

Vysoká škola technická a ekonomická

v Českých Budějovicích

**Studijní opora pro prezenční a kombinovanou
formu studia**

2021

České Budějovice

Vysoká škola technická a ekonomická

v Českých Budějovicích

**Progresivní metody modelování
technologie výroby kovových slitin**

Ústav technicko - technologický

Environmentální výzkumné pracoviště

Doc. Ing. Ladislav Socha, Ph.D.

Obsah

1	<i>Kapitola: Shrnutí problematiky slévárenských technologií železných kovů</i>	1
1.1	Klíčová slova.....	1
1.2	Cíle kapitoly	1
1.3	Úvod do kapitoly.....	1
1.4	Výklad.....	1
1.5	Kontrolní otázky.....	12
1.6	Doporučená studijní literatura.....	13
2	<i>Kapitola: Shrnutí problematiky slévárenských technologií neželezných kovů a jejich slitin</i>	14
2.1	Klíčová slova.....	14
2.2	Cíle kapitoly	14
2.3	Úvod do kapitoly.....	14
2.4	Výklad.....	14
2.5	Kontrolní otázky.....	21
2.6	Doporučená studijní literatura.....	21
3	<i>Kapitola: Úvod do metod fyzikálního modelování proudění</i>	22
3.1	Klíčová slova.....	22
3.2	Cíle kapitoly	22
3.3	Úvod do kapitoly.....	22
3.4	Výklad.....	23
3.5	Kontrolní otázky.....	32
3.6	Doporučená studijní literatura.....	32
4	<i>Kapitola: Realizace laboratorního experimentu zaměřeného na fyzikální modelování rafinace slitin kovů</i>	33
4.1	Klíčová slova.....	33

4.2	Cíle kapitoly	33
4.3	Úvod do kapitoly	33
4.4	Výklad	33
4.5	Kontrolní otázky	36
4.6	Doporučená studijní literatura	36
5	<i>Kapitola: Vyhodnocení získaných výsledků a jejich provozně technologická interpretace</i>	37
5.1	Klíčová slova	37
5.2	Cíle kapitoly	37
5.3	Úvod do kapitoly	37
5.4	Výklad	37
5.5	Doporučená studijní literatura	38
6	<i>Kapitola: Úvod do metod numerického modelování procesu odlévání a tuhnutí ...</i>	39
6.1	Klíčová slova	39
6.2	Cíle kapitoly	39
6.3	Úvod do kapitoly	39
6.4	Výklad	40
6.5	Kontrolní otázky	51
6.6	Doporučená studijní literatura	51
7	<i>Kapitola: Základy práce s MAGMASOFT®</i>	52
7.1	Klíčová slova	52
7.2	Cíle kapitoly	52
7.3	Úvod do kapitoly	52
7.4	Výklad	52
7.5	Kontrolní otázky	57
7.6	Doporučená studijní literatura	57
8	<i>Kapitola: Možnosti tvorby a úpravy geometrie v MAGMASOFT®</i>	58

8.1	Klíčová slova.....	58
8.2	Cíle kapitoly	58
8.3	Úvod do kapitoly.....	58
8.4	Výklad.....	58
8.5	Kontrolní otázky.....	64
8.6	Doporučená studijní literatura.....	64
9	<i>Kapitola: Možnosti tvorby výpočetní sítě v MAGMASOFT®</i>	65
9.1	Klíčová slova.....	65
9.2	Cíle kapitoly	65
9.3	Úvod do kapitoly.....	65
9.4	Výklad.....	65
9.5	Kontrolní otázky.....	71
9.6	Doporučená studijní literatura.....	72
10	<i>Kapitola: Nastavení výpočtu</i>	73
10.1	Klíčová slova.....	73
10.2	Cíle kapitoly	73
10.3	Úvod do kapitoly.....	73
10.4	Výklad.....	73
10.5	Kontrolní otázky.....	83
10.6	Doporučená studijní literatura.....	83
11	<i>Kapitola: Spuštění simulace</i>	84
11.1	Klíčová slova.....	84
11.2	Cíle kapitoly	84
11.3	Úvod do kapitoly.....	84
11.4	Výklad.....	84
11.5	Kontrolní otázky.....	87

11.6	Doporučená studijní literatura.....	87
12	<i>Kapitola: Hodnocení výsledků simulace</i>	88
12.1	Klíčová slova.....	88
12.2	Cíle kapitoly	88
12.3	Úvod do kapitoly.....	88
12.4	Výklad.....	88
12.5	Kontrolní otázky.....	97
12.6	Doporučená studijní literatura.....	97
13	<i>Kapitola: Vytváření obrázků, animací a videí</i>	98
13.1	Klíčová slova.....	98
13.2	Cíle kapitoly	98
13.3	Úvod do kapitoly.....	98
13.4	Výklad.....	98
13.5	Kontrolní otázky.....	101
13.6	Doporučená studijní literatura.....	101

PODĚKOVÁNÍ

Autoři by chtěli touto cestou poděkovat za poskytnutí podkladů a technickou podporu při zpracování této opory společnosti MAGMA Gießereitechnologie GmbH, organizační složka, K Vinici 1256, 53002 Pardubice

Název: Progresivní metody modelování technologie výroby kovových slitin

Autor: doc. Ing. Ladislav Socha, Ph.D., doc. Ing. Karel Gryc, Ph.D., Ing. Bc. Jana Sviželová, Ph.D.

Vydání: první, 2021

Počet stran: 101

1. vydání

© Vysoká škola technická a ekonomická v Českých Budějovicích, 2021

Vydala: Vysoká škola technická a ekonomická v Českých Budějovicích, Okružní 10, 370 01 České Budějovice

Za obsahovou a jazykovou správnost odpovídají autoři a vedoucí příslušných kateder.

Anotace předmětu

Student je v průběhu semestru hodnocen na základě splnění dílčích požadavků pro udělení zápočtu, mezi které patří průběžná kontrola a bodování práce na projektu (až 20 bodů), průběžné testy (až 20 bodů), odevzdání a prezentace semestrálního projektu (až 30 bodů) a písemný zápočtový test (až 30 bodů). Písemný test je složen z otázek, které budou zaměřeny na probrané učivo v rámci přednášek, seminářů a jednotlivých laboratorních praktik. Absence v maximálním rozsahu 30 % musí být omluvena a omluva musí být vyučujícím akceptována (o důvodnosti omluvy rozhoduje vyučující).

Cíl předmětu

První část předmětu je věnována opakování látky z oblasti vlastností, způsobů výroby, mimopecního zpracování a odlévání oceli, litiny a slitin neželezných kovů. Na tuto úvodní část navazuje problematika fyzikálního modelování metalurgických procesů. Tato část je zaměřena na teoretické principy metody fyzikálního modelování proudění a zákonitosti, které je nutno dodržet při konstrukci fyzikálního modelu. Dále je představena metoda numerického modelování, je vysvětlen její princip a popsány jednotlivé kroky. Poslední část předmětu je zaměřena na praktickou výuku numerických simulací ve výpočetním softwaru MAGMASOFT[®], jež je určen k simulacím metalurgických procesů.

Výstupy z učení

Student bude umět definovat základní rozdělení ocelí, litin a slitin neželezných kovů, dále charakterizovat, základní pochody a rafinační technologie používané při metalurgickém zpracování ocelí, litin a neželezných kovů. Student bude mít teoretické a praktické znalosti z oblasti technologie odlévání oceli, litin a neželezných kovů a bude schopen je aplikovat k řízení metalurgického zpracování ocelí, litin a neželezných kovů. Student nabyde znalostí z oblasti fyzikálního modelování, bude obeznámen s teorií podobnosti a principem konstrukce fyzikálních modelů na jejím základě. Také bude schopen vybrat adekvátní metodu vizualizace proudění ve fyzikálním modelu. Student bude mít znalosti z oblasti numerického modelování a získá dovednost práce v simulačním softwaru MAGMASOFT[®], ve kterém bude schopen samostatně definovat a vyhodnotit výpočet plnění a tuhnutí odlitku a navrhnout změny, vedoucí ke zlepšení jeho kvality.

Základní okruhy studia

1. Shrnutí problematiky slévárenských technologií zaměřené na problematiku ocelových a litinových odlitků.
2. Shrnutí problematiky slévárenských technologií zaměřené na problematiku odlitků neželezných kovů a jejich slitin.
3. Úvod do metod fyzikálního modelování proudění a jejich aplikaci v technologiích výroby slitin kovů.
4. Realizace laboratorního experimentu zaměřeného na fyzikální modelování rafinaci slitin kovů.

5. Vyhodnocení získaných výsledků a jejich provozně technologická interpretace.
6. Úvod do metod numerického modelování procesu odlévání, tuhnutí a tepelného zpracování odlitků.
7. Sestavení týmů a zadání úloh jedné z oblastí gravitačního, tlakového, nízkotlakého, přesného lití.
8. Nastavení okrajových podmínek a zvolení základních variant jejich nastavení.
9. Vyhodnocení výsledků základních variant numerických simulací a nastavení optimalizačního výpočtového procesu.
10. Celkové vyhodnocení získaných výsledků a jejich provozně technologická interpretace.
11. Obhajoba projektů jednotlivých týmů formou prezentace výsledků.
12. Zápočtový test.
13. Kontrola splnění podmínek pro udělení zápočtu a udělení zápočtu.

Poznámka

Kapitoly týkající se numerického modelování jsou v textu dále členěny, na logické celky, které po sobě následují (na základě postupu prací v rámci numerické simulace). Proto jednotlivé kapitoly přesně neodpovídají osnově předmětu.

