD), což je nové odvětví mechaniky tekutin využívající algoritmy a numerické metody k řešení problémů týkajících se proudění tekutin, což pro slévárenskou praxi znamená např. proudění taveniny. Bereme-li v potaz součet všech sil působících v elementárním objemu dV a změnu hybnosti, lze sestavit pohybovou rovnici vazké kapaliny. Zde se mimo sil vnějších, setrvačných a tlakových, které jsou spojeny s vlastním pohybem částic tekutiny, uvažují také síly třecí, které jsou způsobeny vzájemným pohybem částic. Rovnováha je dána vektorovým součtem dle rovnice (7.1):

$$\vec{F}_{setrvačné} = \vec{F}_{gravitační} + \vec{F}_{tlakové} + \vec{F}_{třecí} \quad (7.1)$$

Rovnice zachování hybnosti je formulována pomocí Navierových–Stokesových rovnic a slouží k definování matematických modelů plnění formy a tuhnutí odlitků. Pokud budeme zkoumat proudění v gravitačním poli za působení tlakové síly a se zohledněním síly vnitřního tření, dospějeme k rovnici, která vyjadřuje zachování součtu sil nebo hybností.

Pokud předpokládáme, že tekutina je nestlačitelná ($\rho = \text{konstanta}$), můžeme rovnici definovat např. takto:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \nabla \vec{u} - \nu \Delta \vec{u} + \frac{1}{\rho} \nabla p = 0 \quad (7.2)$$

Kde:

$$\begin{array}{ll} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} & \text{lokální zrychlení [m . s}^{-2}\text{]} \\ \vec{u} \nabla \vec{u} & \text{konvektivní zrychlení [m . s}^{-2}\text{]} \\ \nu \Delta \vec{u} & \text{zrychlení potřebné k překonání viskozního tření tekutiny [m . s}^{-2}\text{]} \\ \frac{1}{\rho} \nabla p & \text{zrychlení způsobené tlakovými silami [m . s}^{-2}\text{]} \end{array}$$

pak rovnici zachování hmoty (rovnici kontinuity) lze formulovat do vztahu 7.3:

$$\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} = 0 \quad (7.3)$$

Zachování hybnosti na elementární objem je možné vyjádřit aplikací druhého Newtonova pohybového zákona ve tvaru rovnice:

$$\frac{\partial(mu_i)}{\partial t} = \sum_j f_{ij} + \sum_{in}(mu_i) - \sum_{out}(mu_i) \quad (7.4)$$

Kde:

$$\begin{array}{ll} m & \text{je hmotnost kapaliny a na pravé straně rovnice je hmotnostní průtok [kg]} \\ f_{ij} & \text{označuje složky i-tého směru povrchové a objemové síly působící na elementární objem [-].} \end{array}$$

Princip zachování hybnosti říká, že rychlost akumulace i-tých složek hybnosti je rovna čisté rychlosti přítoku hybnosti i-tého směru plus součtu sil působících na elementární objem. Na řídicí objem mohou působit různé síly. Tyto síly působící na objem lze kategorizovat jako:

- povrchové síly: tlak, tření a síly povrchové (povrchové napětí);
- objemové síly: gravitace a případně elektromagnetické síly.

Pro účely numerické simulace a tepelné výpočty se rovnice 7.4 upravuje do finální podoby ve tvaru rovnice:

$$\begin{aligned} (\rho c_p) \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_1} (u_1 \rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x_2} (u_2 \rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x_3} (u_3 \rho c_p T) = & \left[\frac{\partial}{\partial x_1} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_2} \right) + \right. \\ & \left. \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_3} \right) \right] + \nu \phi_T + L \frac{\partial f_s}{\partial t} + S_T \end{aligned} \quad (7.5)$$

Kde:

$$\lambda, \rho, c \quad \text{představují termofyzikální parametry}$$

S_T označuje objemové zdroje tepla

u_1-u_3 jsou kartézské složky vektoru rychlosti ve směrech příslušných prostorových souřadnic

Druhý člen na pravé straně rov. (7.5) představuje rychlost nárůstu vnitřní energie spojený s viskozitou (ν), zatímco třetí člen je zodpovědný za uvolňování latentního tepla (L), podle křivky změny přechodu tuhé fáze v závislosti na teplotě. Řešení diferenciálních rovnic vyžaduje definici počátečních a také okrajových podmínek, což bývá velmi obtížná část numerického modelování.

7.2 Prostup tepla v technologii IC

V technologii IC se v systému kov – keramická forma – okolí setkáme se všemi principy přenosu tepla. Záleží na použité technologii odlévání a konceptu formy (samonosná skořepina, zasypaná skořepina), který z principů je dominantní. V případě žíhání skořepiny v žíhací peci (tzv. pre-heating) je teplo předáváno formě pomocí radiace, částečně konvekcí vzduchu a v určitém rozsahu vedením (kondukcí) v samotném materiálu skořepiny. Po vyjmutí licího stromečku z pece je přestup významně řízen prouděním okolního vzduchu (je-li keramická formy vyjmuta z pece) a rovněž radiací formy. Dochází také k tzv. vzájemnému osálávání, což je specifický jev, který významně řídí tuhnutí (teplotní gradient). Po odlití formy je během tuhnutí teplo přehřátí a latentní teplo odebíráno z odlitku do formy a do okolí. V případě odlévání tenkostěnných odlitků do keramických forem je odvod do okolí daleko důležitějším jevem, než je tomu např. u odlévání tenkostěnných odlitků z Al slitin do kovové formy. U kovové formy je prostup řízen zejména vedením, a tedy tepelnou vodivostí použitého materiálu. Lze tedy zjednodušeně napsat rovnici:

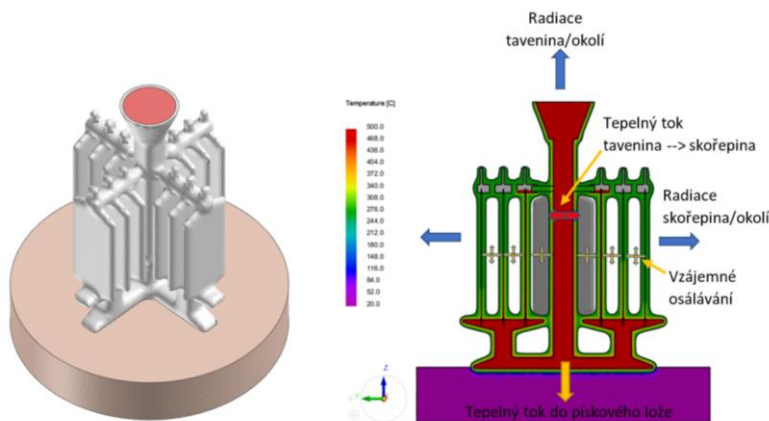
$$Q_T = Q_F + Q_O \quad (7.6)$$

Q_T teplo taveniny (kovu) [J]

Q_F teplo odvedené formou [J]

Q_O teplo odvedené okolím [J]

Teplo, které je nutné odvést ze systému do okolí, je v tomto případě tvořeno složkou taveniny a akumulovaného tepla z procesu žíhání. Znamená to, že zejména u silnostěnných odlitků je přestup tepla vedením do keramické formy limitovaný a řídicím procesem je proudění vzduchu a radiace z externího povrchu skořepiny. U tenkostěnných odlitků je nutné počítat se schopností skořepiny odebírat teplo již při proudění taveniny v dutině formy.



Obr. 7.1 Schematické znázornění tepelných toků v systému tavenina–skořepina–okolí

Dle schematického obr. 7.1 tepelných toků lze uvést následující popisy prostupu tepla, se kterými se setkáváme v systému tavenina – keramická skořepina – okolí:

a) Přestup tepla vedením (kondukce)

Při teplotním gradientu dochází k tepelnému toku z oblastí s vyšší teplotou do oblastí s nižší teplotou. Fourierův zákon lze vyjádřit:

$$q = -\lambda S \frac{dT}{dx} \quad (7.7)$$

Kde:

q	<i>je tepelný tok [W] kolmý na plochu vedení tepla</i>
S	<i>plocha, na které dochází k vedení tepla [m²]</i>
λ	<i>koeficient tepelné vodivosti [W . m⁻¹ . K⁻¹]</i>
$\frac{dT}{dx}$	<i>je gradiet teploty v ose x [K . m⁻¹]</i>

Znaménko mínus značí, že teplo je vypočteno v kladném směru, ve kterém skutečně proudí.

b) Přestup tepla prouděním (konvekce)

Existují dva typy tepelné konvekce: nucená konvekce, kde je zapojen vnější zdroj pohybu, a volná konvekce, kde je pohyb způsoben rozdílem hustot přítomným v tavenině bez jakéhokoli vnějšího vlivu. Newtonův zákon lze použít k popisu konvekce v procesech styku taveniny s formou, případně konvekce vzduch na vnějším povrchu.

$$q = -\alpha S(T_s - T_o) \quad (7.8)$$

Kde:

α	<i>je koeficient přestupu tepla [W . m⁻² . K⁻¹] závislý na rychlosti proudění média, tvaru skořepiny, kontaktním povrchu atd. Součinitel přestupu tepla α je mírou intenzity přestupu tepla z teplejšího do chladnějšího prostředí.</i>
S	<i>plocha, na které dochází k proudění tepla [m²]</i>
T	<i>jsou teploty, např. teplota skořepiny (index S) a teplota okolí (index O) [K]</i>

c) Přestup tepla sáláním (radiací)

Tepelné záření je způsobeno šířením elektromagnetických vln a vyskytuje se jak ve vakuu, tak v prostředí, kdy odléváme např. na vzduchu. Elektromagnetické záření v důsledku rozdílu teplot je možné vyjádřit pomocí Stefan–Boltzmannova zákona:

$$q = \sigma S(T^4) \quad (7.9)$$

Kde:

σ	<i>je konstanta úměrnosti a nazývá se Stefan-Boltzmannova konstanta s hodnotou 5,669 · 10⁻⁸ [W . m⁻² . K⁻⁴]</i>
S	<i>je velikost plochy sálajícího tělesa [m²]</i>
T	<i>je teplota [K]</i>

Pokud uvažujeme výměnu tepla sáláním mezi dvěma povrchy, jak je to běžné u procesů IC, lze přestup tepla vyjádřit takto:

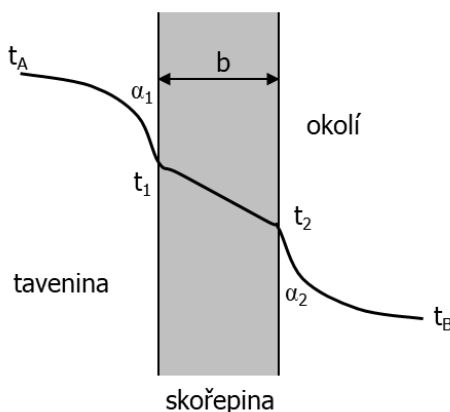
$$q = -\sigma \varepsilon S (T_S^4 - T_O^4) \quad (7.10)$$

Kde:

ε je emisivita v rozmezí hodnot 0–1, kdy znaménko je opět ve významu Fourierova zákona.

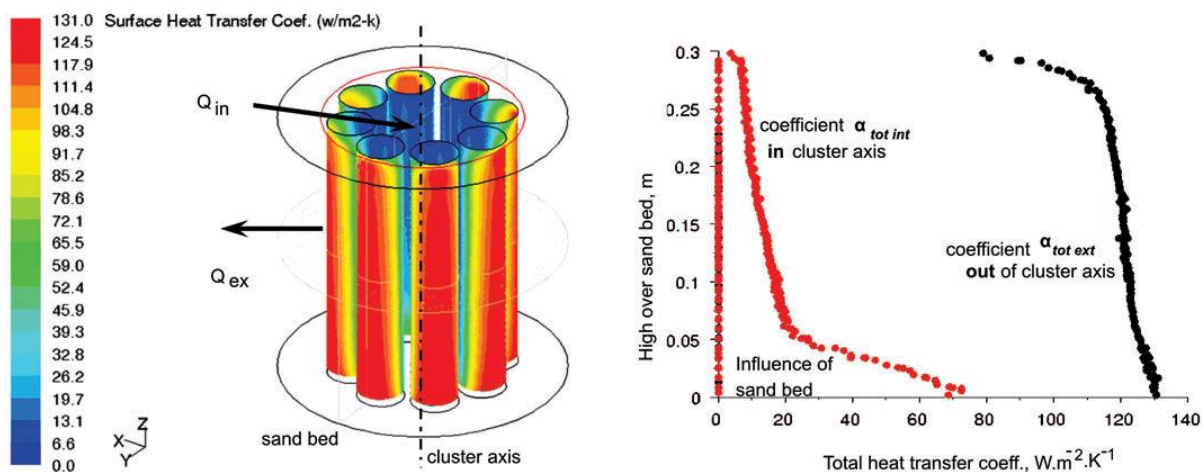
Celkový prostup tepla danou sestavou kov–skořepina–okolí je kombinovaným způsobem prostupu tepla – obr.7.2, který lze vyjádřit rovnicí:

$$Q = \frac{S \cdot (t_A - t_B)}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{b}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = k \cdot S \cdot (t_A - t_B) \quad (7.11)$$



Obr. 7.2 Teplotní profil v systému tavenina–skořepina–okolí

Systém je ještě složitější, jelikož ve standardním IC dochází k fenoménu zvanému vzájemné osálávání, které činí výpočet a stanovení jednotlivých koeficientů přestupu tepla ještě komplikovanější. Roučka a kol. [133] studovali tento fenomén ve vztahu k určení koeficientu přestupu tepla, ovlivnění posunutí tepelné osy a následný vliv na mikrostrukturu Ni slitin.



Obr. 7.3 Změny koeficientů přestupu tepla v případě vzájemného osálávání těles [133]

7.3 Okrajové podmínky numerické simulace

K řešení numerických úloh musíme definovat počáteční (vstupní rychlost, tlak ad.) a okrajové podmínky procesu, tak aby úloha diferenciálních rovnic byla řešitelná. Okrajové podmínky se

dělí do několika základních kategorií a níže v tab. 7.1 jsou uvedeny pouze ty, které ve slévárenských procesech nacházejí své uplatnění.

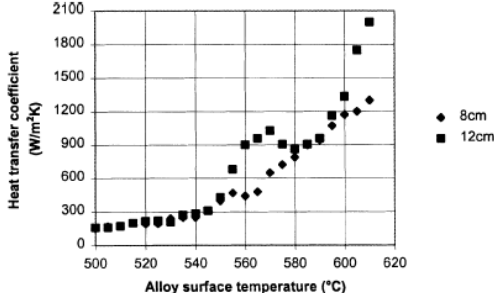
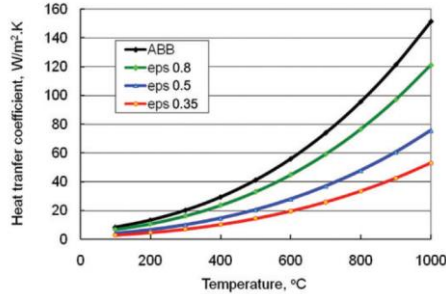
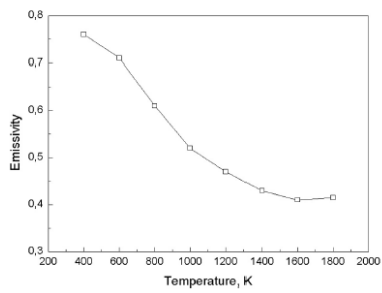
Tab. 7.1 Přehled okrajových podmínek přestupu tepla

Druh podmínky	Popis podmínky	Schéma
1. druhu (Dirichletova)	je zadána teplota na povrchu tělesa v závislosti na čase $T_s = f(x, y, z, t)$	
2. druhu (Neumannova)	je zadán teplotní gradient na povrchu tělesa $q_s = -k \frac{dT(0, t)}{dx}$ q – je teplotní tok [W/m^2] k – tepelná vodivost [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$] dT/dx – teplotní gradient [K.m^{-1}]	
3. druhu (Newtonova)	je zadána teplota okolí a součinitel přestupu tepla mezi tělesem a okolím $-k \frac{dT(0, t)}{dx} = h[T_{\infty, 1} - T(0, t)]$ dT/dx – teplotní gradient [K.m^{-1}] k – tepelná vodivost [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$] h – koeficient přestupu tepla [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]	
Modifikovaná interface okrajová podmínka	Je zadána teplota jednotlivých materiálů a součinitel přestupu tepla, případně tepelný odpor mezi tělesy $T_1(x_0, t) = T_2(x_0, t)$ $-k_1 \frac{dT_1(x_0, t)}{dx} = -k_2 \frac{dT_2(x_0, t)}{dx}$ dT/dx – teplotní gradient [K.m^{-1}] k – tepelná vodivost [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]	

Velmi důležitou podmínkou ve slévárenské technologii je řešení podmínky na rozhraní materiálů a prostředí, která je definována koeficientem přestupu tepla. Součinitel přestupu tepla α (HTC) je mírou intenzity přestupu tepla z teplejšího do chladnějšího prostředí. Je časově a teplotně závislý (formování vzduchové mezery) a ovlivňuje ho kvalita kontaktního povrchu, tvarová složitost tělesa, proudící médium (v případě rozhraní skořepiny/okolí) a některé další parametry, jak je uvedeno v kapitole 5.3.4.

Pro výpočty testovacího tělesa pro zkoušky zabíhavosti v byly programu ProCAST využity hodnoty experimentálně zjištěné autory, kteří se do hloubky zabývají danou tematikou – tab. 7.2.