Povinná literatura

- NĚMEC, M., BEDNÁŘ, B. a B. BRYKSÍ STUNOVÁ. *Teorie slévání*. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 2016. 217 s. ISBN 978-80-01-06026-1.
- MACHEK, V. *Kovové materiály 4: výroba a zpracování ocelí a litin*. Praha: České vysoké učení technické, 2015, 143 s. ISBN 978-80-01-05686-8.
- MATUCHA, J. a I. NOVÁ. *Slévárenské formy*. vyd. 1. Liberec: Technická univerzita, 2014, 165 s. ISBN 978-80-7494-083-5.
- MICHNA, Š. *Technologie a zpracování hliníkových materiálů*. vyd. 2., Ústí nad Labem: Štefan Michna, 2015, 150 s. ISBN 978-80-260-7706-0.
- DANTZIG, J.A. a M. RAPPA, 2009. *Solidification*. Lausanne: EPFL Press. ISBN 978-2-940222-17-9.

Doporučená literatura

- MICHNA, Š. a L. MICHNOVÁ. *Neželezné kovy*. vyd. 1. Děčín: Štefan Michna, Lenka Michnová, 2014, 245 s. ISBN 978-80-260-7132-7.
- ILEGUSI, O.J., IGUCHI, M., a W. WAHNSIEDLER, 2000. *Mathematical and Physical modeling of Materials Processing Operation*. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC. ISBN 1-584880-17-1.
- Uživatelské manuály relevantních simulačních SW.
- Relevantní, a především zahraniční odborné články z řešené problematiky

1 Kapitola: Shrnutí problematiky slévárenských technologií železných kovů

1.1 Klíčová slova

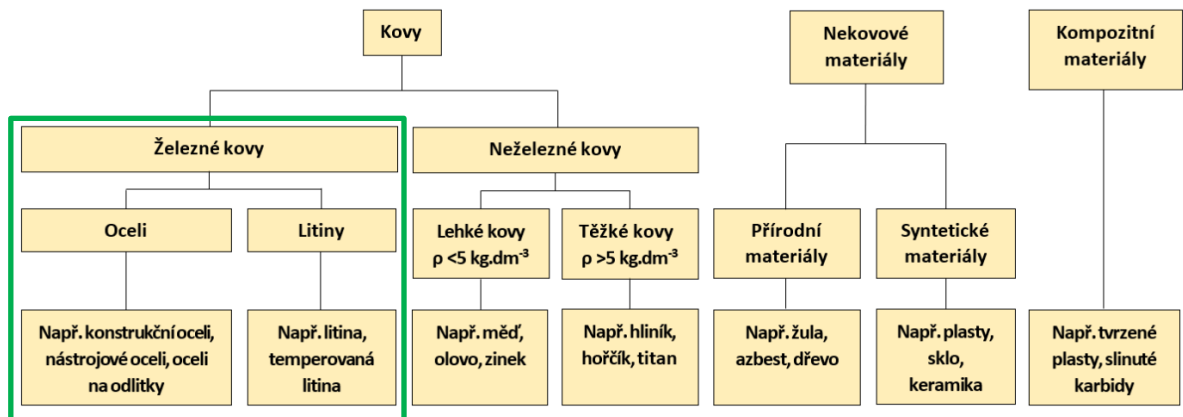
metalurgie, oceli, litiny, primární agregáty, sekundární metalurgie, odlévání

1.2 Cíle kapitoly

Cílem kapitoly je osvěžení znalostí z oblasti metalurgie oceli a litiny, tedy charakteristiky těchto kovů, způsobů výroby v primárních agregátech, zpracování na zařízení sekundární metalurgie a v neposlední řadě způsobů jejich odlévání.

1.3 Úvod do kapitoly

Materiály používané ve strojírenské praxi mají někdy velmi rozdílné vlastnosti a pro určitou součást jsou voleny tak, aby součást mohla dobře a trvale plnit svůj úkol. Správný výběr vhodného materiálu pro součást a správné opracování materiálu je možné pouze při zevrubné znalosti materiálů. Abychom získali přehled o rozmanitosti materiálů, třídíme je do skupin podle složení nebo charakteristických vlastností. Tato kapitola se dále zaměří na shrnutí problematiky slitin železných kovů, tedy ocelí a litin, jak je vyznačeno na obrázku.

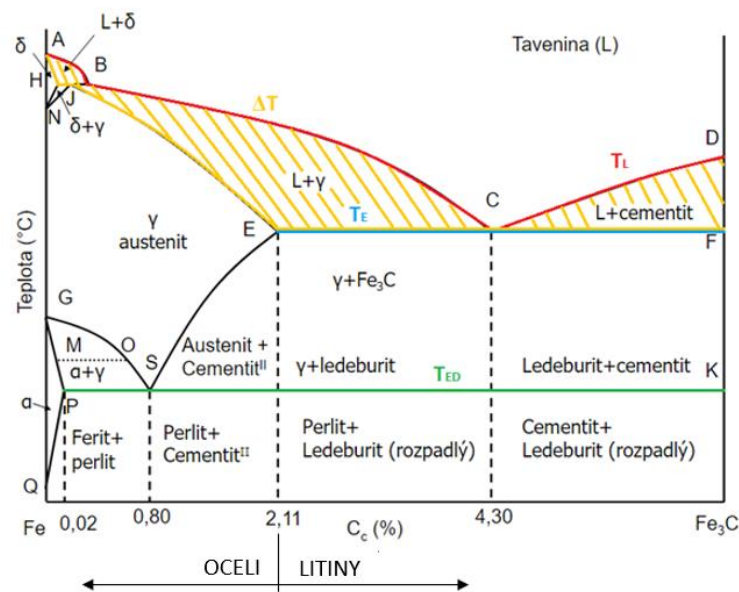


Obrázek – Rozdělení materiálů do skupin

1.4 Výklad

Oceli jsou nejčastěji používanými kovovými materiály. Pro své mechanické a technologické vlastnosti je ocel dodnes nejdůležitějším technickým materiálem. V současné době je vyráběno asi 2500 druhů ocelí. Rozdílným způsobem výroby, legováním a kombinací tepelného a tepelně-mechanického zpracování je možno ovlivnit vlastnosti ocelí v širokém rozmezí, a tak jejich vlastnosti přizpůsobit zamýšlenému použití. V normách (ČSN, DIN atd.) jsou oceli rozděleny do skupin jednak podle chemického složení, jednak podle struktury a mechanických a fyzikálních vlastností.

- **nelegované oceli:** zvané také uhlíkové oceli. Obsah legujících prvků je nižší, než je maximální tabelovaná hodnota pro daný prvek. Pro většinu prvků je tento maximální hmotnostní podíl kolem 2 %. Mechanické vlastnosti uhlíkových ocelí lze modifikovat tepelným (žhánění, kalení, popouštění), tepelně-mechanickým a tepelně-chemickým zpracováním.
- **nízkolegované oceli:** obsah legujících prvků po odečtení obsahu uhlíku je nižší než 5 %. Mají podobné vlastnosti jako oceli nelegované, ale jsou vhodné pro tepelné zpracování. Tepelným zpracováním je u nich možno ovlivnit mechanické vlastnosti. Se stoupajícím obsahem uhlíku stoupá i tvrdost po kalení. A to až do obsahu 0,85 hm. % C. S vyšším obsahem uhlíku se kalením už tvrdost dále nezvyšuje. Samotný obsah uhlíku má však také vliv na pevnost oceli, čím vyšší obsah, tím je ocel pevnější.
- **vysoce legované oceli:** obsah legujících prvků je vyšší než 5 %. Kombinací legujících prvků se dosahuje potřebných mechanických, fyzikálních a chemických vlastností.



Obrázek – Metastabilní soustava Fe-Fe₃C – rozdělení oblasti na oceli a litiny dle obsahu C

Charakteristika ocelí: ocel je slitina železa s uhlíkem do 2,14 hm. % a doprovodnými prvky (Mn, Si, P, S, Cu), které se dostaly do oceli při výrobě. Kromě doprovodných prvků obsahují některé oceli úmyslně přidané prvky (Cr, W, Mo, V, Ni aj.) a plyny (H, N, O). Oceli lze zařadit mezi technické slitiny železa, obsahující celou řadu prvků, které ovlivňují jejich vlastnosti. Z hlediska vlivu prvků a jejich působení na vlastnosti ocelí je lze rozdělit následovně:

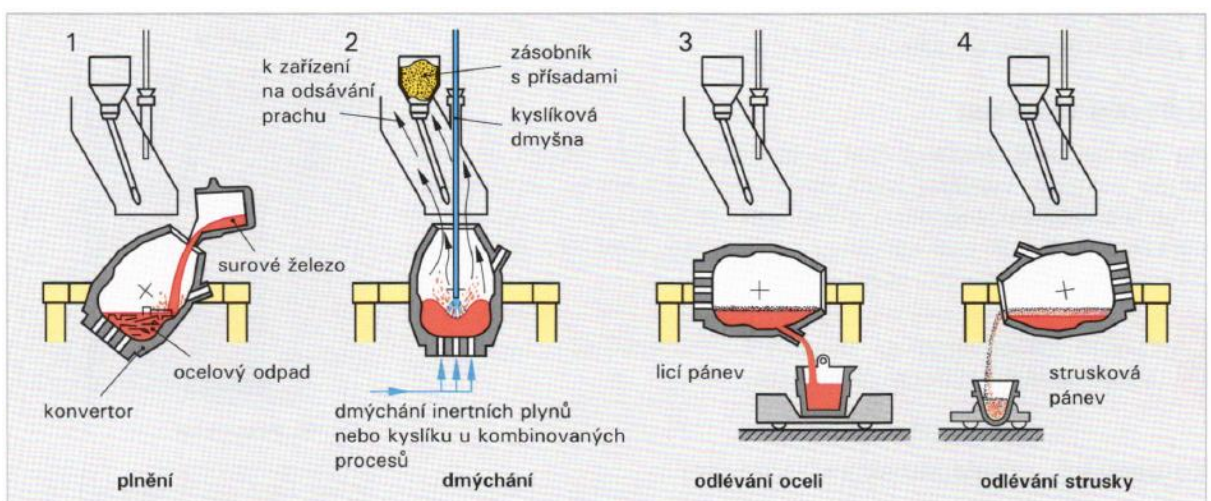
- *prospěšné (neškodlivé) prvky* – patří zde např. C, Mn, Si, Cr, V, Mo, W, Ti, Al ad. Všechny tyto prvky mohou pozitivně ovlivňovat určitým způsobem vlastnosti oceli, např. její pevnost, houževnatost, tažnost, tvrdost, obrobiteľnosť, korozivzdornost, žáruvzdornost a mnohé další,
- *škodlivé prvky* – patří zde fosfor, síra (obecně škodlivé prvky),
- *plyny v oceli* – patří zde kyslík, dusík a vodík,
- *stopové neželezné kovy* – Cu, Sn, As, Sb, Bi, Zn a Pb. Ve většině případů zhoršují škodlivé prvky technologické a užité vlastnosti oceli, a proto je snahou udržovat jejich obsah v oceli co nejnižší.

Základními surovinami pro výrobu oceli jsou **surové železo a ocelový odpad**. Surové železo má vysoký obsah C (cca 4 %) a některých doprovodných prvků. Při přeměně surového železa a ocelového odpadu na ocel je tedy nutno nejprve snížit obsah uhlíku a téměř zcela vyloučit nežádoucí složky. Tento proces se nazývá zkujňování a představuje oxidaci uhlíku a doprovodných prvků kyslíkem ve vhodném primárním agregátu. Tím vzniká surová ocel o požadovaném chemickém složení. Po zkujňování je tato tavenina podrobena dodatečné úpravě v rámci sekundární metalurgie.

Stěžejní primární agregáty pro výrobu surové oceli v dnešní době představují kyslíkové konvertory a elektrické obloukové pece.

Kyslíkový konvertor typu LD: Základní vsázku kyslíkového konvertoru tvoří surové železo, kovový odpad a struskotvorná přísada vápno anebo dolomitické vápno. Podstatou pochodu LD je zkujňování surového železa kyslíkem (s min. čistotou 99,5 %), dmýchaným do lázně tekutého kovu shora měděnou, vodou chlazenou tryskou, umístěnou v ose bazicky vyzděného konvertoru. Dynamický účinek kyslíkového proudu spolu s oxidací uhlíku zajišťuje intenzivní promíchávání lázně a tím příznivé podmínky pro rychlý průběh zkujňovacích reakcí. Výrobní technologie surové oceli se v kyslíkových konvertorech skládá z několika fází:

- *sázení kovového odpadu a následné nalévání surového železa,*
- *dmýchání kyslíku a sypání struskotvorných přísad, nauhličovadla aj.,*
- *ukončení dmýchání kyslíku, provedení odběru předzkoušky kovu ponorným vzorkovačem a měření teploty oceli,*
- *při splnění předepsaného chemického složení a požadované teploty se provede odpich oceli do lící pánve a vylití strusky do struskové pánve,*
- *po ukončení odpichu se provádí kontrola vyzdívky s mezitavbovou opravou a příprava na další tavbu.*

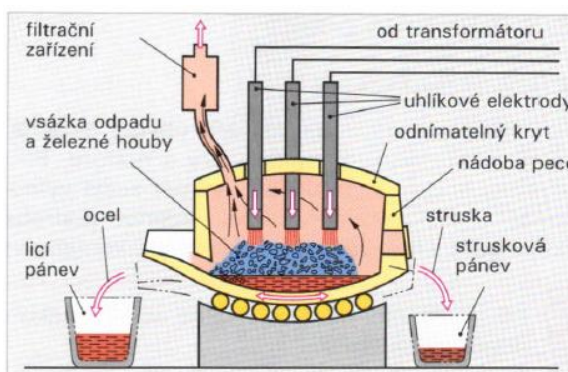


Obrázek – Výroba oceli v konvertoru typu LD

Elektrická oblouková pec: Ocel se v elektrické obloukové peci vyrábí z kovového odpadu a dalších kovových a nekovových přísad. Tavení probíhá pomocí tepla uvolňovaného elektrickými

oblouky, které vznikají mezi grafitovou elektrodou a kovovou vsázkou. Výroba surové oceli se v elektrických obloukových pecích skládá z několika fází:

- *sázení vsázky pomocí sázečích košů,*
- *tavení vsázky na max. příkon oblouků, částečný průběh metalurgických reakcí,*
- *oxidační údobí (oxidace uhlíku, oxidace dalších doprovodných prvků, oxidace fosforu, snížení obsahů plynů N_2 , H_2 a částečné snížení obsahu síry),*
- *redukční údobí (dezoxidace oceli, odsíření oceli, nalegování lázně a konečná úprava chemického složení), dohotovení (konečná úprava chemického složení, úprava teploty lázně na odpichovou teplotu) a odpich,*
- *po ukončení odpichu se provádí kontrola vyzdívky s mezitavbovou opravou a následně je elektrická oblouková pec opět připravena na další tavbu.*



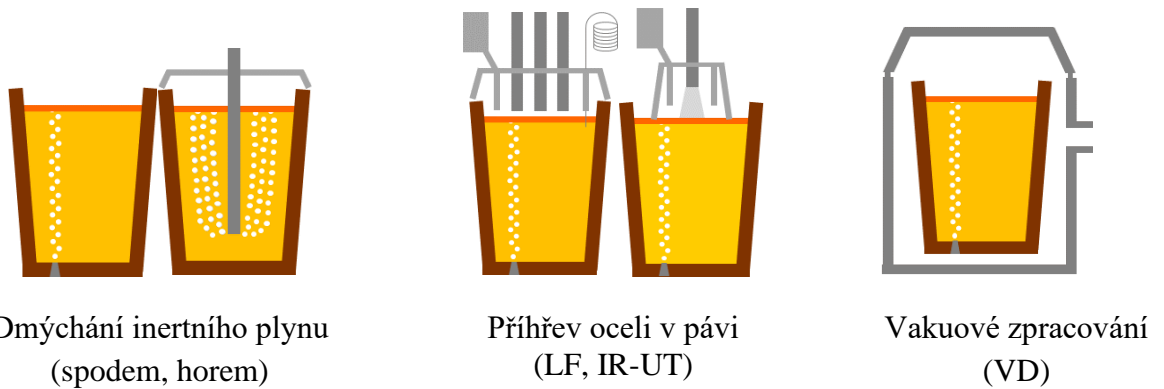
Obrázek – Elektrická oblouková pec – napájená střídavým proudem (AC)

Díky specifickým možnostem výroby v elektrických obloukových pecích existuje velmi velký počet modifikací těchto technologií umožňující výrobu: uhlíkových ocelí, legovaných, vysokolegovaných, nástrojových ocelí a ocelí na odlitky. V pracovním prostoru elektrické obloukové pece lze tedy vytvářet jak oxidační podmínky, tak i redukční podmínky. Existuje tedy velký počet modifikací vlastního průběhu výroby, přičemž základní technologie představuje:

- ***dvoustrusková technologie:*** *tavba se skládá z údobí tavení vsázky, oxidačního údobí a redukčního údobí,*
- ***jednostrusková technologie:*** *tavba má údobí tavení, oxidační a dohotovení. Tavba tedy probíhá bez redukčního údobí,*
- ***přetavba:*** *po tavení následuje přímo redukční údobí, chybí oxidační údobí.*

Surová ocel dále prochází mimopecním zpracováním, kde získá finální požadované vlastnosti. Základní způsoby mimopecního zpracování oceli (sekundární metalurgie) jsou:

- *dmýchání inertního plynu,*
- *přihřev oceli v pánvi,*
- *vakuové zpracování.*

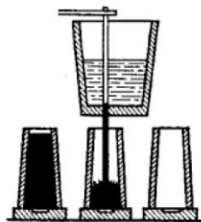


Obrázek – Vybrané možnosti mimopecního zpracování oceli

Tavenina oceli s požadovaným chemickým složením se dále zpracovává odléváním do podoby polotovaru pro další zpracování, nebo finálního odlitku. **Odlévání oceli** lze rozdělit na následující technologie:

- odlévání oceli do kokil – horem nebo spodem,
- odlévání oceli na odlitky,
- odlévání oceli na zařízení plynulého odlévání.

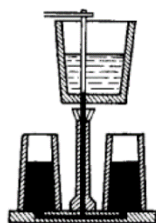
Odlévání oceli do kokil se provádí v licí hale ocelárny do licích souprav, které se skládají z litinových forem, tzv. kokil, které jsou umístěny buď na pojízdných vozech, nebo jsou postaveny na licím poli. Ocel se do kokil odlévá přímo z odpichové pánve, která je opatřena uzavíratelnými výlevkami. V tomto případě se jedná o odlévání horem. Při odlévání spodem se ocel nelije do kokil přímo, ale přes licí kůl a vtokové kanály, rovnoměrně pak stoupá ve všech kokilách současně. Odlévání oceli horem nebo spodem se provádí do licí soupravy. Licí souprava se skládá z následujících základních částí: *licí deska, kokila, kokilová podložka a hlavový nástavec*.



a) Schéma odlévání oceli horem



b) Provozní odlévání oceli horem



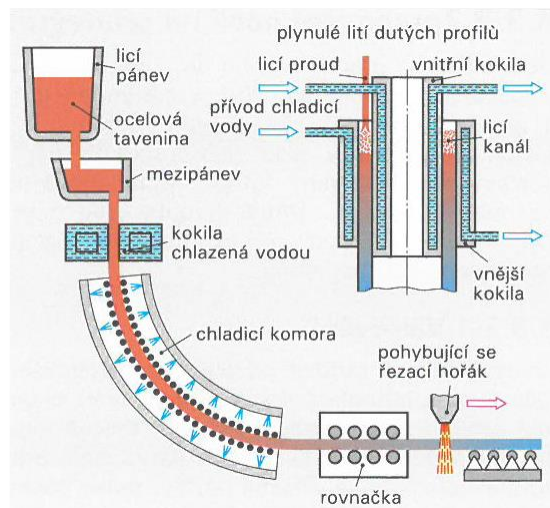
c) Schéma odlévání oceli spodem



d) Provozní odlévání oceli spodem

Obrázek – Ukázka principu odlévání oceli do kokil

Plynulé odlévání oceli představuje technologii, která nahrazuje stávající postup odlévání oceli ingotovou cestou. Princip plynulého odlévání lze definovat jako technologický postup, při kterém je tekutá ocel na zařízení plynulého odlévání (ZPO) průběžně zpracovávána na předlitek, který může mít různé tvary dle požadavků pro následné tváření.