Tab. 7.2 Podmínky použité k definici virtuálního experimentu

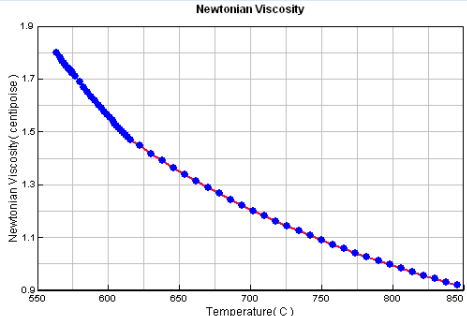
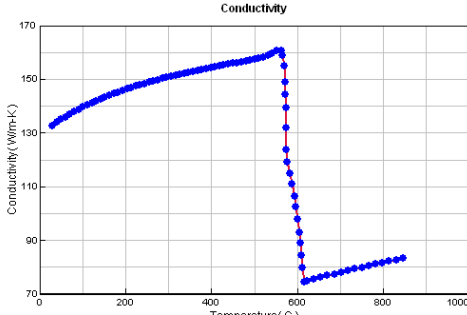
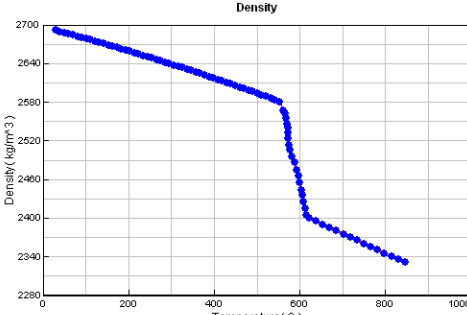
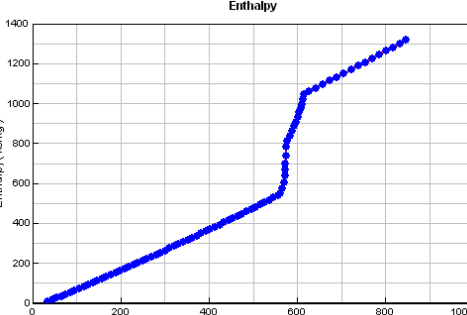
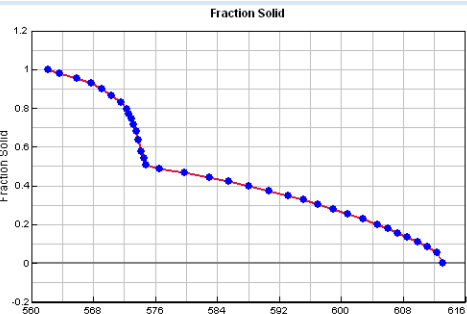
Interface	Parametr HTC (α)	Zdroj – poznámky
Kov/skořepina		Zdroj: [142] Měřeno pro AlSi7Mg0,3 Skořepina: Aluminosilikát Rozsah teplot: 500–620 °C (vyšší teploty extrapolovány)
Skořepina/okolí		Zdroj: [133] Skořepina: Aluminosilikát – Molochite
Kov/okolí (nálevka)	$20 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	Zvolena konstantní hodnota nemající vliv na proudění a výsledek vlastní zabíhavosti.
Emisivita		Zdroj: [132] Skořepina: Aluminosilikát – Molochite

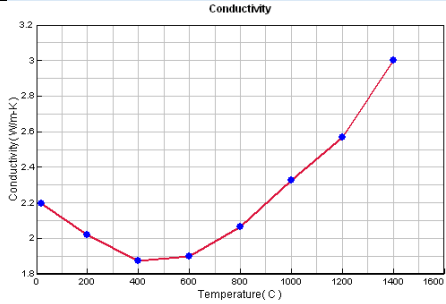
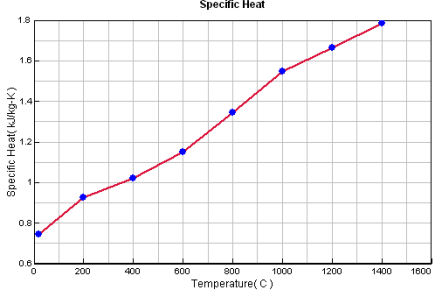
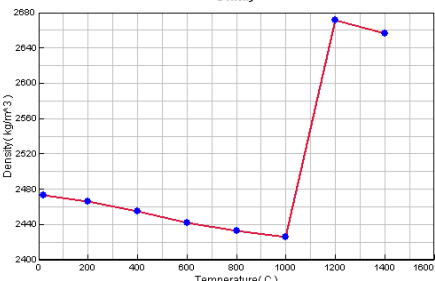
7.4 Termofyzikální parametry systému kov–skořepina–forma

Jakmile jsou formulovány rovnice řídící procesy plnění a tuhnutí a jsou definovány okrajové podmínky, musí být pro jejich řešení k dispozici termofyzikální data pro vybraný materiál. Pro výpočty testovacího tělesa pro zkoušky zabíhavosti byla v programu ProCAST generována termofyzikální data odlévaného materiálu pomocí termodynamické databáze PanDAT. Byl využit modul back-diffusion s definicí rychlostí ochlazování $0,5\text{--}1 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$. Tab. 7.3 shrnuje základní termofyzikální data použitá pro výpočty zabíhavosti.

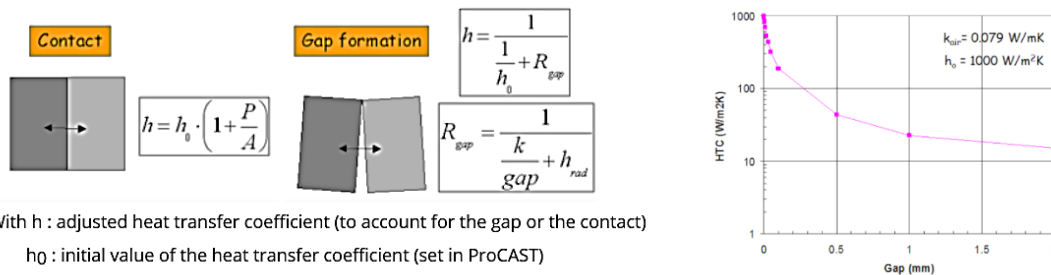
Tab. 7.3 Hodnoty termofyzikálních dat generovaných pro virtuální experiment

Parametr	Hodnota	Zdroj – poznámky
Kov Teplota likvidu a solidu	Liquidus-Solidus Liquidus Solidus	
	Const	613 C
	Const	562 C

Kov – viskozita	 Newtonian Viscosity	Generováno CompuTherm (na základě chemického složení a rychlosti chlazení)
Vodivost	 Conductivity	Generováno CompuTherm + [143]
Hustota	 Density	Generováno CompuTherm
Entalpie	 Enthalpy	Generováno CompuTherm
Tuhá fáze	 Fraction Solid	Generováno CompuTherm

Vodivost - skořepina - aluminosilikát		Databáze ProCAST – měřeno Imerys
Měrná tepelná kapacita - skořepina - aluminosilikát		Databáze ProCAST – měřeno Imerys
Hustota - skořepina - aluminosilikát		Databáze ProCAST – měřeno Imerys

Pro výpočty koeficientu přestupu tepla (HTC) v oblasti solidu a níže byl využit interní model sw ProCAST pro výpočet vzduchové mezery – obr. 7.4.



With h : adjusted heat transfer coefficient (to account for the gap or the contact)

h_0 : initial value of the heat transfer coefficient (set in ProCAST)

h_{rad} : radiative "equivalent heat transfer coefficient". It is computed using the Stefan-Boltzmann law based on the temperature values of the interface

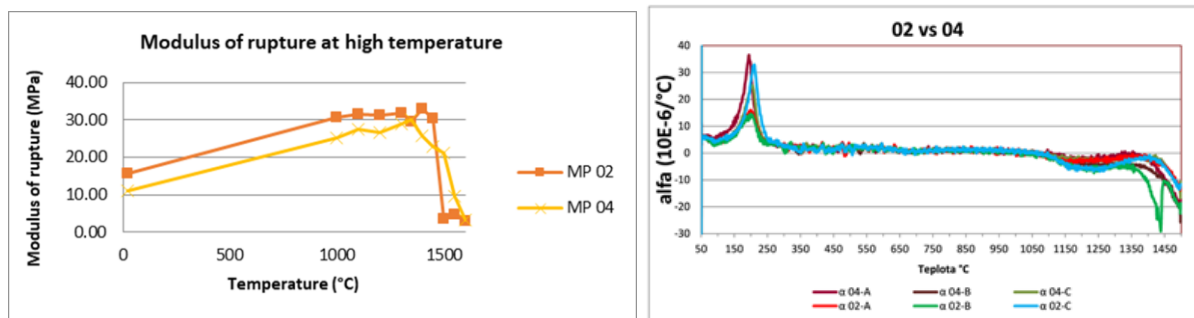
gap : air gap width

k : conductivity of air (= 0 if VACUUM = 1)

A : empirical constant to account for contact pressure. The value is embedded in the code (not manually editable)

Obr. 7.4 Popis přepočtu HTC pro formování vzduchové mezery – tutoriál sw ProCAST [67]

V případě výpočtu HTC s formováním musel být využit STRESS module sw ProCAST. Pro definici termomechanických dat bylo využito interní výzkumné zprávy [126], kde byly řešeny pevnostní charakteristiky skořepin a jader za vysokých teplot – obr. 7.5.



Obr. 7.5 Měřená data MOR (modulus of rupture) a teplotní roztažnosti pro keramické skořepiny a jádra [126]

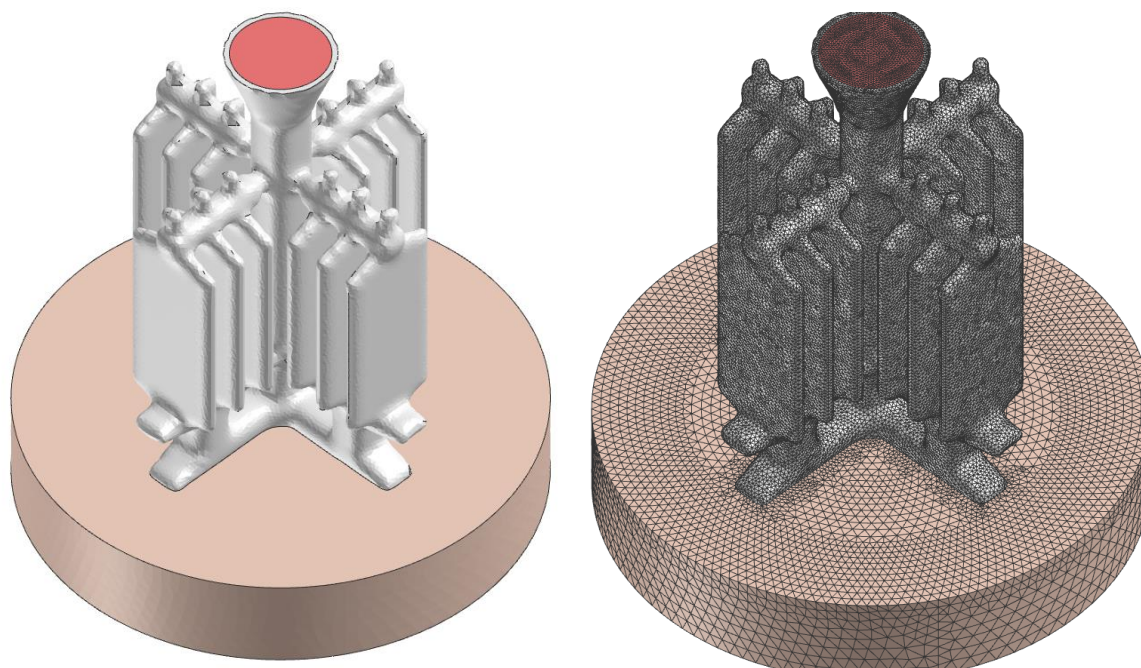
7.5 Virtuální experiment – numerická simulace zabíhavosti

Pro virtuální experimenty bylo využito komerčního programu ProCAST, který je přímo svými moduly zaměřen do oblasti technologie IC. Umožňuje řešit vstřikování voskových směsí do matečné formy, řeší pre-heating skořepiny, proudění a tuhnutí kovu, ve stress modulu nabízí řešení pro napětí, deformace a v modulu CAFE (Cellular Automat Finite Element Method) rovněž výpočty pro nukleaci a růst zrn. Pro výpočty zabíhavosti byly využity zejména moduly FLUID + THERMAL včetně termodynamické databáze pro Al slitiny.

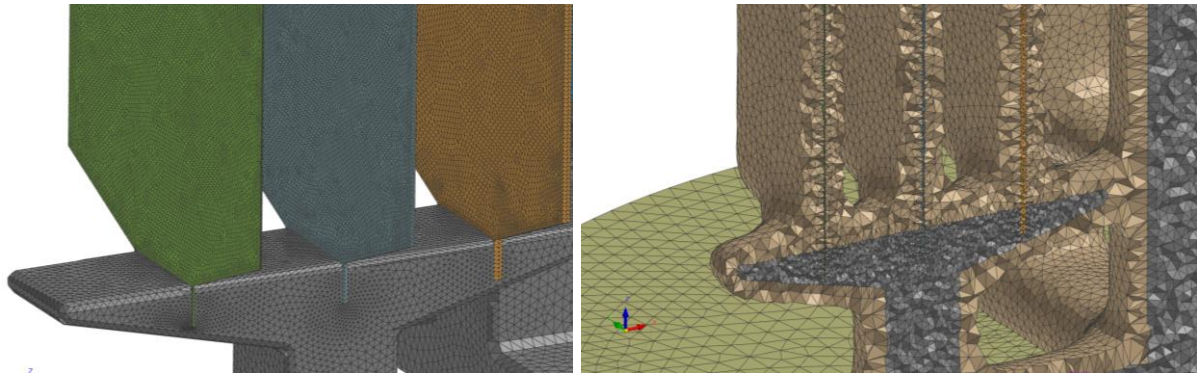
Příprava výpočtové sítě

FEM výpočtová síť byla generována v programu VisualMesh a obsahovala 1 103 622 povrchových a 8 180 367 objemových elementů typu tetrahedron – obr. 7.7.

Výpočtová síť byla optimalizována pro účely proudění a na této optimalizované povrchové síti byla následně vytvořena objemová síť keramické skořepiny, která zohledňuje tloušťku 8 mm, dle skutečného experimentu – obr. 7.6.



Obr. 7.6 Modelovaná soustava kov/skořepina/lože/okolí, FEM výpočtová síť (vpravo)



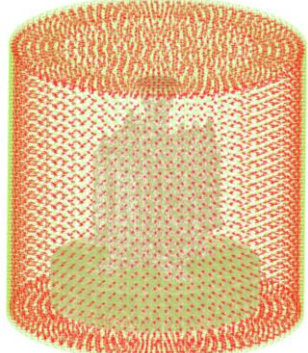
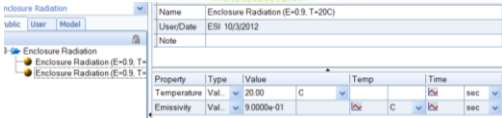
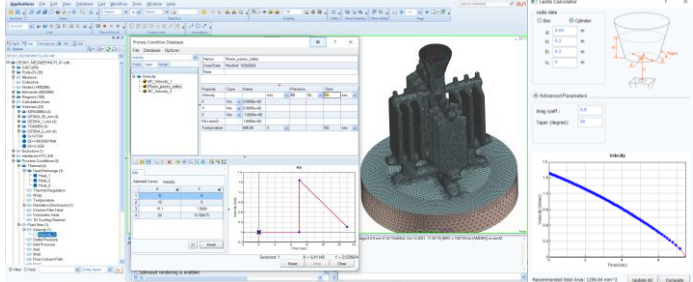
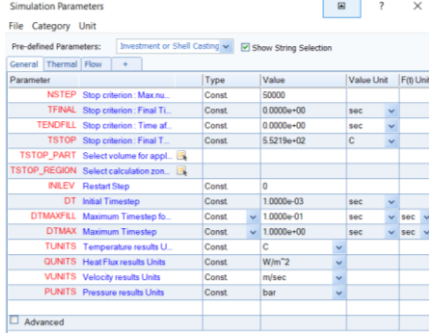
Obr. 7.7 Detail 2D a 3D výpočtová síť (vpravo)

Definice úlohy

Následující tab. 7.4 shrnuje základní definici objemů, počátečních a okrajových podmínek.

Tab. 7.4 Definice podmínek výpočtů pro virtuální experimenty

Podmínka Objemy – materiály	Volume Manager <table><thead><tr><th>SL</th><th>Name</th><th>Type</th><th>Material</th><th>Fill %</th><th>Initial Temp</th><th>Stress Type</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>VTOK</td><td>Alloy</td><td>AlSi7Mg0.3_BD_0.5_COMPUTE</td><td>0.00</td><td>690.00</td><td>C</td></tr><tr><td>2</td><td>SKOREPINA</td><td>Mold</td><td>Molochite (TM)</td><td>100.00</td><td>550.00</td><td>C</td></tr><tr><td>3</td><td>LOZE</td><td>Mold</td><td>Silica Sand</td><td>100.00</td><td>20.00</td><td>C</td></tr><tr><td></td><td>DESKA_2_mm</td><td>Alloy</td><td>AlSi7Mg0.3_BD_0.5_COMPUTE</td><td>0.00</td><td>690.00</td><td>C</td></tr><tr><td></td><td>TRAMEK</td><td>Alloy</td><td>AlSi7Mg0.3_BD_0.5_COMPUTE</td><td>0.00</td><td>690.00</td><td>C</td></tr><tr><td></td><td>DESKA_1_mm</td><td>Alloy</td><td>AlSi7Mg0.3_BD_0.5_COMPUTE</td><td>0.00</td><td>690.00</td><td>C</td></tr><tr><td></td><td>DESKA_05_mm</td><td>Alloy</td><td>AlSi7Mg0.3_BD_0.5_COMPUTE</td><td>0.00</td><td>690.00</td><td>C</td></tr><tr><td></td><td>KERAMIKA</td><td>Mold</td><td>Full Alumina</td><td>100.00</td><td>550.00</td><td>C</td></tr></tbody></table> Material Database: Public Category: All Name: Mass of casting alloy: 4.975 kg Reset Apply Close	SL	Name	Type	Material	Fill %	Initial Temp	Stress Type	1	VTOK	Alloy	AlSi7Mg0.3_BD_0.5_COMPUTE	0.00	690.00	C	2	SKOREPINA	Mold	Molochite (TM)	100.00	550.00	C	3	LOZE	Mold	Silica Sand	100.00	20.00	C		DESKA_2_mm	Alloy	AlSi7Mg0.3_BD_0.5_COMPUTE	0.00	690.00	C		TRAMEK	Alloy	AlSi7Mg0.3_BD_0.5_COMPUTE	0.00	690.00	C		DESKA_1_mm	Alloy	AlSi7Mg0.3_BD_0.5_COMPUTE	0.00	690.00	C		DESKA_05_mm	Alloy	AlSi7Mg0.3_BD_0.5_COMPUTE	0.00	690.00	C		KERAMIKA	Mold	Full Alumina	100.00	550.00	C													
SL	Name	Type	Material	Fill %	Initial Temp	Stress Type																																																																							
1	VTOK	Alloy	AlSi7Mg0.3_BD_0.5_COMPUTE	0.00	690.00	C																																																																							
2	SKOREPINA	Mold	Molochite (TM)	100.00	550.00	C																																																																							
3	LOZE	Mold	Silica Sand	100.00	20.00	C																																																																							
	DESKA_2_mm	Alloy	AlSi7Mg0.3_BD_0.5_COMPUTE	0.00	690.00	C																																																																							
	TRAMEK	Alloy	AlSi7Mg0.3_BD_0.5_COMPUTE	0.00	690.00	C																																																																							
	DESKA_1_mm	Alloy	AlSi7Mg0.3_BD_0.5_COMPUTE	0.00	690.00	C																																																																							
	DESKA_05_mm	Alloy	AlSi7Mg0.3_BD_0.5_COMPUTE	0.00	690.00	C																																																																							
	KERAMIKA	Mold	Full Alumina	100.00	550.00	C																																																																							
HTC – přestup tepla na rozhraní mezi materiály	Interface HTC Manager <table><thead><tr><th>SL</th><th>Name</th><th>Type</th><th>Interface Condition</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>VTOK_SKOREPINA</td><td>CONC</td><td>Zabihavost_HTC_Al_molochite</td></tr><tr><td>2</td><td>SKOREPINA_LOZE</td><td>CONC</td><td>n=500</td></tr><tr><td></td><td>DESKA_2_mm=TRAMEK</td><td>EQUIN</td><td>---</td></tr><tr><td></td><td>DESKA_1_mm=VTOK</td><td>EQUIN</td><td>---</td></tr><tr><td></td><td>DESKA_1_mm=TRAMEK</td><td>CONC</td><td>Zabihavost_HTC_Al_molochite</td></tr><tr><td></td><td>DESKA_05_mm=TRAMEK</td><td>EQUIN</td><td>---</td></tr><tr><td></td><td>DESKA_05_mm=VTOK</td><td>CONC</td><td>Zabihavost_HTC_Al_molochite</td></tr><tr><td></td><td>TRAMEK=KERAMIKA</td><td>CONC</td><td>n=2000</td></tr><tr><td></td><td>KERAMIKA=VTOK</td><td>CONC</td><td>n=2000</td></tr><tr><td></td><td>DESKA_2_mm=SKOREPINA</td><td>CONC</td><td>Zabihavost_HTC_Al_molochite</td></tr><tr><td></td><td>TRAMEK=SKOREPINA</td><td>CONC</td><td>Zabihavost_HTC_Al_molochite</td></tr><tr><td></td><td>DESKA_1_mm=SKOREPINA</td><td>CONC</td><td>Zabihavost_HTC_Al_molochite</td></tr><tr><td></td><td>DESKA_05_mm=SKOREPINA</td><td>CONC</td><td>Zabihavost_HTC_Al_molochite</td></tr><tr><td></td><td>KERAMIKA=SKOREPINA</td><td>CONC</td><td>n=2000</td></tr></tbody></table> Interface HTC Condition Database: User Category: Standard Name: Zabihavost_HTC Reset Apply Close Selected Curve: <table><thead><tr><th>X</th><th>Y</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>500</td></tr><tr><td>2</td><td>500</td></tr><tr><td>3</td><td>500</td></tr><tr><td>4</td><td>600</td></tr><tr><td>5</td><td>620</td></tr><tr><td>6</td><td>650</td></tr><tr><td>7</td><td>700</td></tr></tbody></table> HTC Coefficient (W/m²K) vs Temperature (°C) Selected: 1 X = 561.576 Y = 2701.18	SL	Name	Type	Interface Condition	1	VTOK_SKOREPINA	CONC	Zabihavost_HTC_Al_molochite	2	SKOREPINA_LOZE	CONC	n=500		DESKA_2_mm=TRAMEK	EQUIN	---		DESKA_1_mm=VTOK	EQUIN	---		DESKA_1_mm=TRAMEK	CONC	Zabihavost_HTC_Al_molochite		DESKA_05_mm=TRAMEK	EQUIN	---		DESKA_05_mm=VTOK	CONC	Zabihavost_HTC_Al_molochite		TRAMEK=KERAMIKA	CONC	n=2000		KERAMIKA=VTOK	CONC	n=2000		DESKA_2_mm=SKOREPINA	CONC	Zabihavost_HTC_Al_molochite		TRAMEK=SKOREPINA	CONC	Zabihavost_HTC_Al_molochite		DESKA_1_mm=SKOREPINA	CONC	Zabihavost_HTC_Al_molochite		DESKA_05_mm=SKOREPINA	CONC	Zabihavost_HTC_Al_molochite		KERAMIKA=SKOREPINA	CONC	n=2000	X	Y	1	500	2	500	3	500	4	600	5	620	6	650	7	700
SL	Name	Type	Interface Condition																																																																										
1	VTOK_SKOREPINA	CONC	Zabihavost_HTC_Al_molochite																																																																										
2	SKOREPINA_LOZE	CONC	n=500																																																																										
	DESKA_2_mm=TRAMEK	EQUIN	---																																																																										
	DESKA_1_mm=VTOK	EQUIN	---																																																																										
	DESKA_1_mm=TRAMEK	CONC	Zabihavost_HTC_Al_molochite																																																																										
	DESKA_05_mm=TRAMEK	EQUIN	---																																																																										
	DESKA_05_mm=VTOK	CONC	Zabihavost_HTC_Al_molochite																																																																										
	TRAMEK=KERAMIKA	CONC	n=2000																																																																										
	KERAMIKA=VTOK	CONC	n=2000																																																																										
	DESKA_2_mm=SKOREPINA	CONC	Zabihavost_HTC_Al_molochite																																																																										
	TRAMEK=SKOREPINA	CONC	Zabihavost_HTC_Al_molochite																																																																										
	DESKA_1_mm=SKOREPINA	CONC	Zabihavost_HTC_Al_molochite																																																																										
	DESKA_05_mm=SKOREPINA	CONC	Zabihavost_HTC_Al_molochite																																																																										
	KERAMIKA=SKOREPINA	CONC	n=2000																																																																										
X	Y																																																																												
1	500																																																																												
2	500																																																																												
3	500																																																																												
4	600																																																																												
5	620																																																																												
6	650																																																																												
7	700																																																																												
Podmínka HEAT – podmínka s okolím	Process Condition Manager <table><thead><tr><th>SL</th><th>Name</th><th>Type</th><th>Boundary Cond.</th><th>Initial Temp</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>Heat_1</td><td>Heat</td><td>EXT_VTOK</td><td>1242.144</td></tr><tr><td>2</td><td>Heat_2</td><td>Heat</td><td>EXT_SKOREPINA</td><td>527.000</td></tr><tr><td>3</td><td>Heat_3</td><td>Heat</td><td>EXT_LOZE</td><td>20.000</td></tr></tbody></table> Process Condition Database: User Category: Custom, boundary condition Name: Heat Reset Apply Close Selected Curve: <table><thead><tr><th>X</th><th>Y</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>200</td></tr><tr><td>2</td><td>400</td></tr><tr><td>3</td><td>400</td></tr><tr><td>4</td><td>300</td></tr></tbody></table> Enthalpy vs Temperature (°C) Selected: 1 X = 409.852 Y = 2070.00	SL	Name	Type	Boundary Cond.	Initial Temp	1	Heat_1	Heat	EXT_VTOK	1242.144	2	Heat_2	Heat	EXT_SKOREPINA	527.000	3	Heat_3	Heat	EXT_LOZE	20.000	X	Y	1	200	2	400	3	400	4	300																																														
SL	Name	Type	Boundary Cond.	Initial Temp																																																																									
1	Heat_1	Heat	EXT_VTOK	1242.144																																																																									
2	Heat_2	Heat	EXT_SKOREPINA	527.000																																																																									
3	Heat_3	Heat	EXT_LOZE	20.000																																																																									
X	Y																																																																												
1	200																																																																												
2	400																																																																												
3	400																																																																												
4	300																																																																												

Podmínka Enclosure Vzájemné osálávání – orientace normál	 
Vstupní rychlosti	
Run parameters – parametry optimalizované pro IC	

7.6 Analýza virtuálních experimentů

Pro vyhodnocení veškerých virtuálních experimentů bylo využito prostředí programu ProCAST a speciální modul VisualViewer. Simulované výsledky byly následně porovnány s reálnými experimenty a byly hledány parametry definice a vyhodnocení, které by upřesnily výpočtový model a blížily se reálnému chování taveniny v keramické formě.

7.6.1 Vyhodnocení standardního nastavení simulace

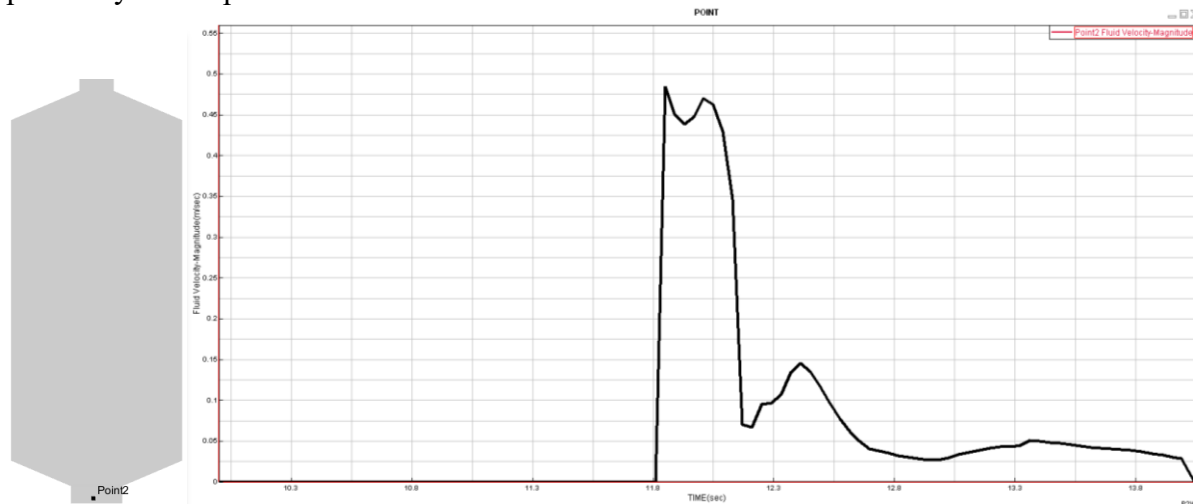
Zkrácené vstupní podmínky simulace jsou uvedeny v tab. 7.5. Standardní výpočtový model Flow 3 je defaultní nastavení řešiče pro technologii IC. Tento řešič nemá aktivován model výpočtu se zahrnutím povrchového napětí, takže víceméně řeší schopnost kovu proudit do dosažení kritické fáze tuhé fáze (f_s), u které je řešič deaktivován.

Tab. 7.5 Podmínky výpočtu virtuálního experimentu pro standardní model plnění

Podmínka	Hodnota
Slitina	AlSi7MgCu0,3
Počáteční teplota kovu	690 °C
Počáteční teplota skořepiny	550 °C

Flow model	Standardní Flow3
Křivka plnění	Vstupní rychlost viz tab. 7.4

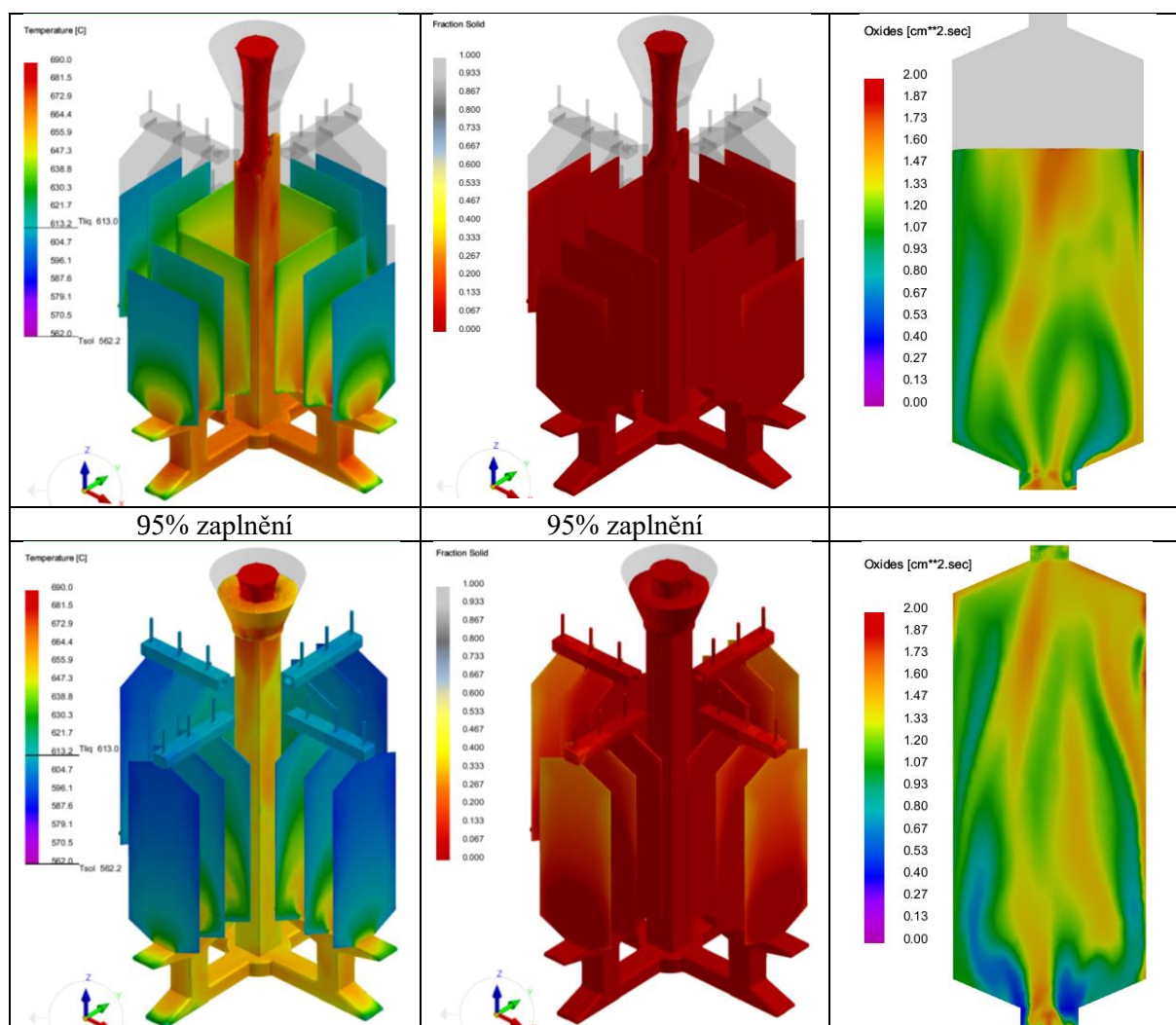
Rychlost vstupu taveniny do soustavy byla definována pomocí proměnné rychlosti výtoku taveniny z liciho kelímku se spodní výpustí. Na obr. 7.8 je záznam z virtuálního senzoru pro průběh rychlosti plnění v zářezu – destička 0.5 mm.



Obr. 7.8 Časový průběh vstupní rychlosti v zářezu testovacího tělesa

Tab. 7.6 Výsledky virtuálního experimentu pro standardní model plnění

Výsledek teplotního pole 55% zaplnění sestavy	Výsledek podílu tuhé fáze 55% zaplnění sestavy	Oxidy – mapování 55% zaplnění sestavy
75% zaplnění sestavy	75% zaplnění sestavy	75% zaplnění sestavy



V tab. 7.6 jsou zobrazeny některé výsledky z virtuálního experimentu. Je zde znázorněno rozložení teplotního pole, podíl tuhé fáze a formování oxidů v závislosti na procentuálním zaplnění odlitku. Z provedených simulací vyplývá, že standardní model nepostihl správně odpory vůči proudění a model byl i pro destičky 0,5 mm zaplněn v celém rozsahu, což neodpovídalo realitě. Z toho důvodu byly následně výsledky testovány na nadstavbovém modulu dvoufázového plnění, který zohledňuje odchod vzduchu z dutiny formy včetně prodyšnosti skořepin.

7.6.2 Vyhodnocení setupu simulace pro model VOF

S ohledem na neuspokojivé výsledky při standardním výpočtu IC byl aktivován nadstavbový modul pro dvoufázové plnění pod názvem VOF (volume of fluid) [144]. Tento modul rozšiřuje standardní Navier–Stokesovy rovnice o výpočet proudění pro plynnou složku. Rovnice 7.12–7.14 jsou v modulu ProCAST VOF doplněny následujícím způsobem:

- Zákon zachování hmoty: $\partial_t(\gamma^k \rho^k) + \nabla \cdot (\gamma^k \rho^k \vec{V}^k) = \gamma^k I_M^k$ (7.12)
- Zákon zachování hybnosti: $\partial_t(\gamma^k \rho^k \vec{V}^k) + \nabla \cdot (\gamma^k \rho^k \vec{V}^k \vec{V}^k) = \nabla \cdot (\gamma^k \mu^k \nabla \vec{V}^k) - \gamma^k \nabla P + \gamma^k \rho^k \vec{g} + I_L^k$ (7.13)
- Zákon zachování energie: $\partial_t(\gamma^k \rho^k T^k) + \nabla \cdot (\gamma^k \rho^k T^k \vec{V}^k) = \left(\frac{1}{c_p^k}\right) [\nabla \cdot (\gamma^k \kappa^k \nabla T^k) + \gamma^k \beta^k T^k (\partial_t P + \vec{V}^k \cdot \nabla P) + \Phi^k + \dot{q}^k + I_E^k]$ (7.14)

Značení je ponecháno dle popisu v ProCAST manuálu, kde symboly označují:

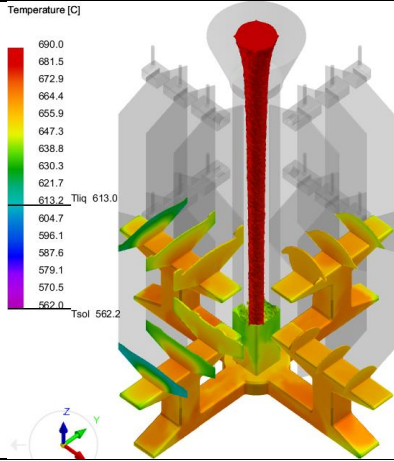
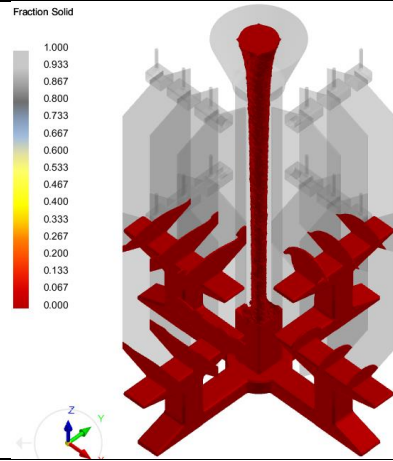
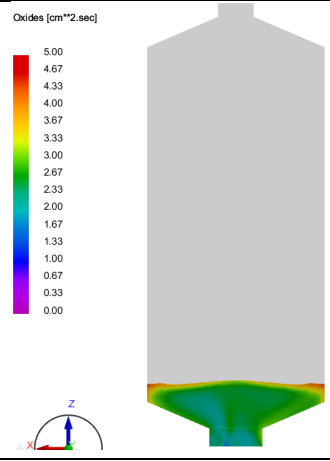
$\gamma^k, \rho^k, \vec{v}^k, T^k, \mu^k, c_p^k$	objemový podíl, hustota, rychlost, teplota, dynamická viskozita, a specifické teplo fáze k.
β^k	koeficient teplotní roztažnosti pro ideální plyn, $\beta^k = \frac{1}{T^k}$.
$\Phi^k, \dot{q}^k$	viskózní disipace turbulentních proudů a externí tepelný zdroj
I_M^k, I_L^k, I_E^k	mezifázová změna hmotnosti, hybnosti a energie
P	sdílený tlak mezi fázemi (tavenina/plyn)
$\vec{G}$	gravitační zrychlení