Obrázek – Zařízení pro plynulé odlévání

Charakteristika litin: litina je slitina železa s $C > 2,14 \%$ a dalších prvků (Si, Mn, P, S). U litin se výrazně projevuje existence metastabilní a stabilní rovnováhy. Uhlík je v litinách vyloučen ve formě grafitu (grafitické litiny), nebo cementitu (Fe_3C). Většina odlitků se odlévá z tzv. grafitických litin, které mají dobré slévárenské vlastnosti. Litiny, které mají ve struktuře vyloučen cementit, se používají tam, kde odlitek má mít vysokou tvrdost, nebo odolnost proti otěru.

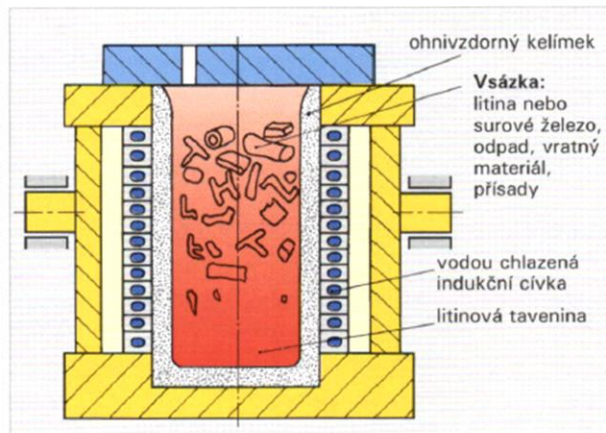
- **litiny s lupínkovým grafitem** (LLG; EN-GJL- 150 až 350),
- **litiny s kuličkovým grafitem** (LKG; EN-GJS- 350-22 až 900-2),
- **litiny s červíkovitým grafitem** (LČG; EN-GJV-300 až 500),
- **temperované litiny s bílým lomem** (TLB; EN-GJMW-350-4 až 550-4) a **černým lomem** (TLČ; EN-GJMB-300-6 až 800-1),
- **bílá litina** (bez volně vyloučeného grafitu s volným cementitem),
- **legované litiny** pro speciální určení.

Slitiny železa	Litina		Temperovaná litina s černým lomem	Ocel na odlitky
	S lupínkovým grafitem	S kuličkovým grafitem		
Obráz struktury M 100:1				
Forma uhlíku	Velké ... malé lupínky	Kulička	Vločky	Lamelární cementit
Základní struktura	Grafit + lamelární cementit		Ferit	Ferit a perlit
Pevnost v tahu MPa	100-350	400-900	300-350	200-840

Obrázek – Ukázka struktur různých druhů litin

Charakteristika litin: hlavními prvky v litině jsou mimo Fe a C také Si, Mn, P a S a prvky z očkujících přísad. U legovaných nebo speciálních litin to mohou být prvky Ni, Cu, Mo, Sn, Ti, Cr atd. Poslední skupinu tvoří prvky, jež mohou do litiny přejít z výchozích surovin při druzování a

- **polysyntetický** (nejobvyklejší způsob) - ocelový odpad, vrat, třísky, surové železo, zlomková litina, nauhličovadla, feroslitiny,
- **přetavování** – bez nauhličování.



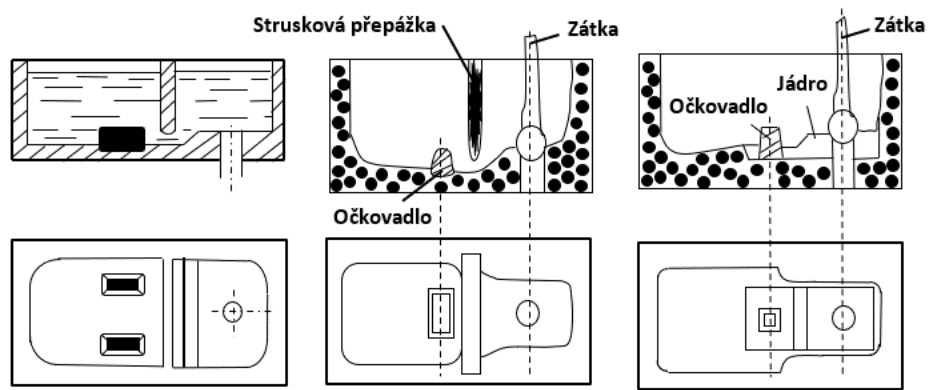
Obrázek – Ukázka průřezu elektrickou indukční kelímkovou pecí

K tavení litin se mohou použít i **elektrické obloukové pece** (EOP), jako k tavení oceli. Lze v nich získat taveniny s přesným složením (podílem legujících prvků) a s velkou čistotou.

Jakmile je vyrobena tavenina litiny v primárním agregátu, následuje mimopecní zpracování. Účel dalšího zpracování litin spočívá v úpravě jejich finálních vlastností prostřednictvím ovlivnění výsledné struktury materiálu. K tomuto účelu slouží očkování a modifikace.

Očkování: vytvoření dostatečného množství grafitizačních zárodků. Větší počet zárodků zjemňuje grafit, zabraňuje vyloučení volného cementitu a tím snižuje sklon k zákalce. Podstatou očkování je heterogenní nukleace, která je podporována vnášením očkovacích látek, obvykle na bázi FeSi do roztavené litiny. Očkování použijeme, chceme-li zvýšit počet cizích grafitizačních zárodků, dosáhnout tak zjemnění vyloučeného grafitu, zabránit vzniku volného cementitu a snížit výskyt zákalky v kritických průřezích odlitku. V současné době se používá řada různých způsobů přidávání očkovadla do roztavené litiny. Tak jak se postupně měnily způsoby očkování, měnily se požadavky na typy očkovadel a to:

- očkování **tekutým očkovadlem** (méně častý způsob),
- očkování **granulovaným očkovadlem** (nejčastější způsob), rozměr zrn se pohybuje v širokém rozmezí od 0,2 mm až po 8-10 mm,
- očkování **kompaktními tělísky**, vkládanými buď do licí jamky, nebo do reakční komůrky ve vtokové soustavě,
- očkování **plněnými profily**.



Obrázek – Schéma očkování v lici jamce

Modifikace: slouží k ovlivnění tvaru grafitu při jeho krystalizaci tak, že lupínkový grafit se mění působením modifikátoru na grafit kuličkový. Tím se podstatně mění užitné a fyzikální vlastnosti litiny. V současné době existují různá složení modifikátorů, jejichž volba závisí mimo jiné na způsobu výroby litiny s kuličkovým grafitem. Nejčastěji se jako modifikátor používá hutnický čistý Mg (99,5 %) nebo předslitiny Mg (s koncentrací od 5 do 35 %). Hlavní metody modifikace jsou následující:

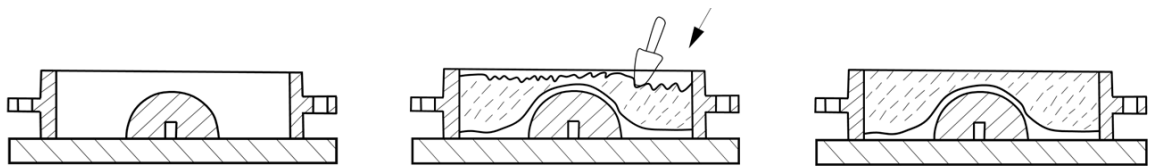
- *Polévací,*
- *Konvertorové,*
- *Ponořovací,*
- *Kontinuální,*
- *Plněnými profily.*

Slévárnictví umožňuje nejrychlejší a často i neekonomičtější způsob, jak dodat kovům a slitinám určitý, často velmi složitý tvar. Je to způsob výroby kovových součástí, při kterém roztavený kov vlijeme do formy, v dutinách tavenina ztuhne a vytvoří surový odlitek. Podle možného množství odlitků vyrobených v jedné formě můžeme formy rozdělit do tří základních skupin:

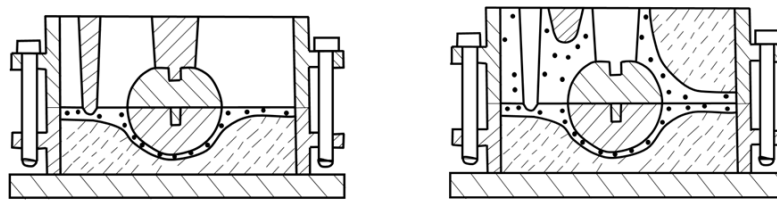
- **formy netrvalé** (formy na jedno použití): při vyjímání odlitků se forma rozruší. Jsou vhodné pro jakoukoliv sériovost a téměř pro všechny slitiny. Do tohoto typu forem se odlévá převážná část slévárenské produkce odlitků,
- **formy polotrvalé:** jedna forma se dá použít pro odlití až 10^2 kusů odlitků. Trvanlivost formy závisí na materiálu, z něhož je zhotovena (např. speciální pryže, sádra), tvaru odlitku, možnosti oprav atd. Používají se pro malosériovou výrobu odlitků jednoduchého tvaru odlévaných ze slitin s nízkým bodem tavení,
- **formy trvalé:** jsou zhotoveny většinou z ocelí, nebo litin. Do jedné kovové formy nebo kokily lze odlít v řádu 10^3 až 10^4 kusů odlitků. Životnost formy závisí především na materiálu odlitků (jejich lici teplotě) a jejich složitosti.