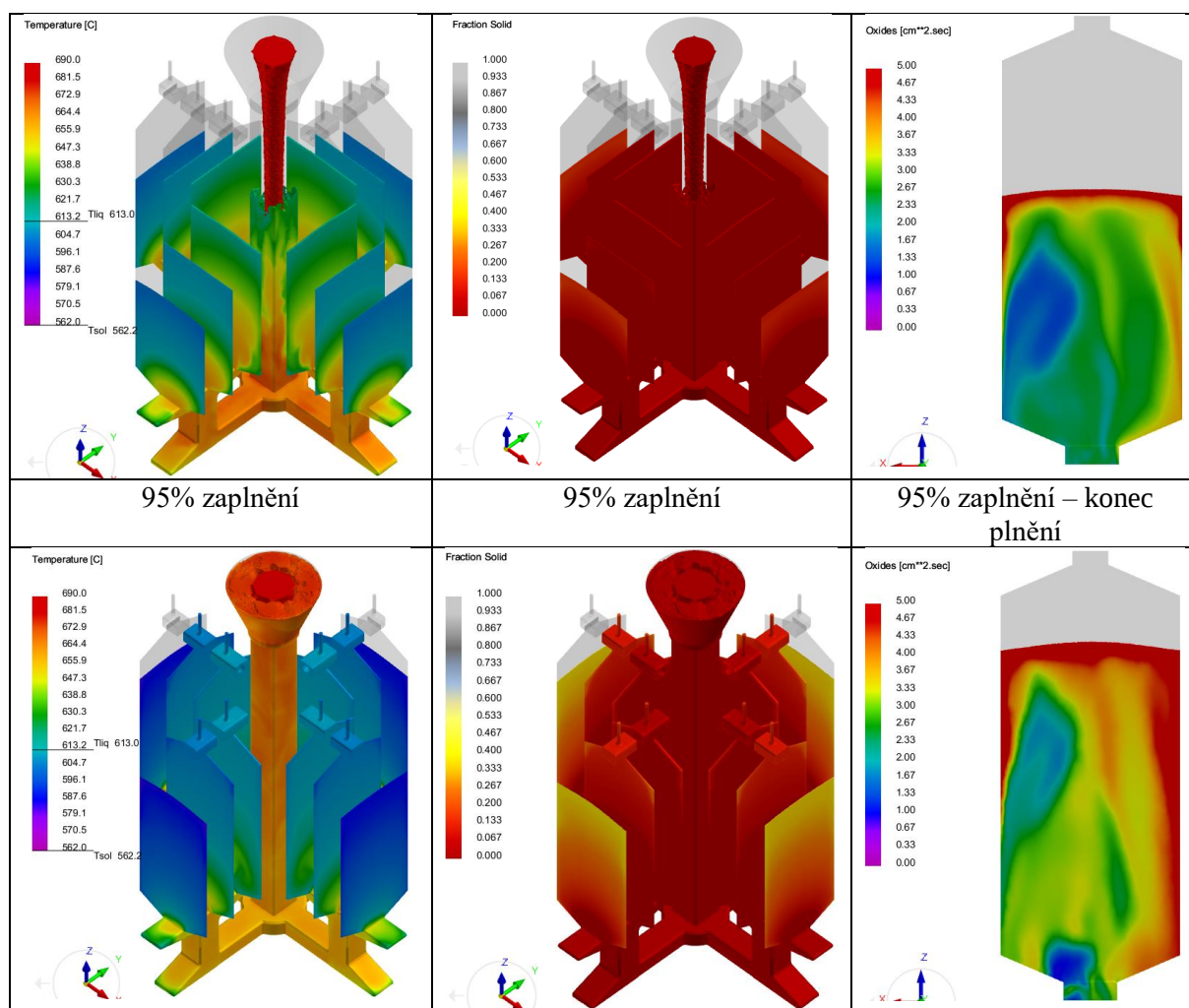
Tab. 7.7 Podmínky výpočtu virtuálního experimentu pro model plnění VOF

Podmínka	Hodnota
Slitina	AlSi7MgCu0,3
Počáteční teplota kovu	690 °C
Počáteční teplota skořepiny	550 °C
Flow model	VOF model
Křivka plnění	Vstupní rychlost viz tab. 7.4

Tabulka 7.7 charakterizuje setup úlohy s aktivací modelu VOF. Bohužel u tohoto modulu nelze zahrnout vliv povrchového napětí taveniny. V tab. 7.8 jsou shrnuty základní výsledky pro rozložení teplotního pole, tuhé fáze a vývoje oxidů v závislosti na podílu zaplnění celé soustavy. Oproti předchozím výsledkům došlo u tohoto nastavení k zastavení čela proudu kovu u destičky 0,5 mm, což již odpovídá reálným výsledkům. Tento model byl dále použit a verifikován na základě experimentálních výsledků.

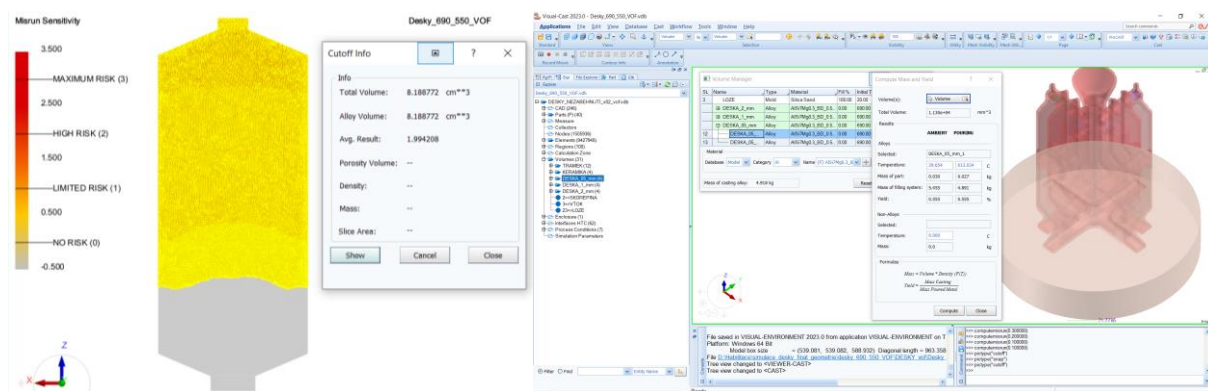
Tab. 7.8 Výsledky výpočtu virtuálního experimentu pro model plnění VOF

Výsledek teplotního pole	Výsledek podílu tuhé fáze	Oxidy – mapování Destička 0,5 mm
45% zaplnění sestavy	55% zaplnění sestavy	55% zaplnění sestavy
		
65% zaplnění sestavy	75% zaplnění sestavy	75% zaplnění sestavy



Metodika stanovení zaplněného objemu

V programu VisualCAST je možné pro zvolenou cut-off hodnotu zobrazit jednotlivé elementy daného výpočtu a výsledku. Následně výběrem elementů je možné nástrojem cut-off info stanovit objem selektovaných elementů – obr. 7.9. Tímto způsobem byly vyhodnoceny podíly zaplněného objemu při kritériu „Misrun Sensitivity“.



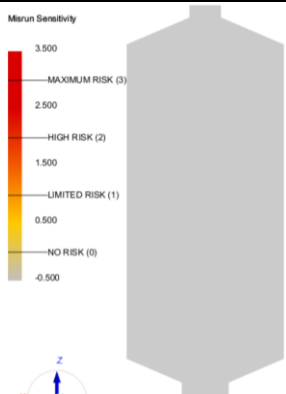
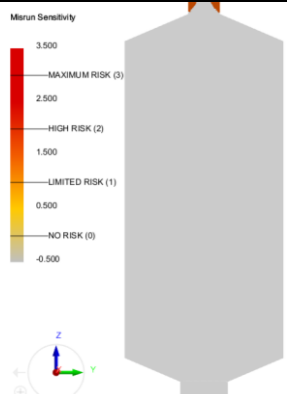
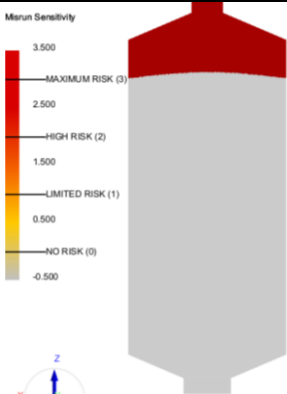
Obr. 7.9 Stanovení zaplněného objemu pro kritérium Misrun Sensitivity

Stanovení hodnoty cut-off kritéria pro Misrun sensitivity pro VOF model

Pro analýzu výsledků proudění bylo využito teplotní pole taveniny, podíl tuhé fáze a rovněž kritérium, které je nazýváno „Misrun sensitivity“ tj. citlivost na (ne)zaběhnutí kovu. Kritérium je založeno na vyhodnocení kritického podílu tuhé fáze a rychlosti plnění. „Sensitivity“ znamená citlivost na nezaběhnutí, tj. zvýšenou pravděpodobnost výskytu vad. Toto kritérium musí být kalibrováno na danou technologii, slitinu a použitou formu. Tab. 7.9 naznačuje stanovení prahové hodnoty CSF (critical solid fraction) a porovnání s provedeným experimentem. Pro všechna následná hodnocení byla zvolena CSF hodnota 0,1, která nejvíce korespondovala s reálnou délkou zaproudění.

Tab. 7.9 Výsledky výpočtu virtuálního experimentu pro model plnění VOF

Misrun sensitivity CSF 0,3	Misrun sensitivity CSF 0,2	Misrun sensitivity CSF 0,1
Bez cut-off – Deska 2 mm	Bez cut-off Deska 1 mm	Bez cut-off Deska 0,5 mm
Experiment deska 2 mm	Experiment deska 1 mm	Experiment deska 0,5 mm

Cut-off – above 3 Deska 2 mm	Cut-off – above 3 Deska 1 mm	Cut-off – above 3 Deska 0,5 mm
		
Zaběhnutí simulace – 100 %	Zaběhnutí simulace – 98 %	Zaběhnutí simulace – 88 %
Zaběhnutí experiment – 100 %	Zaběhnutí experiment – 100 %	Zaběhnutí experiment – 65 %

Z provedených experimentů a vizuální validace s experimentem byla pro výpočet zvolena prahová hranice CFS 0,1 F_s (tj. 10 % na tuhé fáze v tavenině) a pro vyhodnocení a výpočet zaplněného objemu byla zvolena hodnota cut-off kritéria Misrun Sensitivity v úrovni na 3, tj. Maximum risk (nastavení cut-off above 3).

7.6.3 Simulace vlivu teploty skořepiny na zabíhavost

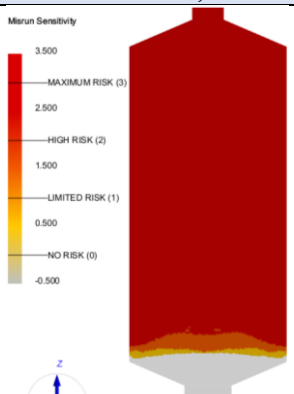
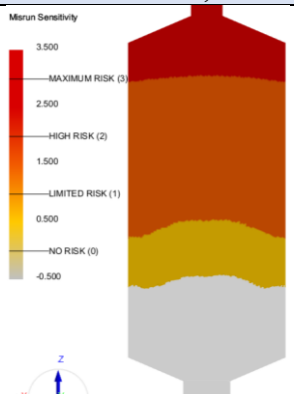
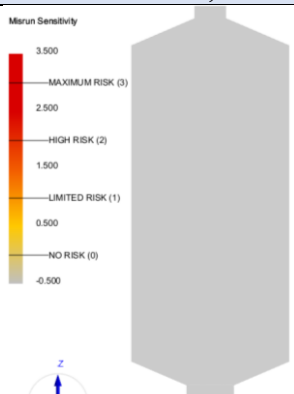
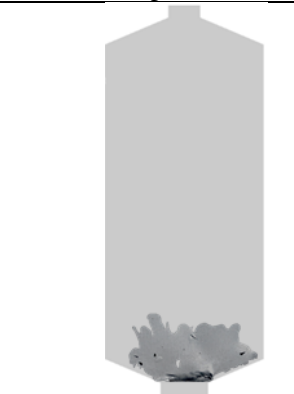
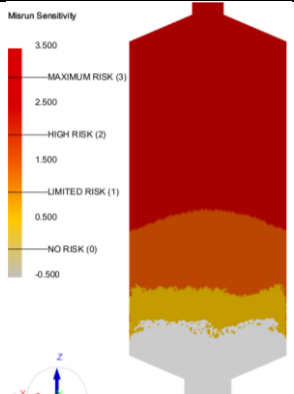
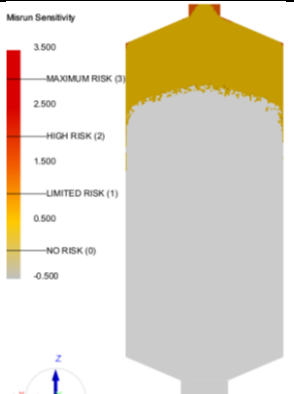
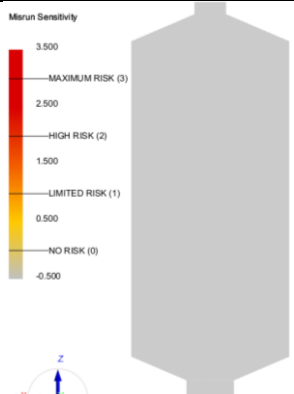
Nejsnadnějším parametrem při ovlivňování zabíhavosti u technologie IC je změna teploty přehřevu skořepiny. Tento parametr je procesně jednoduše nastavitelný s dostatečnou provozní spolehlivostí. Následující simulace byly provedeny pro stejné lící podmínky a stejnou lící teplotu, přičemž teplota přehřátí skořepiny byla testována pro 300, 550 a 700 °C. Standardní teplota skořepiny je v rozmezí 500–600 °C a pro tenkostěnné odlitky se v určitých případech používá teplota skořepiny vyšší, než je teplota odlévání. Pro vyhodnocení virtuálního experimentu bylo použito prahové hodnoty 3 u kritéria Misrun Sensitivity.

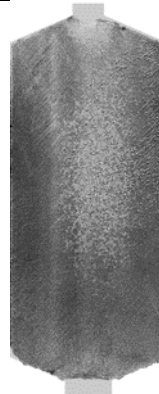
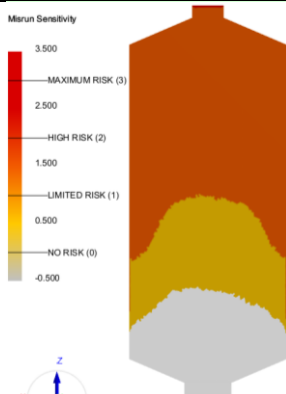
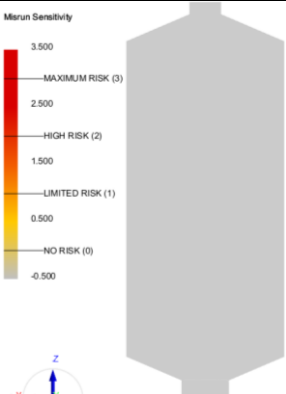
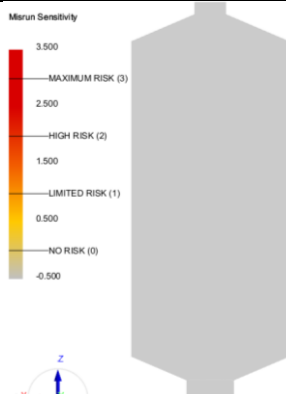
Tab. 7.10 Základní podmínky virtuálního experimentu

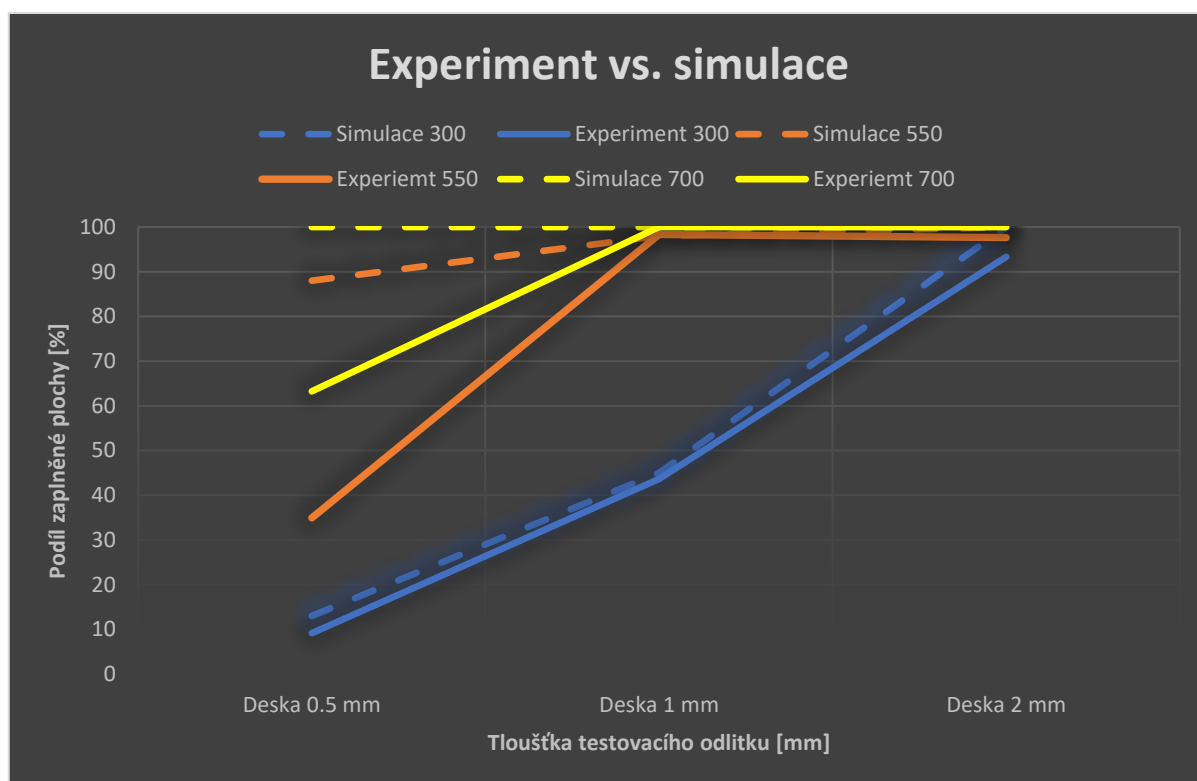
Podmínka	Hodnota
Slitina	AlSi7MgCu0,3
Počáteční teplota kovu	690 °C
Počáteční teplota skořepiny	300, 550, 700 °C
Flow model	VOF model
Křivka plnění	Vstupní rychlost viz tab. 7.4

Z následující tab. 7.11 a grafu 7.1 je patrná velmi dobrá korelace simulace a experimentu u nízké teploty přehřevu skořepiny. Dominantním vlivem je velmi rychlý odvod tepla, který je simulace schopna velmi přesně modelovat. Dobrá korelace výsledků je rovněž pro desky tl. 1 a 2 mm, kde simulace pro zvolené prahové hodnoty vyhodnocení opět ukazuje dobrou shodu. Významný rozdíl nastává u desky o tl. 0,5 mm, kde dominantním vlivem je povrchové napětí, které simulace nebyla schopna v modelu VOF postihnout. Jak je patrné, tak zejména u teploty přehřevu skořepiny na 700 °C, tj. teploty vyšší než teplota odlévání, dochází v realitě k zastavení proudu kovu a zaplnění pouze cca 60 % objemu tělesa, avšak simulace predikuje 100% zaplnění při cut-off hodnotě 3. Z tohoto vyplývá, že pro tyto tl. odlitků je nutné volit pro vyhodnocení nižší prahové hodnoty.

Tab. 7.11 Výsledky výpočtu virtuálního experimentu pro model plnění VOF

Teplota skořepiny 300 °C	Teplota skořepiny 550 °C	Teplota skořepiny 700 °C
Deska 0,5 mm	Deska 0,5 mm	Deska 0,5 mm
		
Zaběhnutí simulace – 13 %	Zaběhnutí simulace – 88 %	Zaběhnutí simulace – 100 %
Experiment	Experiment	Experiment
		
Zaběhnutí experiment – 9 %	Zaběhnutí experiment – 35 %	Zaběhnutí experiment – 63 %
Teplota skořepiny 300 °C	Teplota skořepiny 550 °C	Teplota skořepiny 700 °C
Deska 1 mm	Deska 1 mm	Deska 1 mm
		
Zaběhnutí simulace – 45 %	Zaběhnutí simulace – 98 %	Zaběhnutí simulace – 100 %
Experiment	Experiment	Experiment

		
Zaběhnutí experiment – 44 % Teplota skořepiny 300 °C	Zaběhnutí experiment – 98 % Teplota skořepiny 550 °C	Zaběhnutí experiment – 100 % Teplota skořepiny 700 °C
Deska 2 mm	Deska 2 mm	Deska 2 mm
		
Zaběhnutí simulace – 100 %	Zaběhnutí simulace – 100 %	Zaběhnutí simulace – 100 %
Experiment	Experiment	Experiment
		
Zaběhnutí experiment – 93 %	Zaběhnutí experiment – 98 %	Zaběhnutí experiment – 100 %



Graf. 7.1 Porovnání virtuálního experimentu se simulacemi

7.6.4 Simulace vlivu licí teploty na zabíhavost

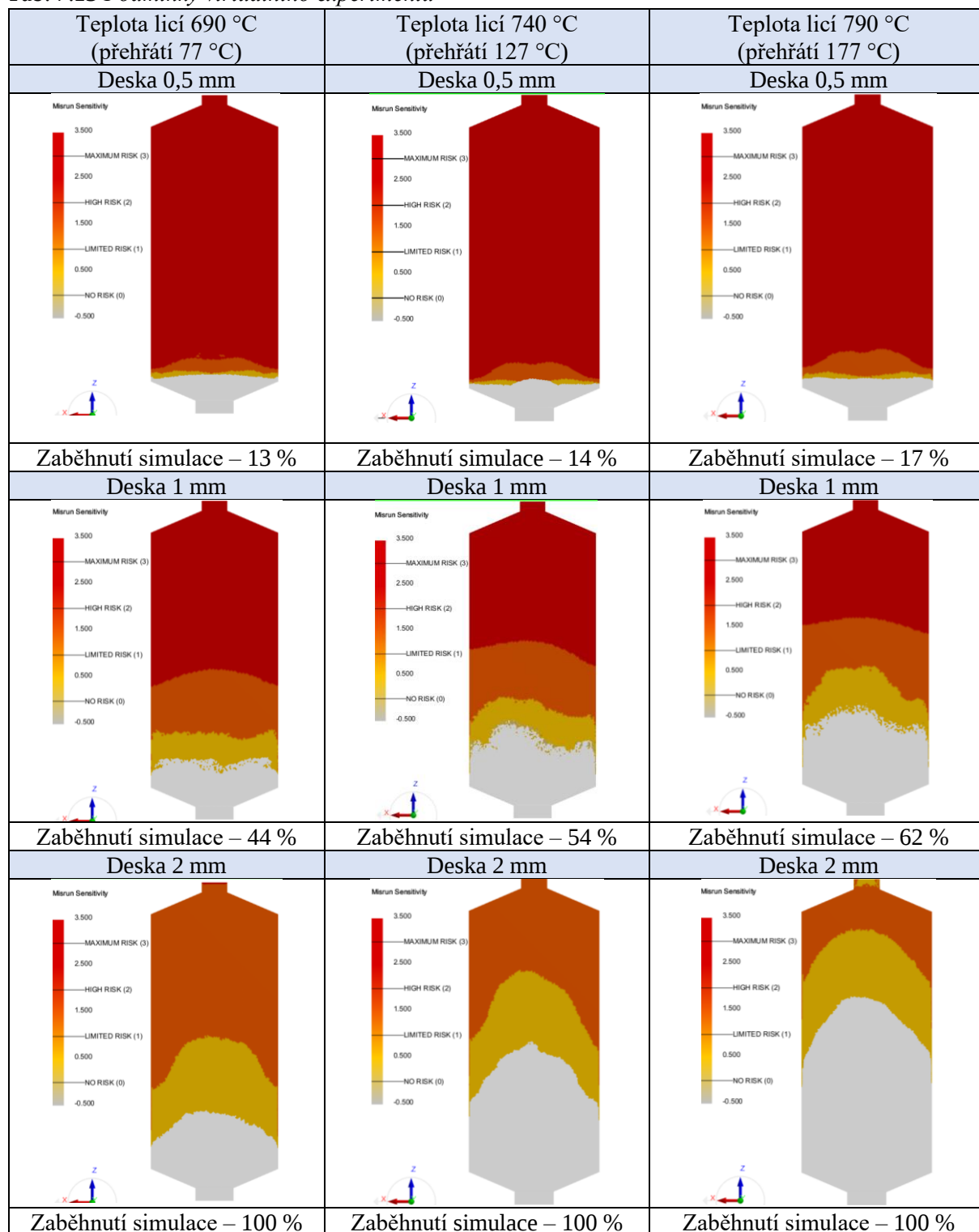
V předchozím odstavci byl demonstrován vliv teploty skořepiny, která je jako procesní parametr nejjednodušší. Dalším parametrem, kterým je možné vcelku jednoduše zabíhavost ovlivňovat, je teplota přehřátí, tj. teplota lití. Výrazná změna licí teploty však již s sebou může nést další konsekvence ve vztahu k vyššímu objemovému stahování v tekuté fázi. Vysoké teploty mohou přinášet problémy s vyšším naplyněním a vyšším podílem výskytu slévárenských vad. Vliv tohoto parametru byl analyzován pomocí numerických simulací. Podmínky pro provedení virtuálního experimentu shrnuje tab. 7.12. Záměrně byla zvolena teplota předehřevu skořepiny pouze 300 °C, aby byl vliv přehřátí patrný.

Tab. 7.12 Podmínky virtuálního experimentu

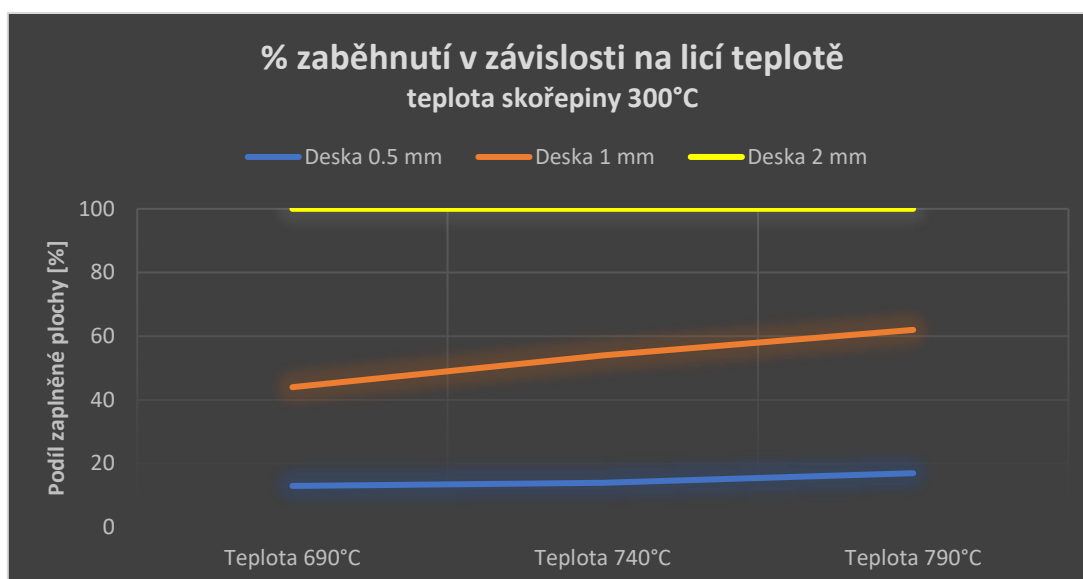
Podmínka	Hodnota
Slitina	AlSi7MgCu0,3
Počáteční teplota kovu	690, 740, 790 °C
Počáteční teplota skořepiny	300 °C
Flow model	VOF model
Křivka plnění	Vstupní rychlost viz tab. 7.4

Následující tab. 7.13 prezentuje výsledky virtuálních experimentů pro jednotlivé tloušťky testovacího tělesa při změně licí teploty. Prahová hodnota pro vyhodnocení zaběhnutého objemu byla stanovena jako v předchozích analýzách na hodnotu Misrun Sensitivity 3, tj. hranice maximum risk.

Tab. 7.13 Podmínky virtuálního experimentu

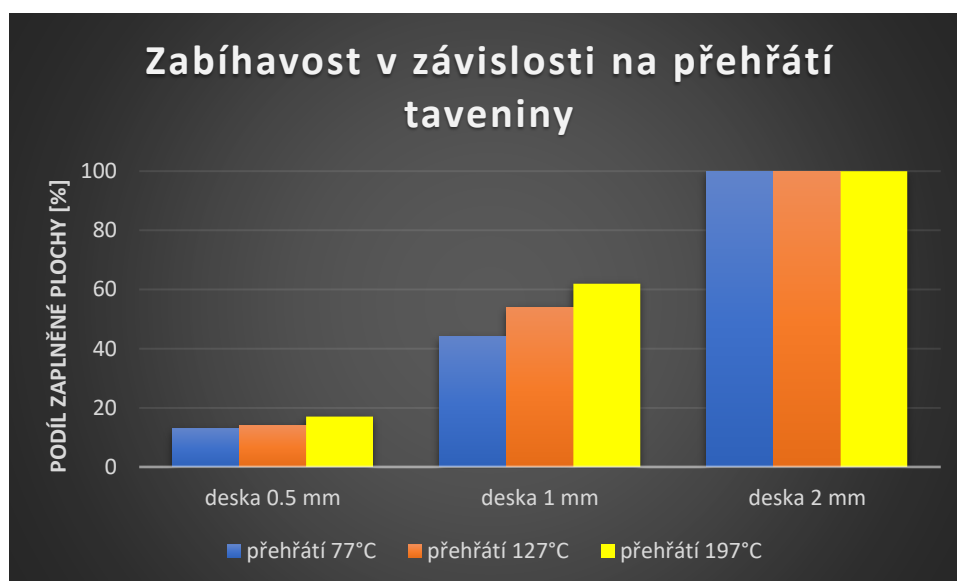


Z provedených virtuálních experimentů byl sestaven graf sledující závislost lící teploty a přehřátí na výsledném podílu zaběhnutí, tj. vyplnění dutiny testovacího tělesa.



Graf. 7.2 Závislost zaplnění objemu testovacího tělesa na lici teplotě

Výsledky virtuálního experimentu potvrzují závěry většiny autorů o lineární závislosti lici teploty na lici teplotě – graf. 7.2. Neplatí to u desky tl. 2 mm, která zaběhla již při teplotě 690 °C v celém objemu. V případě takto nízkého přehřevu skořepiny (300 °C) se velmi výrazně podílí přestup tepla na schopnosti taveniny proudit, takže povrchové napětí se v tomto případě významně neprojevuje.



Graf. 7.3 Závislost zaplnění plochy testovacího tělesa na lici teplotě

Graf. 7.3 vyjadřuje stejnou závislost pouze vyjádřenou pomocí přehřátí taveniny. Je evidentní, že zvýšená teplota přehřátí taveniny téměř o 200 °C není schopna kompenzovat vliv nízké teploty skořepiny pro tloušťku 0,5 a 1 mm. U tloušťky stěny 2 mm již teplota 690 °C zabezpečuje zaplnění celého průřezu a lze tedy uvažovat i o možném snížení přehřátí skořepin v případě optimální volby vtokové soustavy.

7.6.5 Simulace vlivu povrchového napětí na zabíhavost

Jak je uvedeno v kapitole 7.6.2, model s aktivací dvoufázového plnění nepodporuje definici povrchového napětí, které se ukázalo jako klíčové u testovacího tělesa o tloušťce 0,5 mm. Pro ověření vlivu povrchového napětí byl proveden test na standardním modelu Flow 3, který umožňuje zohlednění povrchového napětí v definici úlohy. Tab. 7.14 shrnuje použité parametry pro numerickou simulaci.

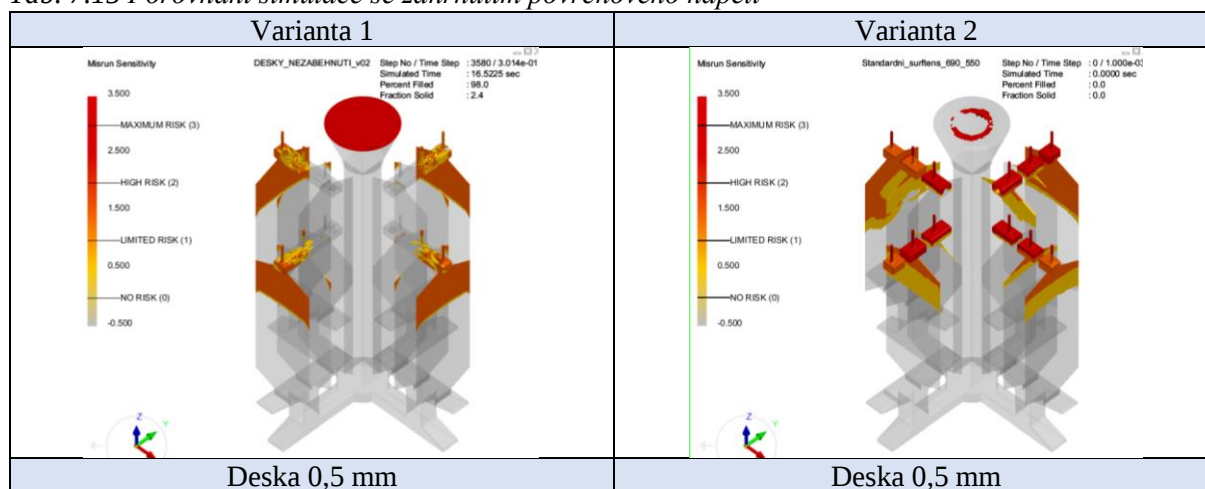
Tab. 7.14 Podmínky pro simulaci se zahrnutím povrchového napětí

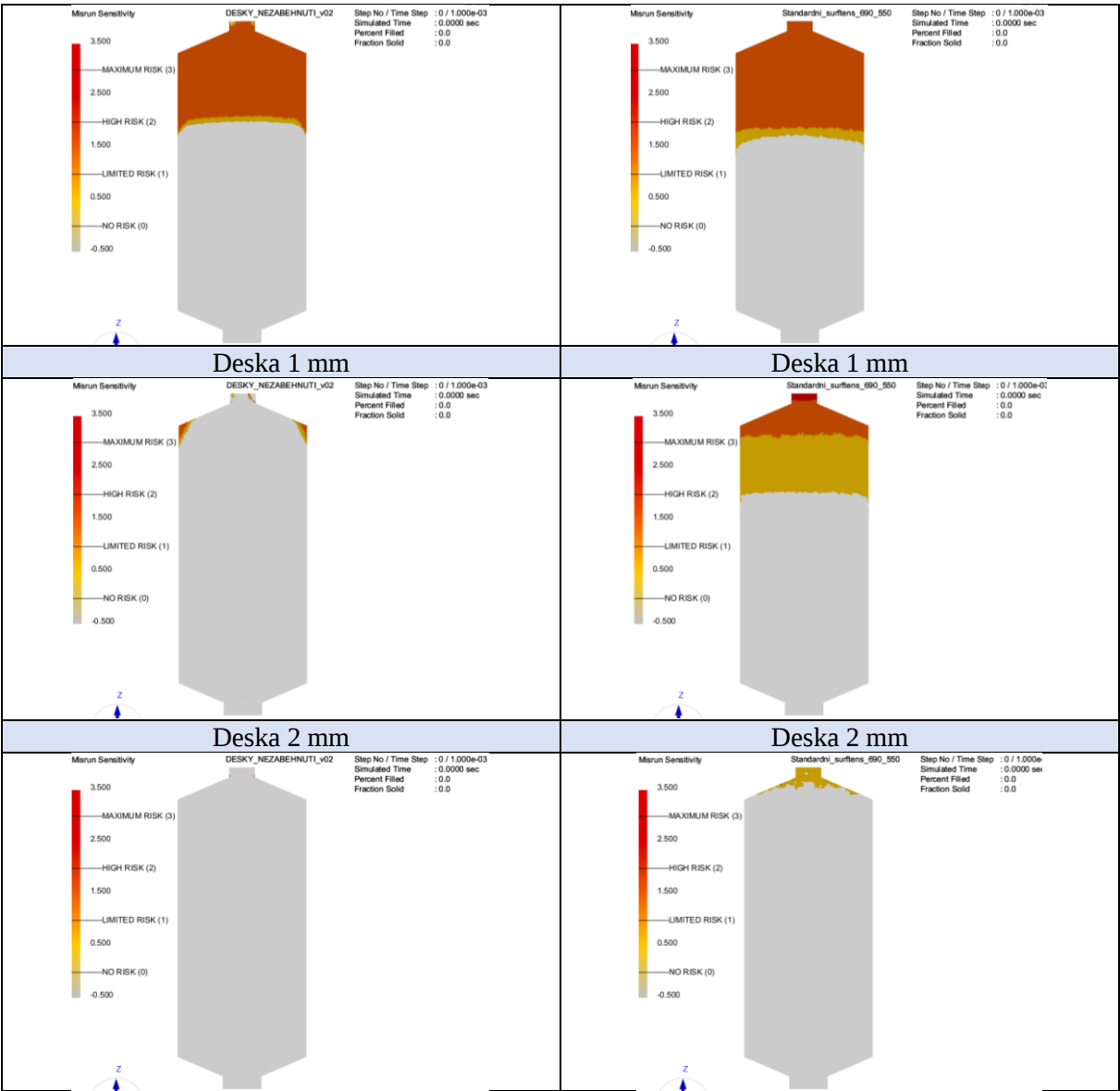
Podmínka	Hodnota
Slitina	AlSi7MgCu0,3
Počáteční teplota kovu	690 °C
Počáteční teplota skořepiny	550 °C
Flow model	standardní model
Varianty	V1 – bez aktivace povrchového napětí V2 – zadáno povrchové napětí 0.8 N/m
Křivka plnění	Vstupní rychlost viz tab. 7.4

Výsledky provedených analýz naznačují určitý vliv povrchového napětí na predikční kritérium Misrun Sensitivity. Bohužel u standardního modelu Flow3 nedochází k dosažení prahové hranice 3 (maximum risk), která značí maximální hladiny pro vznik nezaběhnutí kovu. Z tohoto důvodu by bylo nezbytné přeformulovat zadání na vyšší koeficienty přestupu tepla, nebo snížit prahovou úroveň na číslo 2 – tj. high risk. Zájem o výpočty a provedené experimenty projevila společnost ESI Group, která v současnosti uvažuje o společném výzkumu založeném na úpravě modelu dvoufázového plnění se zahrnutím povrchového napětí, které u tenkostěnných odlitků odlévaných do skořepin hraje významnou roli, jak je naznačeno v kapitole 7.6.3.

Tabulka 7.15 obsahuje část výsledků pro jednotlivé tloušťky testovacích segmentů. U stěny 0,5 mm není rozdíl na zkoumaném kritériu zcela patrný, pouze dochází ke zvětšení oblasti s limitovaným nebezpečím vzniku nezaběhnutí. Je pravděpodobné, že pro simulaci je tato tloušťka řízena zejména přestupem tepla. Pro ostatní stěny je rozdíl mezi výpočty markantnější a povrchové napětí významně ovlivňuje predikční kritérium Misrun Sensitivity.

Tab. 7.15 Porovnání simulace se zahrnutím povrchového napětí



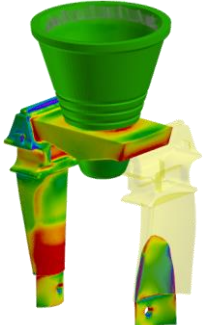


8. APLIKACE POZNATKŮ PŘI ODLÉVÁNÍ PRŮMYSLOVÝCH ODLITKŮ

Poznatky zjištěné ze studia zabíhavosti i další výsledky a výstupy výzkumných aktivit autora habilitační práce byly implementovány do řady řešených projektů v rámci VaV projektů, smluvního výzkumu a služeb řešených pro průmyslové partnery na FSI VUT v Brně. V tab. 8.1 jsou uvedeny některé z řešených projektů, u kterých byl určitý transfer know-how ve spojitosti se zabíhavostí.