Pro výrobu tvarově složitějších odlitků se většinou využívají netrvalé pískové formy, vyrobené ze směsi vhodných slévárenských materiálů (pojiva a ostřiva), které formě zajistí

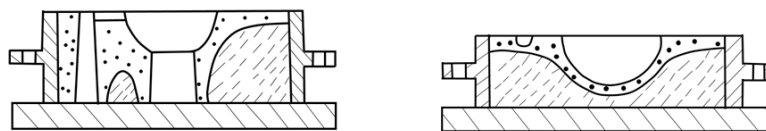
požadované vlastnosti. Slévárenské formovací směsi jsou přirozené nebo upravené sypké částice neplastických hornin, většinou křemene, obsahující až 50 % zemitého pojiva, vhodné přímo nebo po úpravě k výrobě slévárenských forem a jader. Musí se vyznačovat: dobrou tvárností, plastičností (schopnost přijímat tvar), vazností za syrova a případně pevností po vytvrzení, prodyšností, chemickou stálostí, žáruvzdorností, rozpadavostí a nízkou cenou.



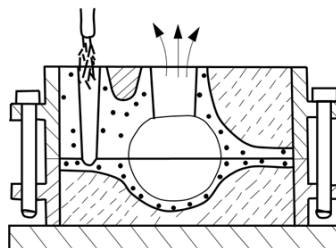
a) Výroba horního dílu formy



b) Výroba dolního dílu formy



c) Rozložení formy a vyjmutí modelu



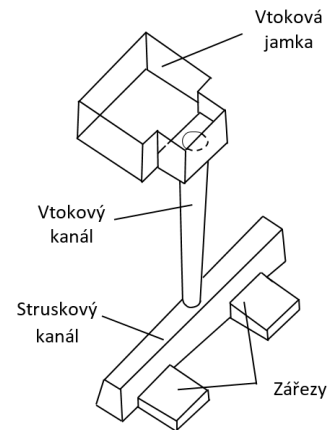
d) Složení formy a odlévání

Obrázek – Postup výroby slévárenské formy

Odlitek se formuje za pomoci modelového zařízení, které tvarově odpovídá odlitku (zahrnuje i přídavek kvůli smrštění kovu po utužení). Forma dále obsahuje vtokovou soustavu a další komponenty potřebné pro korektní tuhnutí odlitku, jako jsou nálitky, chladítka, filtry apod.

Vtokovou soustavou: se rozumí systém kanálů a dutin vytvořených ve formě za účelem dopravy roztaveného kovu do všech částí dutiny formy tvořící budoucí odlitek. Vtokových soustav existuje celá řada druhů a uspořádání, které se navzájem liší. Jejich volba závisí na tvaru a velikosti odlitku, druhu odlévaného kovu, lící teplotě, formovacím materiálu a typu formy. Základní části vtokové soustavy představuje:

- **Licí jamka:** slouží k nalévání roztaveného kovu z pánve.
- **Licí (vtokový) kůl:** navazuje na vtokovou jamku a slouží k dopravě tekutého kovu k dalším částem vtokové soustavy.
- **Odlučovač strusky:** slouží k rozvedení tekutého kovu od licího kanálku do jednotlivých zářezů, dále slouží k zachycení nečistot.
- **Zářezy:** spojují odlučovač strusky s formou.



Obrázek – Vtoková soustava formy

Vady odlitků představují konečný důsledek nedokonalých a zastaralých technologií, nekázně i nedodržování příslušných výrobních postupů ve slévárně. Výraz vada odlitku má podmíněný význam, protože rozlišuje následující typy vad:

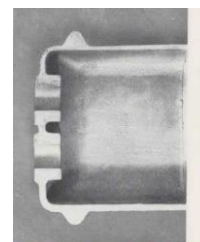
- *nepřípustná vada je odchylka od přípustné normy nebo technických podmínek. Tuto vadu nelze odstranit opravou. Odlitek s nepřípustnou vadou nazýváme zmetek tj. nejakostní výroba.*
- *přípustná vada je ta, kterou přípustné normy nebo technické podmínky připouštějí, aniž by požadovaly její odstranění výrobcem odlitku.*
- *odstranitelná vada je odchylka na odlitku od příslušných norem nebo technických podmínek, kterou je dovoleno odstranit.*

Výše uvedené definice vady odlitku a její členění naznačují možnost následující klasifikace vad:

- *odchylky tvaru, rozměru a hmotnosti,*



Obrázek – Přesazení odlitku v dělicí rovině



Obrázek – Nestejné tloušťky stěn odlitku

- *odchylky vzhledu (povrchové vady),*

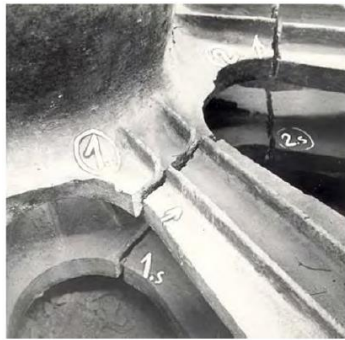


Obrázek – Povrchová připečenina

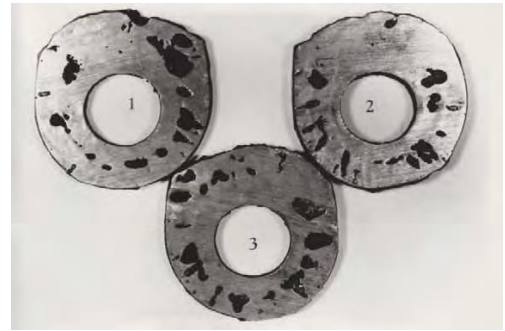


Obrázek – Dutiny na hrubém odlitku vyvolané zálupy ve vršku formy

- *odchylky od celistvosti (porušení souvislosti, dutiny, vměstky),*



Obrázek – Trhlina za tepla



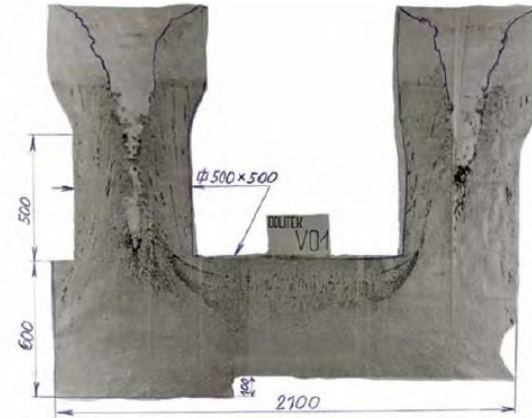
Obrázek – Bubliny ve stěně odlitku

- *odchylky od struktury (makro, mikrostruktura),*



Obrázek – Oxidická plena

- *odchylky od chemického složení a vlastností odlitku.*



Obrázek – Segregace

1.5 Kontrolní otázky

1. Uveďte charakteristiku ocelí.
2. Definujte základní rozdělení ocelí.
3. Uveďte charakteristiku litin.
4. Definujte základní rozdělení litin.
5. Charakterizujte základní typy primárních agregátů.
6. Vysvětlete princip rafinace oceli inertními plyny

7. Charakterizujte rozdíly mezi kuplovou pecí a elektrickou indukční pecí
8. Vysvětlete pojem očkování roztavené litiny.
9. Charakterizujte pojem slévárenská forma a uveďte základní typy.
10. K čemu slouží zářez ve vtokové soustavě?
11. Definujte jednotlivé druhy vad odlitků.

1.6 Doporučená studijní literatura

Problematiku k dané kapitole naleznete na stránkách uvedených za publikací.

- SAHOO, M. a S. SAHU, 2014. *Principles of Metal Casting*. 3rd ed. McGraw Hill Professional. ISBN 978-9339218164.
- MACHEK, V., 2015. *Kovové materiály 4: výroba a zpracování ocelí a litin*. Praha: České vysoké učení technické. ISBN 978-80-01-05686-8.
- ADOLF, Z. *Technologie výroby oceli v konvertorech: Studijní opora*. VŠB-TU Ostrava, 2013, 51 s.
- CHRÁST, J. *Slévárenská zařízení*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-720-4456-7.
- MORES, A. a M. NĚMEC. *Technologická zařízení sléváren*. V Praze: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 978-80-01-04490-2.
- FISCHER, U. *Základy strojírenství*. Praha: Europa-Sobotáles, 2004. ISBN 80-867-0609-5.
- ROUČKA, J. *Metalurgie litin*. Brno: PC-DIR, 1998. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1263-1.
- CHRÁST, J. *Slévárenská zařízení*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-720-4456-7.
- BOLIBRUCHOVÁ, D. *Zlievarenska metalurgia a technológia: návody na cvičenia*. V Žiline: Žilinská univerzita, 2004. ISBN 80-807-0263-2.
- NĚMEC, M., B. BEDNÁŘ a B. BRYKSÍ STUNOVÁ. *Teorie slévání*. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06026-1.
- NĚMEC, M., J. SUCHÁNEK a J. ŠANOVEC. *Základy strojírenské technologie I*. 3. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06056-8.
- VONDRÁK, V., A. PAVELKOVÁ a A. HANUS. *Metalurgie litin: vtokové soustavy a nálitkování*. 2. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2005. ISBN 80-248-0960-5.
- BOTHE, O. *Strojírenská technologie II pro strojírenské učební obory*. 6., upr. vyd. Praha: Sobotáles, 1999. ISBN 80-859-2058-1.
- ČADA, R. *Technologie tváření, slévání a svařování: objemové tváření zatepla, slévání: (návody do cvičení)*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita, 2015. ISBN 978-80-248-3833-5.