Tab. 8.1 Výběr projektů s aplikací poznatků o odlévání tenkostěnných odlitků

Popis projektu	Řešení ve vztahu k zabíhavosti	Obrázek
Odlitky formule student [61], [129]	- Al odlitky – tl. stěny 1,5–3 mm - Návrhy technologičnosti konstrukce - Návrhy technologie odlévání - Optimalizace vtokových soustav a procesních parametrů - Návrhy materiálové skladby (Al, Mg)	
Odlitky motorového kajaku [145]	- Al odlitek – tl. stěny 1,3–4 mm - Návrhy technologičnosti konstrukce - Optimalizace lící teploty a teploty skořepiny	
Odlitky bloku motoru [146]	- Al odlitek – tl. stěny 2,5–10 mm - Návrhy technologie výroby - Optimalizace lící teploty - Návrh 3D tištěné formy	
Odlitky rotoru kompresoru se zalévanou hřídelí [147]	- Al odlitek – tl. stěny 2,5–5 mm - Návrhy technologie výroby - Optimalizace teploty skořepiny	

Odlitky válce	- Al odlitek – tl. stěny 2–5 mm - Návrhy technologie výroby - Optimalizace vtokové soustavy - Optimalizace teploty skořepiny	
Odlitek krycího bloku [147]	- Al odlitek – tl. stěny 3–8 mm - Návrhy technologie výroby - Optimalizace vtokové soustavy - Optimalizace teploty skořepiny	
Odlitky oběžných kol [148]	- Odlitky z korozi-vzdorné oceli - Síla stěn lopatek 2,5 mm - Optimalizace materiálu skořepiny a výroby bezjádřovou technologií	
Odlitky lopatek HS_GTK	- Odlitky z Ni-resistu - Řešení nezabíhavosti odtokové hrany - Optimalizace vtokové soustavy	
Odlitky hlavy válců [149]	- Odlitek z Al slitin - Optimalizace zabíhavosti tenkých žebér - Optimalizace teploty skořepiny	
Odlitky lopatek plynové turbíny [126]	- Odlitek z IN 718 - Optimalizace zabíhavosti odtokové hrany lopatky - Optimalizace izolace skořepiny	

9. ZÁVĚR A SHRNUTÍ VÝZEV VE ZKOUMANÉ OBLASTI

Výroba tenkostěnných odlitků pomocí slévárenské technologie nabývá za posledních deset let prudce na významu. Je to dáno několika faktory. Vysoká poptávka po lehkých konstrukcích (lightweighting), které vyvolal automobilový a letecký průmysl ve spojitosti se snižováním emisí, se výrazně promítl i do slévárenské technologie. Trend je jasně patrný ve výrazném nárůstu výroby odlitků z lehkých slitin, nicméně v tlakovém lití vedl např. k zavedení nových technologií, které jsou známé pod názvy mega a gigacasting (kapitola 2.2). Dalším faktorem, který tenkostěnné odlitky výrazně posunuje na své hranice, je 3D tisk, a to jak přímý tisk kovu, tak nepřímý ve výrobě tisku modelů a forem (kapitola 3.3). Rozvoj tohoto odvětví je nejdynamičtěji se vyvíjející současnou technologií výroby. Poptávka po „lightweight“ součástkách vede k maximálnímu využití optimalizačních technik, jako je topologická optimalizace a generativní design (kapitola 4.2 a 4.3). Další tlak spojený s rychlostí dodávek a minimalizací nákladů na daný výrobek vede k eliminaci montážních sestav do jednotlivých odlitků. Příkladem jsou díly karoserií automobilů, které sestávaly např. ze 70 dílů vyráběných hlubokým tažením plechů a bodového svařování. V dnešní době je možné tuto sestavu vyrobit jako jeden díl pomocí již zmíněné technologie megacasting. Rozvíjí se i další oblasti, jako je energetika, obranný průmysl, aerospace, které rovněž jdou cestou snižování hmotnosti, spojování celků, nicméně jejich zájem je o kusové a malosériové dodávky odlitků. To diskvalifikuje technologii tlakového odlévání s ohledem na obrovské vstupní náklady a klade výzvy na další technologii, která si s tenkostěnnými odlitky dokáže poradit, a to je technologie odlévání do keramických skořepin (IC).

Slévárenská technologie byla vždy velmi silná ve výrobě tvarově komplikovaných a tenkostěnných součástí. Nicméně tenkostěnný odlitek v minulosti znamenal u gravitačního odlévání Al odlitků tloušťky stěn 3–6 mm. Optimalizace hmotnosti, vylehčování konstrukcí, náhrada montážních celků a změna některých výrobních technologií vedly k tomu, že slévárny jsou tlačeny do výroby odlitků s tloušťkou stěny 1–2 mm a v některých případech i pod 1 mm. Znamená to, že předchozí znalosti o výrobě tenkostěnných odlitků nedostačují, protože se týkaly jiného segmentu součástí s jinými průřezy stěn a odlišnou rozlehlostí součástí. Z tohoto důvodu je nutné se znovu zabíhavostí jako technologickou vlastností nově a hlouběji zabývat, včetně její fundamentální podstaty.

Hliníkové slitiny na bázi AlSi

Kapitola 5.3.1 shrnuje poznatky ze zabíhavosti pro jednotlivé AlSi slitiny. Již dříve bylo ověřeno, že maximum zabíhavosti je v rozmezí 14–17 % Si. Význam těchto slitin pro tenkostěnné odlitky bude do budoucna narůstat a je nutné je více propagovat, aby se dostaly do povědomí konstruktérů, kteří v současné době znají pouze určité eutektické a podeutektické slitiny. Toto již pochopili někteří producenti primárních slitin a pod svými značkami začínají tyto slitiny prodávat. Značný rozmach v těchto názvech a použití můžeme sledovat v technologii vysokotlakého lití rozlehlých komponent. Na tomto poli se otevírají otázky studia prahových hodnot (critical solid fraction) podílů tuhé fáze, při kterých se tavenina blíží nulové tekutosti. Rovněž studium tuhnutí Al slitiny během plnění, tvorba mezních oxidických vrstev a jejich vliv na odpory při proudění je v literatuře dosud nepopsaná oblast.

Technologie IC ve vztahu k zabíhavosti

Tato technologie skýtá velké možnosti v požadavcích tenkostěnných odlitků. Propojení s 3D tiskem modelů ji otevírá pro výrobu tvarů, které mimo 3D tisk není schopna žádná jiná slévárenská technologie zajistit. Tyto geometrické výzvy jsou demonstrovány v kapitole 3.4. Možnosti robotizace otevřely cestu k výrobě skořepin pro velké rozměry přesahující 1000 mm. S tímto je spojena nutnost použití vhodných modelů s vyhovující drsností, řízení smáčivosti, a to jak smáčivosti při obalování, tak smáčivosti na rozhraní kov–skořepina. Řízením smáčivosti ve vztahu k zabíhavosti se víceméně nikdo nevěnoval. Jak vyplývá z provedených experimentů uvedených v kapitole 5.3.4, tak u destiček 0,5 mm nedojde k zaběhnutí ani při přehřátí taveniny a temperaci skořepiny na teplotu odlévání. Bylo tedy ověřeno, že dominantním vlivem je povrchové napětí. Ovlivňování smáčení v primární vrstvě, tj. povrchového napětí, může následně vést k možnostem snižování přehřevu skořepiny, a tím mimo jiné i k výrazné energetické úspoře. Samotný vliv teploty přehřevu je další oblastí, která byla studována (kap. 5.3.4) a bude i nadále, tak aby byly určeny procesní limity, ve kterých se jednotlivé tloušťky odlitků mohou pohybovat. Pro jednotlivé vlivy procesních parametrů byl sestaven plánovaný experiment (DOE), podle kterého probíhá příprava i hodnocení jednotlivých vlastních experimentů.

Aditivní technologie

Metoda 3D tisku je v práci zmíněna několikrát a bude na předních místech ve výzkumu i nadále. V technologii IC je použití 3D tisku spojeno s optimalizací kvality a rychlosti tisku, s materiálovými vlastnostmi a rozměrovými změnami. Speciálně u velkoformátových odlitků bude 3D tisk nahrazovat vstřikování vosku do matečných forem. Současná kvalita z technologií SLA se blíží kvalitě voskových modelů a finančně se již blíží obdobné cenové hladině. Na VUT v Brně probíhá výzkum vlivu jednotlivých procesních faktorů 3D tiskem zhotovených modelů na praskání skořepin ve fázích vytavování/vypalování modelu. Zajímavou oblastí vlastního výzkumu je i hodnocení tvarových a rozměrových změn modelů při 3D tisku i v průběhu jejich obalování, vytavovování (vypalování) i následně po výrobě odlitku. K hodnocení změny tvaru a rozměrů odlitků je využíváno metod 3D skenování. Všechny tyto znalosti jsou nezbytné pro výrobu skořepin bez porušení celistvosti, které je základním předpokladem kvalitní a úspěšné výroby. Do popředí se bude dostávat i tisk keramických jader, forem i keramických filtrů. Tato technologie dramatickým způsobem zkracuje dobu výroby prototypového dílu, a tím výrazně zkracuje celkový „lead time“ produktu.

Numerická simulace

Numerická simulace IC technologie je specifická vůči ostatním technologiím. Touto oblastí se zabývám již více než 20 let. Výstupem této činnosti jsou zejména výzkum a vývoj aplikace numerických simulací v technologii IC. Především vzájemné osalávání odlitků a potřeba simulace nukleace a růstu zrn u náročných aplikací vytváří ze simulace samostatnou disciplínu, které je nutné věnovat značnou pozornost. V současné době bez simulace plnění a tuhnutí nevzniká téměř žádná složitější výrobní technologie. S použitím stěn odlitku menší než 2 mm však do výpočtu výrazně vstupuje povrchové napětí, jehož znalost a vliv na proudění bude stěžejní pro správnou predikci zaběhnutí odlitku. V této oblasti tedy bude nutné dokončit vývoj řešiče se zahrnutím dvoufázového plnění s aplikací povrchového napětí, což je již diskutované téma mezi výzkumníky firmy ESI Group a VUT v Brně. Získané experimentální zkušenosti a testované sestavy budou využity k validaci nově navržených řešičů, stejně jako data získaná při

experimentálním měření kontaktních úhlů a povrchového napětí. Vše bude směřovat k vývoji nových, případně upřesnění stávajících predikčních kritérií ve vztahu k zabíhavosti. U výroby tenkostěnných a tvarově rozlehlých odlitků nebudou simulace ukončeny po fázi plnění, ale bude následovat velmi krátká fáze tuhnutí a zejména fáze chladnutí, která je spojena s termomechanickým výpočtem a vznikem deformací. Tato fáze výpočtu bude značně nabývat na významu a vývoj se bude snažit zjistit data potřebná k tomuto výpočtu nejen na straně kovu, ale zejména na straně skořepiny, jelikož tato data nebyla doposud měřena. Využívá se pouze tzv. rigid modelů, které nerespektují určitou plasticitu keramických forem.

10. PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

Předložená práce se věnuje tématu výroby tvarově složitých a tenkostěnných hliníkových odlitků s využitím moderní a progresivní technologie odlévání na vytavitelný/vypalitelný model. Uvedená technologie výroby odlitků a problematika zabíhavosti Al slitin je předmětem výzkumu již po dlouhá desetiletí. Významné změny, které zaznamenáváme v posledních letech, jsou vyvolány zcela novými a náročnějšími požadavky na tvarovou složitost strojních součástí. Jak je i ve vlastní práci uvedeno, jsou tyto změny vyvolány trendy v redukci hmotnosti součástí, trendy v použití konstrukčních optimalizačních metod a implementací aditivních metod výroby

Moderní přístupy optimalizace tvaru strojních součástí pomocí generativního designu topologické optimalizace často opomíjí technologičnost konstrukce výrobku pro konvenční technologie, jelikož se předpokládá jejich výroba pomocí přímého 3D tisku kovu. Zákazník však musí akceptovat obvykle podstatně vyšší cenovou hladinu a v případě větší sériovosti výroby je jedinou ekonomicky únosnou variantou slévárenská technologie. Pro výrobu tvarově komplikovaných odlitků, které nelze již konvenční slévárenskou technologií vyrobit je využívána hybridní technologie přesného lití s modely vyráběnými postupy 3D tisku. Výroba tvarově komplikovaných a velmi často i tenkostěnných dílů však sebou přináší značnou náročnost výroby s vysokým rizikem neshodné výroby, kterou nelze podstoupit bez hlubší znalosti charakteru a rychlosti plnění dutiny formy a problematiky tuhnutí a chladnutí tenkostěnných odlitků.

Tato práce přináší nové poznatky pro vědu zejména v oblasti smáčivosti žárovzdorných oxidických keramik taveninou Al-Si a vlivu jejího povrchového napětí na zabíhavost do keramických skořepinových forem. V rámci výzkumu byla ve spolupráci s Łukasiewicz – KIT institutem v Krakově vytvořena metodika anizotermického měření smáčivosti a povrchového napětí v systému tavenina-skořepina. Habilitační práce přináší i unikátní výsledky měření kontaktních úhlů pro vybranou hliníkovou slitinu, a to v závislosti na materiálu substrátu (podložky) a teplotě. Výsledkem je ojedinělá databáze hodnot kontaktních úhlů a povrchových napětí pro taveniny slitin Al-Si a několik typů keramických substrátů (materiálů skořepin). Pro zkoumání fyzikální podstaty proudění tavenin v tenkostěnných skořepinových formách byl na základě numerických simulací plnění a tuhnutí odlitků vytvořen nový tvar zkušební tělesa, optimalizovaný pro technologické zkoušky zabíhavosti při odlévání do keramických skořepinových forem. Nově vyvinutá technologická zkouška umožňuje hodnotit vliv odporu formy vůči proudění, který je vyvolán smáčivostí a povrchovým napětím tavenin. Tento zkušební odlitek byl detailně vyhodnocen nejen z hlediska numerických simulací, ale i rozsáhlých experimentálních výsledků. Přínosem práce pro vědu i praxi jsou v ověření použití numerických simulací k analýze vlivu povrchového napětí na zabíhavost hliníkových slitin včetně ověření a uplatnění nekonvenčních výpočtových modulů. V rámci práce byla vytvořena a popsána metodika pro modelování proudění tavenin v tenkostěnných průřezích i metodika pro její hodnocení. Přínosem práce i vlastního výzkumu jsou nejen přesnější termofyzikální data a definice okrajových podmínek, ale i zavedení fyzikálních parametrů do simulací, které dříve nebyly zohledňovány, protože byly dosud považovány za méně významné. Jedná se právě o povrchové napětí kapalin při plnění tenkých stěn odlitku a rovněž o vývoj a validaci predikčních kritérií. V oblasti výzkumu a vývoje nových predikčních kritérií zabíhavosti je dále prohlubována spolupráce s vývojovým oddělením společnosti ESI Group. Další významnou oblastí vlastního výzkumu je analýza vlivu prodyšnosti skořepin na zabíhavost slitin v

keramických skořepinových formách. Závislosti prodyšnosti skořepin na zabíhavosti byly dosud v odborné literatuře řešeny pouze velmi okrajově a výsledky vlastního výzkumu a této práce mají významný přínos pro vývoj výrobních technologií a dalšího výzkumu tenkostěnných a tvarově rozlehklých odlitků. Zásadní přínos této práce pro praxi lze také spatřovat v realizaci unikátního experimentální zařízení vyvinutého na Odboru slévárenství, FSI, VUT v Brně, které umožňuje měření prodyšnostmi za pokojových i vysokých teplot včetně měření pevnosti skořepin v závislosti na teplotě. V rámci vlastního výzkumu byly stanoveny závislosti prodyšnosti keramických skořepin na materiálu skořepiny, technologii její výroby, teplotě skořepiny a počtu obalů. Výsledky byly porovnány s některými publikovanými výsledky a jsou s nimi ve velmi dobré shodě. Prodyšnost skořepinové formy hraje významnou úlohu i u některých technologiích, které se mohou použít na zvýšení zabíhavosti tavenin. Jedná se zejména o technologii aplikace vakua při odlévání skořepiny. Tato technologie může s nárůstem tenkostěnných Al odlitků nabývat na významu a bude nutné ji blíže studovat a vyvíjet.

Pro průmyslovou praxi jsou z habilitační práce přímo využitelné poznatky týkající se vlivů vybraných technických a fyzikálních parametrů na zabíhavost hliníkových slitin v keramických skořepinových formách. Navržené zkušební těleso může být replikováno a použito do stejné výrobní technologie a výsledky jsou porovnatelné pro libovolnou změnu parametrů skořepin, případně pro změnu procesních parametrů. Předpokládá se, že i v následných výzkumech budou realizovány další experimenty tak, aby byly využity pro komplexní hodnocení zabíhavosti hliníkových slitin v technologii přesného lití na vytavitelný model. Vytvoření regresních rovnic pro jednotlivé vlivy v závislosti na tloušťce stěny bude jednou z přímých aplikací a výstupů vlastního výzkumu a vývoje autora práce pro průmyslovou praxi.

Do popředí se dostává i tisk keramických jader, forem i keramických filtrů. Toto je téma, které je opět na VUT rozvíjeno ve spolupráci s průmyslovým partnerem vyrábějícím keramické filtry a navazuje na výsledky získané v rámci předchozího výzkumného projektu. Některé dílčí výsledky z tohoto projektu získané vlastním výzkumem jsou i v práci uvedeny jako např. unikátní výsledky z měření kontaktních uhlů a povrchových napětí tavenin na bázi Al-Si. U složitých tenkostěnných výrobků se do budoucnosti předpokládá společně s tiskem jader tisk několika prvních vrstev, na které budou následně aplikovány další vrstvy robotickým obalováním. Tato technologie dramatickým způsobem zkracuje dobu výroby prototypového dílu, a tím výrazně zkracuje celkový „lead time“ produktu.

Autor práce se zásadním podílem zasadil o vývoj a uplatnění technologie přesného lití na vytavitelný model na FSI, VUT v Brně pro potřeby výuky, vědu a výzkum i spolupráci s průmyslem. S využitím výsledků vlastního výzkumu a této práce i současně s využitím mezinárodních kontaktů v oblasti technologie na vytavitelný model navrhl a realizoval v roce 2023 a 2024 dva ročníky mezinárodního kurzu pro EICF (European Investment Casters' Federation). Pořádání těchto kurzů na půdě FSI přináší nejen finanční přínos, ale také publicitu a vysokou prestiž pro celou fakultu v rámci evropských univerzit i průmyslové praxe. Nová laboratoř přesného odlévání, rychlá výroba prototypů, aditivní technologie, vývoj metalurgie jsou body, které ve dvou ročnících přivedly na VUT v Brně jako posluchače materiálové a technologické specialisty z 15 evropských zemí.

Výsledky vlastního výzkumu uvedené v práci z oblasti generativního designu, topologické optimalizace a aditivních technologií vedly také k tvorbě a zavedení nového předmětu Aditivní

technologie ve slévárenství (PTS) v rámci navazujícího magisterského studia ve studijním programu Slévárenská technologie.

11. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
a	teplotní vodivost	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
c_p	měrná tepelná kapacita	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
f_s	podíl tuhé fáze	$[-]$
$H(h)$	tlaková výška	$[\text{m}]$
$h(\alpha)$	koeficient přestupu tepla	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
H_f	entalpie	$[\text{J}]$
L, L_f	celková délka zaběhnutí	$[\text{m}]$
P	tlak	$[\text{Pa}]$
Q	teplo	$[\text{J}]$
q	tepelný tok	$[\text{W}]$
t	tloušťka stěny	$[\text{mm}]$
v	rychlost proudění taveniny	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
γ	povrchové napětí	$[\text{Nm}^{-1}]$
θ	úhel smáčení	$[\text{°}]$
μ	kinematická viskozita	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
τ	čas	$[\text{s}]$
ε	emisivita	$[-]$
η	dynamická viskozita	$[\text{Pa} \cdot \text{s} = \text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}]$
λ	součinitel tepelné vodivosti	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
ξ_i	součinitel hydraulických odporů	$[-]$
ρ	hustota	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
φ	tekutost	$[\text{N}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^2]$

ZKRATKA	LEGENDA
BJ – Binder Jetting	Metoda 3D tisku
CAD – Computer Aided Design	Počítačem podporované navrhování
CAE – Computer Aided Engineering	Počítačem podporované inženýrství
CE – Carbon Equivalent	Uhlíkový ekvivalent
CFS – Critical Fraction Solid	Kritická hodnota tuhé fáze
CP – Capillary Purification	Kapilární čištění
Cut-off	Prahová hodnota nastavení kritéria
FDM – Fused Deposition Modeling	Metoda 3D tisku
FEM – Finite Element Method	Metoda konečných prvků
FFF – Fused Filament Fabrication	Metoda 3D tisku
GD – Generative Design	Generativní konstruování (design)
HPDC – High Pressure Die Casting	Vysokotlaké odlévání
HTC – Heat Transfer Coefficient	Koeficient přestupu tepla
IC – Investment Casting	Technologie odlévání na vytavitelný/vypalitelný model
LPDC – Low Pressure Die Casting	Nízkotlaké odlévání
TWADI – Thin Walled Austempered Ductile Iron	Tenkostěný odlitek z bainitické litiny
TWC – Thin Wall Casting	Tenkostěnný odlitek
TWCI – Thin Walled Cast Iron Casting	Tenkostěný odlitek z litiny
TWDI – Thin Walled Ductile Iron	Tenkostěnný odlitek z litiny s kuličkovým grafitem
TWVGCI – Thin Wall Vermicular Graphite Cast Iron	Tenkostěnný odlitek z litiny s červíkovitým grafitem
VOF – Volume of Fluid	Metoda modelování volné hladiny

12. LITERATURA

- [1] HORNUNG, H. Thin-section ductile iron castings. In: *Proceedings of the 61th World Foundry Congress*. Beijing, China, 1995, s. 75-83.
- [2] Výpočet emisí CO₂. online. In: Autolexicon. 2024. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/vypocet-emisi-co2>. [cit. 2024-10-10].
- [3] Emise CO₂ z aut: fakta a čísla: Evropský parlament, témata. online. In: . Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/topics/cs/article/20190313STO31218/emise-co2-z-aut-fakta-a-cisla-infografika>. [cit. 2024-12-03].
- [4] LEINVEBER, Jiří a VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky: učebnice pro školy technického zaměření*. Sedmé vydání. Úvaly: Albra, 2021. ISBN 978-80-7361-124-8.
- [5] SCHEY, John A. *Introduction to manufacturing processes*. New York: Mac Graw-Hill, 1977.
- [6] DADIĆ, Z; ŽIVKOVIĆ, D a ČATIPOVIĆ, N. Tribological wear mechanisms of molds for high pressure die casting. *METALURGIJA*. 2016, roč. 20162, č. 55, s. 249-252. ISSN 0543-5846.
- [7] PREMIUM PARTS. *Die Casting Design Guidelines*. online. In: . Dostupné z: <https://www.premiumparts.com/design-tips/die-casting-design-guidelines>. [cit. 2024-10-11].
- [8] BEELEY, Peter R. a SMART, Robert F. *Investment casting*. Druhé vydání. Velká Británie: Maney Publishing, 2008. ISBN 9781906540579.
- [9] *Guidelines: Wall Thicknesses for Die Castings*. online. 2024. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/guidelines-wall-thickness-die-castings-%E5%8E%8B%E9%93%B8%E4%BB%B6%E5%A3%81%E5%8E%9A-beck-wu/>. [cit. 2024-10-17].
- [10] VOIGT, Robert C.; BERTOLETTI, Joseph; KALEY, Andrew; RICOTTA, Sandi a TRAVIS, Sunday. *Fillability of Thin-Wall Steel Castings*. online, report. University Park, Pennsylvania: University of North Texas, 2002. Dostupné z: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc738818/>. [cit. 2024-10-17].
- [11] Průmyslové odlitky. online. In: *COB Slévárna Beňov*. 2024. Dostupné z: <https://www.slevarna-cob.cz/prumyslove-odlitky/>. [cit. 2024-10-17].
- [12] Stainless Steel Investment Casting. online. In: *Harbor Casting*. 2024. Dostupné z: <https://www.harborinvestmentcastings.com/investment-casting-services/stainless-steel-investment-casting/>. [cit. 2024-10-17].
- [13] VIDYARTHEE, Ganesh a SINGH, K.K. Effect of wall thickness and heat treatment variables on structural propertie of austempered ductile irons. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2016, roč. 7, č. 2, s. 434-443. ISSN 2229-5518.

-
- [14] MARTINEZ, R.A.; BOERI, R. E. a SIKORA, J. A. Application of ADI in high strength thin wall automotive parts. In: *World Conference on ADI*. Louisville, KY (USA): Ductile Iron Society and the American Foundry Society, 2002, s. 26-31.
- [15] FRAŚ, E. a GÓRNY, M. Thin wall austempered ductile iron (TWADI). *Archives of Foundry Engineering*. 2009, roč. 9, č. 32009, s. 45-48.
- [16] IBRAHIM, Mervat M.; NOFAL, Adel a MOURAD, M. M. Microstructure and Hot Oxidation Resistance of SiMo Ductile Cast Irons Containing Si-Mo-Al. online. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2017, roč. 48, č. 2, s. 1149-1157. ISSN 1073-5615. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0871-y>. [cit. 2024-10-14].
- [17] GÓRNY, Marcin; KAWALEC, Magdalena; GRACZ, Beata a TUPAJ, Mirosław. Influence of Cooling Rate on Microstructure Formation of Si-Mo Ductile Iron Castings. online. *Metals*. 2021, roč. 11, č. 10. ISSN 2075-4701. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/met11101634>. [cit. 2024-10-14].
- [18] BEHERA, Ajit a MISHRA, S. C. A novel material used in automotive industry: compacted graphite iron. online. *Emerging Materials Research*. 2012, roč. 1, č. 5, s. 271-274. ISSN 2046-0147. Dostupné z: <https://doi.org/10.1680/emr.12.00002>. [cit. 2024-10-17].
- [19] HOLMGREN, D. Review of thermal conductivity of cast iron. online. *International Journal of Cast Metals Research*. 2013, roč. 18, č. 6, s. 331-345. ISSN 1364-0461. Dostupné z: <https://doi.org/10.1179/136404605225023153>. [cit. 2024-10-14].
- [20] GÓRNY, M. a KAWALEC, M. Role of Titanium in Thin Wall Vermicular Graphite Iron Castings Production. online. *Archives of Foundry Engineering*. 2013, roč. 13, č. 2, s. 25-28. ISSN 1897-3310. Dostupné z: <https://doi.org/10.2478/afe-2013-0030>. [cit. 2024-10-14].
- [21] FRAŚ, E.; GÓRNY, M. a KAPTURKIEWICZ, W. Thin Wall Ductile Iron Castings: Technological Aspects. online. *Archives of Foundry Engineering*. 2013, roč. 13, č. 1, s. 23-28. ISSN 1897-3310. Dostupné z: <https://doi.org/10.2478/afe-2013-0005>. [cit. 2024-10-17].
- [22] FRAŚ, E.; GÓRNY, M. a LOPEZ, H. Thin Wall Ductile Iron Castings as Substitutes for Aluminium Alloy Castings. online. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2014, roč. 59, č. 2, s. 459-465. ISSN 2300-1909. Dostupné z: <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0076>. [cit. 2024-10-17].
- [23] BORSATO, Thomas; FERRO, Paolo; BERTO, Filippo a CAROLLO, Carlo. Effect of Solidification Time on Microstructural, Mechanical and Fatigue Properties of Solution Strengthened Ferritic Ductile Iron. online. *Metals*. 2019, roč. 9, č. 1. ISSN 2075-4701. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/met9010024>. [cit. 2024-10-17].
- [24] STEFANESCU, D.M. a RUXANDA, R. Lightweight iron castings – can they replace aluminium castings?. In: *Proceedings of the 65th World Foundry Congress*. Gyeongju, Korea, 2002, s. 71-77.
- [25] AFTERHEIDE, R a SHOWMAN, R. A process for thin - wall castings. *AFS Transactions*. 2003, roč. 111, č. 03-145, s. 1-12.
- [26] JAFARI, H.; IDRIS, M.H. a OURDJINI, A. Influence of gating system, sand grain size, and mould coating on microstructure and mechanical properties of thin-wall ductile iron. *Iron Steel Res. Int.* 2010, č. 17, s. 38-45.

-
- [27] CHAROENVILASIRI, S.; STEFANESCU, D. M. a RUXANDA, R. Thin Wall Compacted Graphite Iron Castings. *AFS Transactions*. 2002, roč. 110, č. 02-176, s. 1113-1130.
- [28] Made In China. online. In: *Ductile Iron*. Dostupné z: https://www.made-in-china.com/products-search/hot-china-products/Machinery_Parts_Gravity_Die_Casting.html. [cit. 2024-10-17].
- [29] Sapal Trade. online. In: *Odlitky*. Dostupné z: <http://www.sapaltrade.cz/odlitky.htm>. [cit. 2024-10-17].
- [30] CYGAN, B.; STAWARZ, M. a JEZIERSKI, J. Heat Treatment of the SiMo Iron Castings – Case Study in the Automotive Foundry. online. *Archives of Foundry Engineering*. s. 103-109. ISSN 2299-2944. Dostupné z: <https://doi.org/10.24425/afe.2018.125177>. [cit. 2024-07-19].
- [31] EngineLabs. online. In: *EngineTech*. Dostupné z: <https://www.enginelabs.com/engine-tech/darts-latest-revisions-m2-small-and-big-block-chevy-castings/>. [cit. 2024-10-17].
- [32] SCHWAM, D. a MILLER, A. *Thin-Wall and High-Strength Die Casting Alloys: Final report*. NADCA, 2017.
- [33] DASH, Soumya Sobhan a CHEN, Daolun. A Review on Processing–Microstructure–Property Relationships of Al-Si Alloys: Recent Advances in Deformation Behavior. online. *Metals*. 2023, roč. 13, č. 3. ISSN 2075-4701. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/met13030609>. [cit. 2024-10-18].
- [34] HESAMI, Farshid. *Giga Casting and Giga Presses in the Automotive Industry*. online. 2024. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/giga-casting-presses-automotive-industry-farshid-hesami-jmumf/>. [cit. 2024-10-18].
- [35] LUO, Alan A. Magnesium casting technology for structural applications. online. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2013, roč. 1, č. 1, s. 2-22. ISSN 22139567. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jma.2013.02.002>. [cit. 2024-10-18].
- [36] LAUKÖTTER GMBH. Magnesium Casting. online. In: LAUKÖTTER GMBH. 2024. Dostupné z: <https://www.laukoetter.com/en/die-casting/magnesium>. [cit. 2024-10-18].
- [37] ZINTILON. High Pressure Die Cast Magnesium for Automotive. online. In: ZINTILON. Dostupné z: <https://www.zintilon.com/blog/high-pressure-die-cast-magnesium-for-automotive/>. [cit. 2024-10-18].
- [38] KRONEMAN, Logan P. *INVESTMENT CASTING OF THIN SECTIONS IN SUPERALLOYS*. Disertace. Indiana: Purdue University, 2018.
- [39] KANG, M. D.; WANG, J.; GAO, H. Y.; HAN, Y. F.; SHU, D. et al. Study on the castability and mechanical properties of thin-walled nickel-base superalloy. online. *Materials Science and Technology*. 2016, roč. 33, č. 3, s. 326-332. ISSN 0267-0836. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/02670836.2016.1204070>. [cit. 2024-10-18].
- [40] RAKOCZY, Łukasz; GRUDZIEŃ-RAKOCZY, Małgorzata a CYGAN, Rafał. The Influence of Shell Mold Composition on the As-cast Macro- and Micro-structure of Thin-Walled IN713C Superalloy Castings. online. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2019, roč. 28, č. 7, s. 3974-

3985. ISSN 1059-9495. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04098-9>. [cit. 2024-10-18].
- [41] CHANGYUN, Li; SHIPING, Wu; JINGJIE, Guo; YANQING, Su; WEISHENG, Bi et al. Model experiment of mold filling process in vertical centrifugal casting. online. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006, roč. 176, č. 1-3, s. 268-272. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.04.004>. [cit. 2024-10-18].
- [42] BARRON INDUSTRIES. *Cobalt alloy*. online. In: . Dostupné z: <https://www.barron-industries.com/investment-castings/materials/cobalt-investment-castings/>. [cit. 2024-10-18].
- [43] LEE, David. Thin wall titanium structural castings. online. In: *Gale Academic OneFile*. Dostupné z: <https://go.gale.com/ps/i.do?id=GALE%7CA131809009&sid=googleScholar&v=2.1&it=r&linkaccess=abs&issn=08827958&p=AONE&sw=w&userGroupName=anon%7Ebf78bfbf&aty=open-web-entry>. [cit. 2024-10-18].
- [44] Produkty a služby. online. In: . Dostupné z: <https://www.praguecast.cz/cs/produkty-a-sluzby>. [cit. 2024-10-18].
- [45] ForceBeyond: Titanium casting and alloys. online. In: . Dostupné z: <https://www.forcebeyond.com/titanium-casting/>. [cit. 2024-10-18].
- [46] GRANDE CASTING. Cobalt based alloy casting. online. In: GRANDE CASTING. Dostupné z: <https://www.gdcast.com/investment-casting-alloys/cobalt-based-alloy-castings.html>. [cit. 2024-10-18].
- [47] KUMAR, Parland; SINGH, Rupinder a AHUJA, IPS. A Framework for Developing a Hybrid Investment Casting Process. online. *Asian Review of Mechanical Engineering*. 2013, roč. 2, č. 2, s. 49-55. Dostupné z: <https://www.trp.org.in/wp-content/uploads/2016/11/ARME-Vol.2-No.2-July-Dec-2013pp.49-55.pdf>. [cit. 2024-10-18].
- [48] OLABE, Carlos. *Europe IC Market Study: EICF interní dokument*. 2023.
- [49] FRITZ, J. *North America IC Market Review: ICI studie, interní dokument*. 2023.
- [50] HORÁČEK, Milan. *Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu*. Vědecké spisy Vysokého učení technického v Brně. Habilitační a inaugurační spisy. Brno: VUTIUUM, 2004. ISBN 80-214-2558-X.
- [51] SHINNING METALS. Investment Casting Production Process. online. In: SHINNING METALS. Dostupné z: <https://www.shinningcorp.com/Investment-Casting-Production-Process-n.html>. [cit. 2024-10-18].
- [52] CAMPBELL, John. *Castings*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2003. ISBN 0-7506-4790-6.
- [53] 3D SYSTEMS. Investment casting: The Digital Foundry by 3D Systems. online. In: 3D SYSTEMS. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/applications/casting>. [cit. 2024-10-18].
- [54] ROBOCASTING: 3D printing of ceramic. online. In: . Dostupné z: <https://robocasting.com/>. [cit. 2024-10-18].

-
- [55] 3D PRINT.COM. Admatec and Aristo-Cast Directly 3D Printing Investment Casting Shells. online. In: 3D PRINT.COM. Dostupné z: <https://3dprint.com/239377/admatec-aristo-cast-3d-printing-investment-casting-shells/>. [cit. 2024-10-18].
- [56] HORÁČEK, Milan. *Prezentace v předmětu Simultánní inženýrství*. 2021.
- [57] DUNE, P. *Evolution and advancements in Stereolithography (SLA) investment casting patterns*. EICF, Napoli. 2024.
- [58] CILEČEK, Jarmil. *Tenkostěnné odlitky z Al slitin firmy Alucast s.r.o.: Interní dokument*. 2024.
- [59] CAMPBELL, John a CAMPBELL, John. *Castings practice: the 10 rules of castings*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2007. ISBN isbn0750647914.
- [60] TOMOVIČ, Mileta. Designing Thin Section. *AFS, Casting design notebook*. 2003, s. 47-50. ISSN 00267562.
- [61] KRUTIŠ, V.; ŠPRTA, P.; KAŇA, V.; ZADERA, A. a CILEČEK, J. Integration of Virtual Engineering and Additive Manufacturing for Rapid Prototyping of Precision Castings. online. *Archives of Foundry Engineering*. s. 51-55. ISSN 2299-2944. Dostupné z: <https://doi.org/10.24425/afe.2021.136077>. [cit. 2024-10-31].
- [62] KRUTIŠ, Vladimír; KAŇA, Václav a DOSTÁL, Marek. *EFFICIENT METHOD OF MANUFACTURING DEMANDING PROTOTYPE CASTINGS USING INVESTMENT CASTING TECHNOLOGY: Přednáška na: 19th INTERNATIONAL FOUNDRYMEN CONFERENCE, Humans - Valuable Resource for Foundry Industry Development*. 2020.
- [63] ROHMANN, J. *Design Optimization in Early Project Stages*. Master thesis. Munich: Technical University of Munich., 2019.
- [64] NAGY, Danil; ZHAO, Dale a BENJAMIN, David. Nature-Based Hybrid Computational Geometry System for Optimizing Component Structure. online. In: DE RYCKE, Klaas; GENGNAGEL, Christoph; BAVEREL, Olivier; BURRY, Jane; MUELLER, Caitlin et al. *Humanizing Digital Reality*. Singapore: Springer Singapore, 2018, s. 167-176. ISBN 978-981-10-6610-8. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-981-10-6611-5_15. [cit. 2024-10-31].
- [65] KRUTIŠ, Vladimír; MADAJ, Martin a KOLDA, Vlastimil. Virtuální prototypování – cesta k optimálnímu návrhu a výrobě odlitků. *Slévárenství*. 2020, roč. 68, č. 11-12, s. 229-305. ISSN 0037-6825.
- [66] MARINOV, Martin; AMAGLIANI, Marco; BARBACK, Tristan; FLOWER, Jean; BARLEY, Stephen et al. Generative Design Conversion to Editable and Watertight Boundary Representation. online. *Computer-Aided Design*. 2019, roč. 115, s. 194-205. ISSN 00104485. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2019.05.016>. [cit. 2024-10-31].
- [67] *VisualCAST, interní manual sw ProCAST: Guidline*. 2020.
- [68] FLEMINGS, M.C. Fluidity of metals-- techniques for producing ultra-thin section castings. British Foundryman, 1964. 57: p. 312. *British Foundryman*. 1964, č. 57, s. 312-325.

-
- [69] INVESTMENT CASTING INSTITUTE. *Casting defect*. online. Dostupné z: <https://61746c6173.investmentcasting.org/wax/defect/non-fill/index.html>. [cit. 2024-11-01].
- [70] JOLLY, Mark a KATGERMAN, Laurens. Modelling of defects in aluminium cast products. online. *Progress in Materials Science*. 2022, roč. 123. ISSN 00796425. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100824>. [cit. 2024-11-01].
- [71] KAREM, WALEED ABDUL. *VIBRATION ASSISTED FILLING OF THIN SECTION CASTINGS*. Disertační práce. Birmingham B15 2TT, UK: School of Engineering The University of Birmingham, 2009.
- [72] FLEMINGS, M.C.; MOLLARD, F.R. a NIYAMA, E.F. Fluidity of aluminium. *AFS Transactions*, 70:1029–1039. *AFS Transactions*. 1962, roč. 70, s. 1029–1039.
- [73] CAMPBELL, John. *Complete casting handbook: metal casting processes, metallurgy, techniques and design*. 1st ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. ISBN 978-1-85617-809-9.
- [74] RAZA, Mohsin. *PROCESS DEVELOPMENT FOR INVESTMENT CASTING OF THIN-WALLED COMPONENTS: MANUFACTURING OF LIGHT WEIGHT COMPONENTS*. Disertace. Västerås, Sweden: Mälardalen University, 2015.
- [75] CAMPBELL, John a OLIFF, I.D. Static and dynamic criteria for filling of thin section molds. 7, 55, Jan 1971. *AFS Cast Metals Research Journal*. 1971, roč. 55, s. 55-61.
- [76] SIN, S. Lun a DUBE, D. Influence of process parameters on fluidity of investment-cast az91d magnesium alloy. *Material Science and Engineering*. 2004, roč. 38634–42, s. 34-42.
- [77] CAPADONA, J.A. a ALBRIGHT,, D.L. Review of fluidity testing as applied to lost polystyrene investment castings. *AFS Transactions*. 1978, roč. 86, s. 43-54.
- [78] FLEMINGS, M.C. *Solidification processes*. McGraw-Hill Inc, 1974. ISBN 0-07-021283-x.
- [79] GRANDE, Marco Actis a FORNO, Ilaria. INNOVATION AND OPTIMIZATION OF THE INVESTMENT CASTING OF PRECIOUS ALLOYS. online. *Acta Metallurgica Slovaca*. 2014, roč. 20, č. 3, s. 341-352. ISSN 1338-1156. Dostupné z: <https://doi.org/10.12776/ams.v20i3.365>. [cit. 2024-11-01].
- [80] DI SABATINO, M. a ARNBERG, L. Effect of grain refinement and dissolved hydrogen on the fluidity of A356 alloy. online. *International Journal of Cast Metals Research*. 2013, roč. 18, č. 3, s. 181-186. ISSN 1364-0461. Dostupné z: <https://doi.org/10.1179/136404605225022982>. [cit. 2024-11-01].
- [81] ADEFUYE, O.A. CASTING FLUIDITY OF COMMERCIAL PURE Al-Si CASTING ALLOYS. *Transnational Journal of Science and Technology*. 2014, roč. 4, č. 1, s. 16-30. ISSN 1857-8047.
- [82] MYŠKA, M. *Vliv chemického složení, licí teploty a použité dezoxidace na technologické vlastnosti austenitických chromniklových ocelí*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017.
- [83] HORÁČEK, Milan. Test zabíhavosti; Těleso pro testování zabíhavosti sévárenských slitin ve skořepinových formách. FSI A1-1726.: Projekt TA01010766 , FSI A1-1726. online. In: . Dostupné z: http://www.fimes.mesit.cz/public/files/4/alfa_vysledky/TA01010766_V006_03.pdf. [cit. 2024-11-01].

-
- [84] CHANDRASECKARIAH, H. a SESHAN, S. Effect of Foundry Variables on Fluidity of Investment Cast Nickel-Base Super alloys. *Transactions of the American Foundry Society*. roč. 2002, č. 110, s. 681–695.
 - [85] RAZA, Mohsin; SVENNINGSSON, Roger a IRWIN, Mark. EXPERIMENTAL STUDY OF THE FILLING OF THIN-WALLED INVESTMENT CASTINGS IN 17-4PH STAINLESS STEEL. online. *Metallurgy and Foundry Engineering*. 2015, roč. 41, č. 2. ISSN 1230-2325. Dostupné z: <https://doi.org/10.7494/mafe.2015.41.2.85>. [cit. 2024-11-01].
 - [86] RAZA, Mohsin; SVENNINGSSON, Roger; IRWIN, Mark; FÄGERSTRÖM, Björn a JARFORS, Anders E. W. Effects of Process Related Variations on Fillability Simulation of Thin-Walled IN718 Structures. online. *International Journal of Metalcasting*. 2018, roč. 12, č. 3, s. 543-553. ISSN 1939-5981. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40962-017-0189-9>. [cit. 2024-11-01].
 - [87] WALKER, B. New type of fluidity test piece. *Foundry Trade Journal*. 1963, roč. 115, s. 713-721.
 - [88] SNOW, J.D. a SCOTT, D.H. Comparing fused silica and alumino- silicate investment refractories. *Modern casting*. 2001, s. 45-47.
 - [89] GULJAEV, B. *Teoria litejnych procesov*. 1.vydání. Leningrad, 1976.
 - [90] LOPER, C.R. Fluidity of Aluminum-Silicon Casting Alloys. *AFS Transactions*. 1992, roč. 98, s. 533-538.
 - [91] LANG, G. Gieseigenschaften und Oberflächenspannung von Aluminium und binären Aluminiumlegierungen. *Part I, Aluminium*,. 1972, roč. 48, č. 10, s. 664-672.
 - [92] SABATINO, M.Di a ARNBERG, L. A REVIEW ON THE FLUIDITY OF AL BASED ALLOYS Metall. Sc. and Tech.,. *Metallurgical Science and Technology, Teksid Aluminum*. 2002, roč. 22, s. 9-15.
 - [93] NIYAMA, E.; ANZAI, K.; FUNAKUBO, T. a HIRATSUKA, S. Some basic reasearch for thin-wall casting technology. *Journal of Mat. Proc. Tech.,.* 1997, roč. 63, s. 779-783.
 - [94] SHESHRADRI, M.R. a RAMACHANDRAN, A. Casting fluidity and fluidity of aluminium and its alloys. *Modern Casting*. 1965, roč. 21, s. 110-122.
 - [95] DI SABATINO, M.; ARNBERG, L.; BRUSETHAUG, S. a APELIAN, D. Fluidity evaluation methods for Al–Mg–Si alloys. online. *International Journal of Cast Metals Research*. 2013, roč. 19, č. 2, s. 94-97. ISSN 1364-0461. Dostupné z: <https://doi.org/10.1179/136404606225023345>. [cit. 2024-11-01].
 - [96] HAN, Qingyou a XU, Hanbing. Fluidity of alloys under high pressure die casting conditions. online. *Scripta Materialia*. 2005, roč. 53, č. 1, s. 7-10. ISSN 13596462. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.03.025>. [cit. 2024-11-04].
 - [97] DAHLE, A.K.; KARLSEN, S. a ARNBERG, L. Effect of grain refinement on the fluidity of some binary Al-Cu and Al-Mg alloys. *International Journal of Cast Metals Research*. 1996, roč. 9, s. 103-112.
 - [98] MCPARLAND, J. Solidification Processing. *Proceedings 1987 Solidification Processing Conference*. 1987, roč. , s. 323-326.

- [99] COOKSEY, C.J.; KONDIC, C.V. a WILCOCK, J. *Journal of the Institute of British Foundrymen*. 1959, roč. 52, s. 381.
- [100] RAVI, K.R.; PILLAI, R.M.; AMARANATHAN, K.R.; PAI, B.C. a CHAKRABORTY, M. Fluidity of aluminum alloys and composites: A review. online. *Journal of Alloys and Compounds*. 2008, roč. 456, č. 1-2, s. 201-210. ISSN 09258388. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.02.038>. [cit. 2024-11-01].
- [101] THOMAS, D.G. TRANSPORT CHARACTERISTICS OF SUSPENSION': VIII. A NOTE ON THE VISCOSITY OF NEWTONIAN SUSPENSIONS OF UNIFORM SPHERICAL PARTICLES. *JOURNAL OF COLLOID SCIENCE*. 1965, roč. 20, s. 267-277.
- [102] WANG, J. The apparent viscosity of fine particle reinforced composite melt. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003, č. 136, s. 60-63.
- [103] PAN, E.N. a HU, J.F. Fluidity of Al-Si (Cu) Alloys as Affected by Alloy Solidification Modes. *AFS Transactions*. 1998, roč. 106, s. 609-617.
- [104] TIRYAKIOĞLU, M.; ASKELAND, D.R. a RAMSAY, C.W. Fluidity of 319 and 356: An Experimental Design Approach. *AFS Transactions*. 1994, roč. 94-47, s. 17-25.
- [105] SCHUMACHER, P; GREER, A. L.; WORTH, J.; EVANS, P. V.; KEARNS, M. A. et al. New studies of nucleation mechanisms in aluminium alloys: implications for grain refinement practice. online. *Materials Science and Technology*. 2013, roč. 14, č. 5, s. 394-404. ISSN 0267-0836. Dostupné z: <https://doi.org/10.1179/mst.1998.14.5.394>. [cit. 2024-11-04].
- [106] KOTTE, B. Strontium Modification Gives Critical Melt Control. *Modern Casting*. 1985, s. 33-35.
- [107] RAO, B. V. a CHENNAKESAVA REDDY, A. FLUIDITY OF MODIFIED AND UNMODIFIED Al-Si ALLOYS IN ALUMINA INVESTMENT SHELL MOULDS. In: *National Conference on Advances in Design Approaches and Production Technologies (ADAPT-2005)*,. Hyderabad, India: JNTU College of Engineering, 2005, s. 57-60.
- [108] VENVENKATESWARAN, S.; MALLYA, R.M. a SHESHADRI, M.R. Effect of trace elements on the fluidity of eutectic Al-Si alloy using the vacuum suction technique. *AFS Transactions*. 1986, roč. 94, s. 701-708.
- [109] SAHOO, K.L. a SIVARAMAKRISHNAN, C.S. Some studies on Al-8.3Fe-0.8V-0.9Si alloy for near net shape casting. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003, roč. 135, s. 253-257.
- [110] KWON, Y.D. a LEE, Z.H. The effect of grain refining and oxide inclusion on the fluidity of Al/ 4.5Cu/ 0.6Mn and A356 alloys. *Materials Science and Engineering*. 2003, roč. 360, s. 372-376.
- [111] DI SABATINO, M.; ARNBERG, L.; RØRVIK, S. a PRESTMO, A. The influence of oxide inclusions on the fluidity of Al-7wt.%Si alloy. online. *Materials Science and Engineering: A*. 2005, roč. 413-414, s. 272-276. ISSN 09215093. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.175>. [cit. 2024-11-05].
- [112] NEFF, D.V. The Filtering and Degassing of Aluminum Die Casting Alloys. *Die Casting Engineer*. 1986, roč. 30, s. 18-24.

- [113] FIALA, Jaroslav a KRAUS, Ivo. *Povrchy a rozhraní*. Vyd. 1. Vysokoškolská učebnice. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2009. ISBN 978-80-01-04248-9.
- [114] CLUBTECHNICAL MECHANICAL, ENGINEERING BLOG. *Surface Tension, Definition, Formula, Examples, Capillary Effect*. online. In: ClubTechnical. Dostupné z: <https://clubtechnical.com/surface-tension>. [cit. 2024-11-05].
- [115] VYDAVATELSTVI-OLD.VSCHT.CZ. *Měření povrchového a mezifázového napětí*. online. In: VYDAVATELSTVI-OLD.VSCHT.CZ. Dostupné z: https://vydavatelstvi-old.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/mereni_povrchoveho_a_mezifazoveho_napeti.html. [cit. 2024-11-05].
- [116] ZÁDĚRA, Antonín. *Prezentace v předmětu Teoretické základy oboru*. Dokument VUT FSI v Brně. 2022.
- [117] Wetting. online. In: *Wikipedia: the free encyclopedia*. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021-2024. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Wetting>. [cit. 2024-11-11].
- [118] KRULIŠ, Zdeněk. Lepení polymerních materiálů. online. In: *Csm-kompozity*. Dostupné z: http://www.csm-kompozity.wz.cz/Lepeni_polymernich_materialu.pdf. [cit. 2024-11-11].
- [119] Fázová rozhraní a koloidy kolem nás. online. In: *Vscht.cz*. Dostupné z: <https://old.vscht.cz/fch/cz/pomucky/bartovska/08-Fazova-rozhrani.pdf>. [cit. 2024-11-11].
- [120] RUSÍN, Karel. *Teorie slévárenských procesů I*. Třetí. Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1990.
- [121] SOBCZAK, Natalia; SINGH, Mrityunjay a ASTHANA, Rajiv. High-temperature wettability measurements in metal/ceramic systems – Some methodological issues. online. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2005, roč. 9, č. 4-5, s. 241-253. ISSN 13590286. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2006.07.007>. [cit. 2024-11-11].
- [122] KUDYBA, Artur; SOBCZAK, Natalia; POLKOWSKI, Wojciech; BRUZDA, Grzegorz; POLKOWSKA, Adelajda et al. Improved methodological concepts for processing liquid Mg at high temperature. online. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2021, roč. 9, č. 1, s. 183-191. ISSN 22139567. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.06.003>. [cit. 2024-11-11].
- [123] LIGGIERI, L. a PASSERONE, A. An automatic technique for measuring the surface tension of liquid metals. online. *High Temperature Technology*. 2016, roč. 7, č. 2, s. 82-86. ISSN 0261-9180. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/02619180.1989.11753417>. [cit. 2024-11-11].
- [124] KOLSGAARD, A. Ph.D. Thesis,. NTNU University of Science and Technology, 1993.
- [125] OLIFF, I.; LUMBY, R. a KONDIC, V. Some new ideas on fluidity test mold design. *Foundry*. 1963, roč. 93, s. 80–85.
- [126] KRUTIŠ, V. a ZÁDĚRA, A. VÝZKUMNÁ ZPRÁVA S FOTODOKUMENTACÍ ETAPA 2: NÁVRH A PROVEDENÍ TECHNOLOGICKÝCH ZKOUŠEK KERAMICKÝCH SUSPENZÍ. Inovační voucher, CZ.01.1.02/0.0/0.0/20_358/0023907. 2021.
- [127] BREZINA, M. a KONDIC, V. Flow phenomena in investment casting. *The British Foundryman*,. 1973, roč. 66, s. 337–348.

- [128] ŠTĚPÁN, R. a KRUTIŠ, V. *Měření prodyšnosti skořepin v závislosti na teplotě*. Interní zpráva VUT FSI v Brně, odbor slévárenství. 2003.
- [129] KRUTIŠ, Vladimír; NOVOSAD, Pavel; ZÁDĚRA, Antonín a KAŇA, Václav. Requirements for Hybrid Technology Enabling the Production of High-Precision Thin-Wall Castings. online. *Materials*. 2022, roč. 15, č. 11. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma15113805>. [cit. 2024-11-15].
- [130] BROWNE, David J. a O'MAHONEY, Denis. Interface heat transfer in investment casting of aluminum alloys. online. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2001, roč. 32, č. 12, s. 3055-3063. ISSN 1073-5623. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11661-001-0180-0>. [cit. 2024-11-18].
- [131] XU, Mingzhi; LEKAKH, Simon N. a RICHARDS, Von L. Thermal Property Database for Investment Casting Shells. online. *International Journal of Metalcasting*. 2016, roč. 10, č. 3, s. 329-337. ISSN 1939-5981. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40962-016-0052-4>. [cit. 2024-10-04].
- [132] SZELIGA, D.; KUBIAK, K.; ZIAJA, W.; CYGAN, R.; SUCHY, J. Sz. et al. Investigation of casting–ceramic shell mold interface thermal resistance during solidification process of nickel based superalloy. online. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2017, roč. 87, s. 149-160. ISSN 08941777. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.04.024>. [cit. 2024-11-21].
- [133] ROUČKA, J.; KOVÁČ, M. a JAROŠ, M. THERMAL PROCESSES WHILE POURING INTO CERAMIC SHELLS AND THEIR NUMERICAL SIMULATION. *American Foundry Society, International Journal of Metalcasting*. 2010, roč. 10, s. 71-80.
- [134] HIRATSUKA, H.; NIYAMA, E. a HORIE, H. Computer simulation of fluidity and microstructure of thin sectioned cast iron. *International Journal of Cast Metals Research*. 1998, roč. 104, s. 201-205.
- [135] ZINC - INTERNATIONAL ASSOCIATION. *Design*. online. In: . Dostupné z: https://diecasting.zinc.org/properties/en/design/eng_prop_d_design-rules/. [cit. 2024-11-21].
- [136] IQS DIRECTORY. *Investment Casting*. online. In: . Dostupné z: <https://www.iqsdirectory.com/articles/investment-casting.html>. [cit. 2024-11-22].
- [137] SVENNINGSSON, R. a FARRE, S. *Development of light-weight steel castings for efficient aircraft engines*. Swerea SWECAST AB, 2014.
- [138] VAINER, M. a LERNER, Y. Vacuum-Assisted Investment Casting of Al-Ni-Bronze. *Transactions of the American Foundrymen's Society*. 1999, roč. 107, s. 35–42.
- [139] MATSUNA, K a OHAMA, S. Application of the Investment Casting Method for Extremely Thin Blade Impellers. *Ishikawajima-Harima Engineering*. 1981, roč. 21, s. 45–50.
- [140] SHENDYE, S. B. a GILLES, D. J. Counter-Gravity Investment Casting Process. *AFS Transactions*. 2009, č. 09-033, s. 1–7.
- [141] CHANDLEY, G. a CARGILL, D. Thin-Walled Castings by the CLV Process. *AFS Transactions*. 1990, roč. 98, s. 413–416.

-
- [142] BROWNE, David J. a O'MAHONEY, Denis. Interface heat transfer in investment casting of aluminum alloys. online. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2001, roč. 32, č. 12, s. 3055-3063. ISSN 1073-5623. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11661-001-0180-0>. [cit. 2024-11-22].
- [143] XU, Mingzhi; LEKAKH, Simon N. a RICHARDS, Von L. Thermal Property Database for Investment Casting Shells. online. *International Journal of Metalcasting*. 2016, roč. 10, č. 3, s. 329-337. ISSN 1939-5981. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40962-016-0052-4>. [cit. 2024-11-18].
- [144] SIMONDS, M. *Two-Phase VOF: Theory and Implementation in ProCAST*. Internal presentation ESI Group. 2024.
- [145] KRUTIŠ, V. *Vývoj AI odlitku pro firmu Verve Vater mobility: Interní projekt VUT FSI v Brně*. 2021.
- [146] KRUTIŠ, V. a ZÁDĚRA, A. *VÝVOJ TECHNOLOGIE ODLITKU BLOKU MOTORU PRO 3D TISK FOREM – DĚLENÍ FOREM: Technologické inkubace (č. FX01010001.) Super2Stroke s.r.o.* 2023.
- [147] KRUTIŠ, V. a ZÁDĚRA, A. *Prototypové testování výroby odlitků pro projekt Super2Stroke v rámci programu Technologická Inkubace*. 2024.
- [148] KRUTIŠ, V. a ZÁDĚRA, A. *NÁVRH SLÉVÁRENSKÉ TECHNOLOGIE ODLITKŮ OBĚŽNÝCH KOL A NÁVRH POSTUPU VÝROBY KERAMICKÉ SKOŘEPINOVÉ FORMY A ZPŮSOBU JEJÍHO VYTAVOVÁNÍ A ŽÍHÁNÍ: Inovační voucher_CZ.01.1.02/0.0/0.0/20_358/0026328 Vývoj nové technologie přesného lití Č.O.B SLÉVÁRNA*. 2021.
- [149] ŠMAHEL, M. *Klíkový mechanismus dvoudobého závodního motocyklového motoru*. Diplomová práce. Brno,: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství., 2024.