2 Kapitola: Shrnutí problematiky slévárenských technologií neželezných kovů a jejich slitin

2.1 Klíčová slova

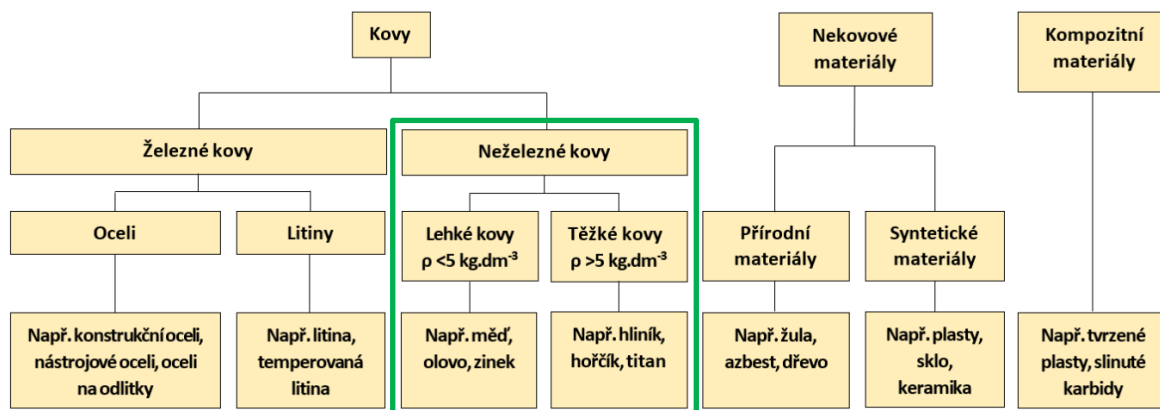
metalurgie, neželezné kovy, tavící pece, očkování, modifikace, rafinace, odlévání, vysokotlaké lití

2.2 Cíle kapitoly

Cílem kapitoly je osvěžení znalostí z oblasti metalurgie slitin neželezných kovů, tedy charakteristik těchto kovů, způsobů výroby v primárních agregátech a dalšího metalurgického zpracování (rafinace, očkování, modifikace) a způsobů jejich odlévání.

2.3 Úvod do kapitoly

Neželezné kovy jsou všechny kovy a slitiny, u nichž je základním prvkem jiný kov než železo. Největší využití mají tyto neželezné kovy: hliník (Al), měď (Cu), hořčík (Mg), zinek (Zn), olovo (Pb), titan (Ti), nikl (Ni) a jejich slitiny.



Obrázek – Rozdělení materiálů do skupin

2.4 Výklad

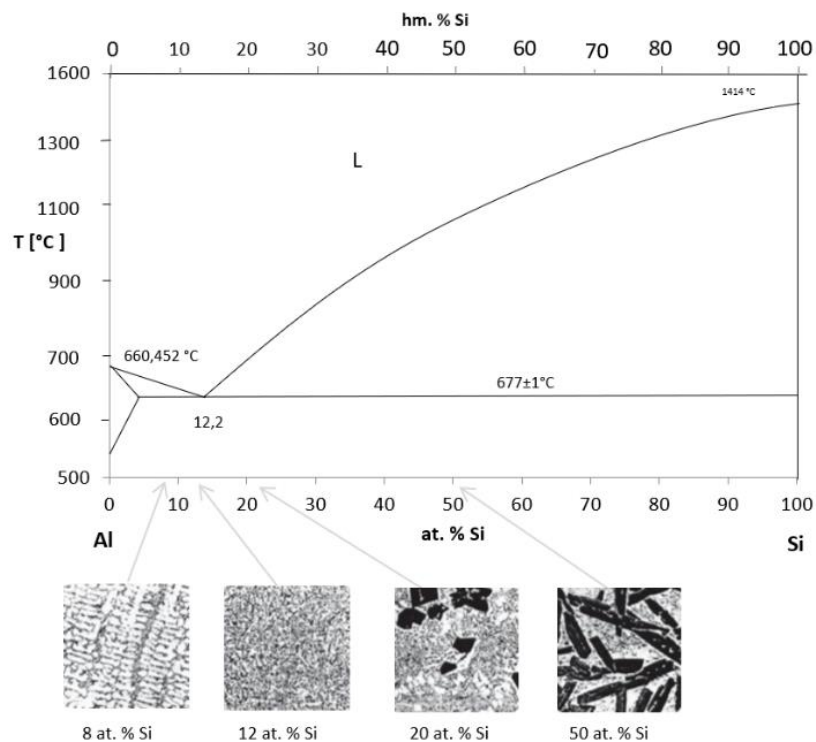
Slitiny hliníku: představují téměř 90 % hmotnosti všech vyráběných odlitků z neželezných slitin. Z velkého počtu vyvinutých a odzkoušených slitin se v běžné slévárenské praxi používají základní typy:

- *Al-Si* (tzv. *siluminy*),
- *Al-Cu* (tzv. *duralaluminiumy*),
- *Al-Mg* (tzv. *hydronalium*),

Další vzájemné kombinace a množství přísad vytváří řadu druhů slitin odvozených od základních typů, např. nejpoužívanější: *Al-Si-Mg*, *Al-Si-Cu*, *Al-Cu-Si* a *Al-Mg-Si*.

Slévárenské slitiny typu Al-Si (tzv. siluminy): obsah křemíku jako základní přísady je ve dvou a vícetříčlenných slitinách typu Al-Si vždy vyšší, než je jeho max. rozpustnost v tuhém roztoku Al. Podle rovnovážného diagramu tvoří pak hliník (fáze α) s křemíkem (fáze β) eutektický systém s omezenou rozpustností Si v Al. Slitiny Al-Si lze rozdělit na:

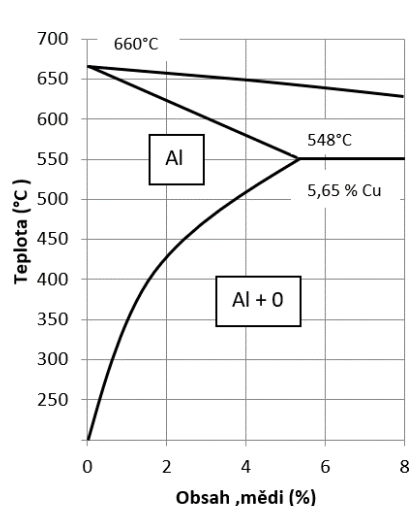
- *podeutektické* – s obsahem Si do 10 % (nejpočetnější skupina),
- *eutektické* – s obsahem Si v oblasti eutektického složení,
- *nadeutektické* – s obsahem Si nad eutektickým složením, hranice není přesně definována.



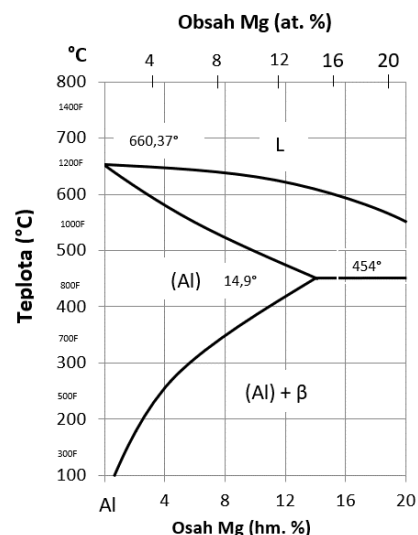
Obrázek – Rovnovážný diagram Al-Si a typické strukturní složení dle obsahu Si

Slévárenské slitiny Al-Cu (duraly): obsahují obvykle 4–5 % Cu. Slitiny s obsahem Cu přesahujícím maximální rozpustnost v Al nemají technický význam. Normalizované slitiny Al-Cu obsahují **titan** v množství asi 0,3 % pro zjemnění primárního zrna. Dalšími přísadovými prvky bývají **hořčík**, který zvyšuje pevnost, nebo **mangan**. Slitiny Al-Cu patří k tzv. vysokopevným slitinám hliníku. Vyznačují se vysokou pevností až nad 400 MPa. Tažnost a lomová houževnatost jsou až dvojnásobné oproti slitinám Al-Si. Odlitky z těchto slitin jsou vhodné pro použití za zvýšených teplot. Slévárenské vlastnosti slitin Al-Cu jsou však velmi špatné.

Slévárenské slitiny typu Al-Mg (tzv. hydronalium): Podle obsahu hořčíku se dělí na typy se 3, 5 a 9 % Mg. Čím vyšší je obsah hořčíku, tím širší je dvoufázové pásmo tuhnutí a tím horší jsou slévárenské vlastnosti. Slévárenské vlastnosti, zabíhavost, sklon ke vzniku rozptýlených staženin, trhlin, možnost náliťkování, se však u slitin Al-Mg všeobecně hodnotí jako špatné.



Obrázek – Rovnovážný diagram Al-Cu



Obrázek – Rovnovážný diagram Al-Mg

Slévárenské slitiny hořčíku: v technické praxi se hořčík používá výhradně jako slitiny. Převážná část hořčíkových slitin se zpracovává odléváním. Hlavním přísadovým prvkem je téměř výhradně hliník (jedná se tedy o slitiny Mg-Al). Technicky zajímavé, ale výrobně mimořádně složité jsou superlehké slitiny Mg-Li. Technický význam ostatních typů slitin pro odlévání je zanedbatelný. Obsah hliníku ve slévárenských slitinách se pohybuje v rozmezí od 3 do 9 %Al.

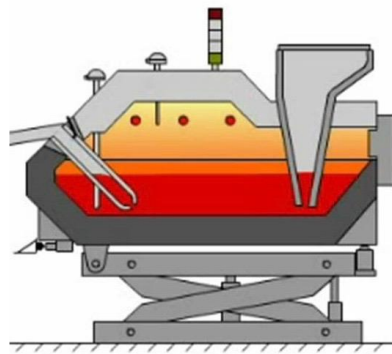
Slévárenské slitiny mědi: měď tvoří základní prvek ve velmi rozmanitém okruhu slitin. U slitin se často využívají jejich specifické mechanické, frikční, fyzikální, antikorozi a jiné vlastnosti, které u jiných druhů slitin nejsou dosažitelné. Slitiny mědi se podle hlavního přísadového prvku dělí do dvou základních skupin – na bronz a mosazi. Z dalších typů slitin se v menším rozsahu vyrábí slitiny Cu-Ni, Cu-Cr, Cu-Mn, Cu-Si, Cu-Be eventuelně některé další. Z hlediska slévárenského je důležitá šířka pásma tuhnutí mezi teplotami likvidu a solidu. Podle tohoto kritéria je možno slitiny rozdělit zhruba do 3 skupin:

- slitiny s **úzkým intervalem tuhnutí do asi 50 K** – žluté mosazi, manganový, hliníkový a niklový bronz (slitiny CuZnNiSnPb), chromová měď,
- slitiny s **intervalem tuhnutí 50-110 K** – křemíková mosaz, křemíkový bronz a slitiny Cu-Ni,
- slitiny s **intervalem tuhnutí nad 110 K (až do asi 170 K)** – cínový a cínovo-olověný bronz, červený bronz a olověný bronz.

Slévárenské slitiny zinku: obsahují jako hlavní přísadový prvek hliník. Obsah hliníku v normovaných slitinách se pohybuje v rozmezí 4–27 % Al. Slitiny zinku se odlévají všemi běžnými slévárenskými metodami, výrazně však převažuje metoda tlakového lití. Při tlakovém lití slitin s 8, resp. 12 % Al je možno používat stroje s teplou i se studenou tlakovou komorou. Ošetření povrchu forem postřikou se provádí vždy až po několika cyklech. Nehrozí nalepování odlitků nebo reakce kovu s formou. Slitiny Zn-Al27 mají již poněkud vyšší lící teplotu, při které může docházet ke kontaminaci železem z formy. Proto se doporučuje odlévat na strojích se studenou komorou, u nichž je teplota forem nižší.

K udržování teploty taveniny v blízkosti jednotlivých pracovišť nebo licích agregátů slouží především **udržovací pece**. Topný systém umožňuje regulovat teplotu kovu a částečně též tavit pevnou vsázku, přidávanou do roztaveného kovu. V udržovacích pecích se obvykle neprovádí zásadní úprava chemického složení ani větší metalurgické zásahy. Taveninu je často možné očkovat nebo modifikovat.

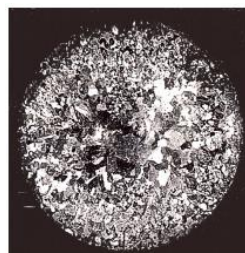
Dávkovací pece jsou určeny k automatickému dávkování tekutého kovu, nejčastěji při odlévání do kovových forem pod tlakem. Kov, natavený v tavicí peci, se plnicím trychtýřem nalije do vany dávkovací pece, která je hermeticky uzavřena. Dávkování kovu se provádí zvýšením tlaku plynu v komoře pece, který vytlačí kov do dávkovací trubice. Po snížení přetlaku na původní hodnotu se vylévání kovu ukončí.



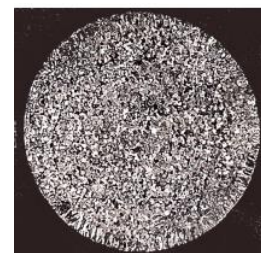
Obrázek – Schéma elektrické dávkovací pece

Úprava chemického složení taveniny: při tavení hliníkových slitin se obvykle vychází ze vsázkových surovin, které svým chemickým složením odpovídají tavené značce. Úpravy chemického složení taveniny proto obvykle mají za cíl pouze drobné korekce obsahu jednotlivých prvků, eventuálně kompenzaci propalu. Úprava chemického složení se provádí po roztavení vsázky a po chemické analýze. Přísadové prvky a stejně tak i prvky, používané pro očkování a modifikaci, se dodávají jako předslitiny s hliníkem. Úprava chemického složení se obvykle týká prvků Si, Cu, Mg, Fe, Mn a Ti.

Očkování: provádí se za účelem zjemnění zrna, a tedy zlepšení mechanických i mnoha technologických vlastností. Provádí se titanem nebo kombinací titanu a bóru. Tyto prvky se do taveniny vnášejí pomocí očkovacích solí, (např. K_2TiF_6 , KBF_4 a dalších), očkovacích tablet nebo v podobě předslitin Al-Ti nebo Al-Ti-B. Dalšího zlepšení očkovacího účinku se dosahuje očkovadly s obsahem Ti a B. Předslitiny s Ti a B obvykle obsahují do 5 % Ti a do 1 % B v různých poměrech. Bór sám nepůsobí jako očkovadlo, vždy pouze v kombinaci s titanem.



Základní neočkováná slitina



Po očkování Al-Ti

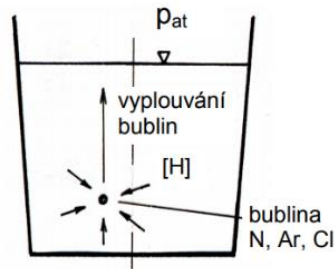
Obrázek – Vliv očkování na velikosti zrna slitiny Al-Si7

Modifikace: provádí se za účelem změny tvaru křemíku v eutektiku. Křemík se v eutektiku vylučuje ve třech různých morfologických podobách – zrnité, lamelární, modifikované. Nejsilnější modifikační účinek má **sodík**. Sodík se do taveniny přidává ve formě exotermických tablet, jako kovový sodík či modifikační soli. Dalším prvkem, který má dobrou modifikační schopnost, je **stroncium**. Je mnohem méně reaktivní než sodík a dává vysoké a stabilní využití (až 90 %). Používá se jako předslitina s hliníkem (případně s hliníkem a křemíkem). Čím je vyšší teplota taveniny, tím rychleji se předslitina rozpouští a tím rychleji nabíhá modifikační účinek.

Rafinace taveniny: jako rafinace se označuje proces, při kterém se v tavenině snižuje množství vměstků a případně i vodíku. Při rafinaci se využívají zejména následující postupy:

- **odstátí taveniny** – *separace* vměstků na principu jejich vyplouvání,
- **rafinace plynovými bublinami** – difuze vodíku do bublin s nulovým parciálním tlakem vodíku, s nimiž je vynášen na hladinu, nebo s nimi chemicky reaguje.

Malá velikost bublin, dostatečně dlouhá dráha (tzn. jejich tvoření u dna dostatečně vysoké pánve) a dobré promíchávání (homogenizace) taveniny, jsou klíčovou podmínkou účinného odplynění. Rovněž je nutné, aby neutrální plyn neobsahoval vlhkost. Z tohoto důvodu je nutno používat vysoce čisté rafinační plyny, v případě dusíku čistoty 99,99 %. Dusík běžné technické čistoty naprosto nevyhovuje, neboť obsahuje značné množství vlhkosti. Účinek odplynění dusíkem a argonem je srovnatelný.



Obrázek – Princip odplynování neutrálními a aktivními plyny



Obrázek – Schéma zařízení pro rafinaci hliníku

- **chemická vazba vměstků pomocí krycích a rafinačních solí** – rozrušení oxidické obálky chemickou reakcí a uvolnění nezreagovaného kovu zpět do lázně, ochrana hladiny před okolní atmosférou,
- **mechanické zachycování vměstků při filtraci taveniny.**

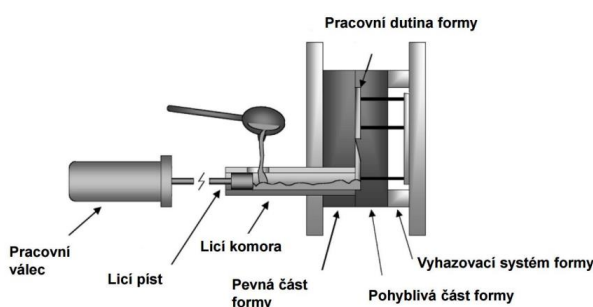
Pro výrobu odlitků z hliníkových slitin se používají téměř všechny známé slévárenské metody. Vzhledem k poměrně nízké tavicí teplotě není žáruvzdornost formovacích hmot velkým problémem a rovněž při gravitačním lití do kovových forem vyhovují běžné nelegované slitiny železa. Pouze při lití za zvýšených sil je tepelné a mechanické namáhání tak velké, že pro výrobu forem se musí používat vysokolegované oceli. Z hlavních způsobů odlévání hliníkových slitin lze zmínit následující:

- *Lití do pískových forem*

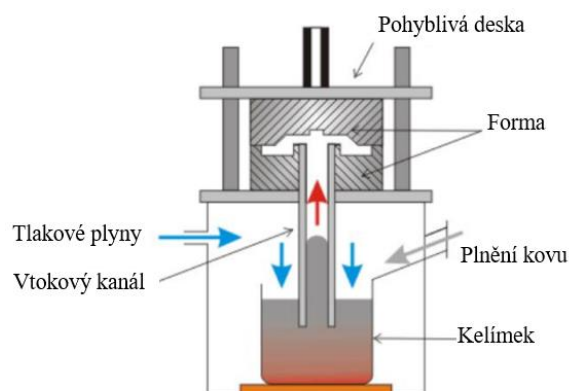
- *V-proces*
- *Lití do skořepinových forem*
- *Gravitační lití do kovových forem*
- **Vysokotlaké lití**
- **Nízkotlaké lití**

Nejdůležitější technologií výroby hliníkových odlitků je **vysokotlaké lití**. Principem výroby je vstřikování roztavené slitiny do dutiny kovové formy pod vysokým tlakem až 250 MPa. Za těchto podmínek je možné vyrábět tvarově velmi komplikované odlitky. Tvar odlitku musí respektovat možnosti rozebrání formy a vytažení volných částí a jader. Maximální velikost odlitků, které se na konkrétním stroji dají vyrobit, je limitována maximální hmotností kovu a uzavírací silou stroje. Je to hodnota síly, kterou jsou svírány obě poloviny formy. Podle konstrukce se tlakové stroje dělí na dva základní typy, se **studenou** a s **teplou komorou**. Podle směru pohybu plnicího pístu mohou být stroje se svislou nebo vodorovnou komorou. Slitiny hliníku se v současné době odlévají téměř výhradně na strojích se studenou horizontální komorou. Tlakově lité odlitky nejsou, co se týče vnitřní homogenity, příliš kvalitními výrobky. Při rozstříkávání kovu ve formě dochází k jeho oxidaci a reakci s mazadlem a důsledkem je vznik velkého množství vměstků.

Nízkotlaké lití: stroj pro tuto technologii je tvořen tlakotěsnou udržovací pecí, nad kterou je upnuta dělená kovová forma, obvykle s vodorovnou dělicí rovinou. Tavenina v kelímku pece je se spodním dílem formy propojena stoupací trubicí ze žáruvzdorného materiálu tak, že trubice spodním okrajem zasahuje pod hladinu kovu. Odlévání se provádí zvýšením tlaku nad hladinou kovu, čímž je kov z kelímku vytlačován stoupací trubicí vzhůru do formy. Protože je ústí stoupací trubice ponořeno pod vrstvu oxidů a nečistot na hladině pece, vstupuje do formy čistý kov bez vměstků. Využití tekutého kovu je při nízkotlakém lití mimořádně vysoké a dosahuje přes 90 %. Kvalita odlitků, vyrobených touto metodou, je velmi vysoká. Nízkotlakým litím je možno vyrábět různorodé hmotnostní kategorie odlitků. Při lití silnostěnných odlitků s dlouhou dobou tuhnutí se však velmi prodlužuje délka výrobního cyklu.



Obrázek – Schéma procesu tlakového lití



Obrázek – Schéma procesu nízkotlakého lití

2.5 Kontrolní otázky

1. Charakterizujte základní typ hliníkových slitin.
2. Charakterizujte slévárenské slitiny hořčíku.
3. Uveďte základní typy slévárenských slitin mědi.
4. Charakterizujte úkoly tavicích pecí.
5. Definujte vliv očkovaní a modifikace na vlastnosti slitin.
6. Popište princip odplyňování probubláváním plyny.
7. Definujte princip filtrace slitin neželezných kovů.
8. Vyjmenujte technologie odlévání hliníkových slitin do netrvalých forem.
9. Uveďte princip technologie tlakového lití.

2.6 Doporučená studijní literatura

Problematiku k dané kapitole naleznete na stránkách uvedených za publikací.

- BOLIBRUCHOVÁ, D. a R. PASTIRČÁK. *Zlievarenská metalurgia neželezných kovov*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2018. ISBN 978-80-554-1463-8.
- SKOČOVSKÝ, P., P. PALČEK a L. VÁRKOLY. *Konstrukčné materiály*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2000. ISBN 80-7100-608-4.
- ROUČKA, J. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
- NĚMEC, M., B. BEDNÁŘ a B. BRYKSÍ STUNOVÁ. *Teorie slévání*. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04395-0.
- KRATOCHVÍL, B., V. ŠVORČÍK a D. VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-708-0568-4.
- VOJTĚCH, D. *Kovové materiály*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2006. ISBN 978-80-7080-600-5.
- MOHYLA, M. *Strojírenské materiály I*. 2. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2003. ISBN 80-248-0270-8.
- CHRÁST, J. *Slévárenská zařízení*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-720-4456-7.
- BOLIBRUCHOVÁ, D. *Zlievarenska metalurgia a technológia: návody na cvičenia*. V Žiline: Žilinská univerzita, 2004. ISBN 80-807-0263-2.
- MORES, A. a M. NĚMEC. *Technologická zařízení sléváren*. V Praze: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 978-80-01-04490-2.

3 Kapitola: Úvod do metod fyzikálního modelování proudění

3.1 Klíčová slova

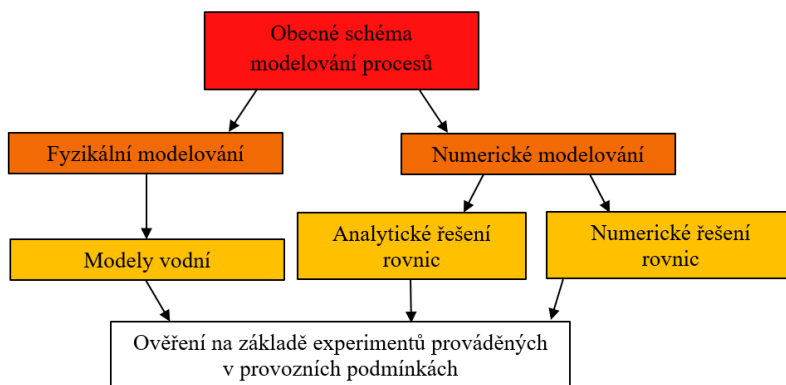
fyzikální modelování, metalurgie, proudění, teorie podobnosti, bezrozměrové parametry

3.2 Cíle kapitoly

Cílem kapitoly je poskytnout studentovi základní informace o metodě fyzikálního modelování procesů. Seznámit studenta s teoretickými základy této metody a jejich aplikaci při konstrukci reálného fyzikálního modelu.

3.3 Úvod do kapitoly

Modelování probíhajících procesů v systému je metodou, jejíž cílem je co nejspolehlivěji zachytit chování reálného systému pomocí modelu. Na základě výsledků dosažených na modelu lze pak zpětně předpovídat chování reálného systému při různých změnách procesu. **Model** je vyjádřením podstatných vlastností reálného systému v přijatelné a cílevědomé formě. Musí tedy vyjadřovat vztah mezi příčinou a následkem. Konečným cílem modelování je vytvořit takový model systému, definovaný na objektu, aby chování modelu bylo v jistém smyslu stejné jako u reálného systému za stejných provozních podmínek.



Obrázek – Schéma modelování procesů

Obecně lze modelování rozdělit na fyzikální a numerické. Fyzikální modelování umožňuje získat informace o charakteru proudění kovu a také dalších procesů, vyskytujících se při jeho zpracování. Fyzikální modely pokrývají především problematiku hydrodynamiky a jsou konstruovány podle pravidel, vyplývajících z teorie podobnosti, která je realizována prostřednictvím vhodných kritérií podobnosti. Kvůli možnosti pozorování jevů, probíhajících během procesu jsou fyzikální modely vyráběny z transparentních materiálů (např. plexisklo). Průmyslová zařízení jsou stále složitější a provádět experimentální výzkum v průmyslových podmínkách je stále komplikované a často velmi nákladné. Z těchto důvodů se přistupuje k využití fyzikálních modelů.

3.4 Výklad

Fyzikální modelování probíhajících procesů v systému je metodou, jejímž cílem je co nejdříve zachytit chování reálného systému pomocí **fyzikálního modelu**.

Model i dílo má při fyzikálním modelování **stejnou fyzikální podstatu**. Proudění tekutiny je tedy modelováno opět prouděním tekutiny, ale v určitém měřítku délek, rychlostí objemových průtoků, viskozit atd. Podmínkou přenosu výsledků z modelu na dílo je **podobnost procesů** probíhajících v modelu a díle.

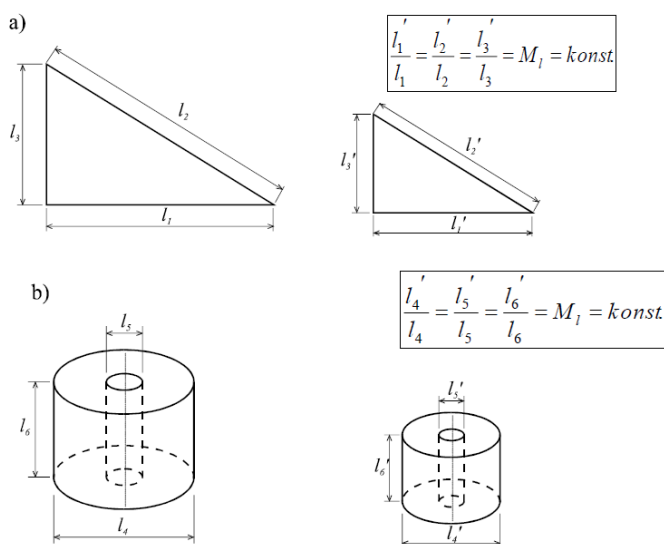
Podobnost dvou systémů

Původně byl pojem podobnost zaveden v geometrii jako podobnost plošných a prostorových útvarů. Teorie fyzikálního modelování rozeznává a využívá kromě geometrické podobnosti různé další druhy podobností, které charakterizují podobnost různých fyzikálních jevů a které jsou popsány v následujícím textu. Podobnost dvou systémů pak vyžaduje **podobnost všech relevantních veličin** v celém objemu obou systémů, tzn. v modelu a díle.

Geometrická podobnost je charakterizována jako *podobnost tvaru*. Systémy jsou geometricky podobné, když poměr odpovídajících lineárních rozměrů na modelu a díle je stejný. Tento poměr je nazýván **konstantou podobnosti**.

$$M_l = \frac{l'_i}{l_i} = konst. \quad (1.1)$$

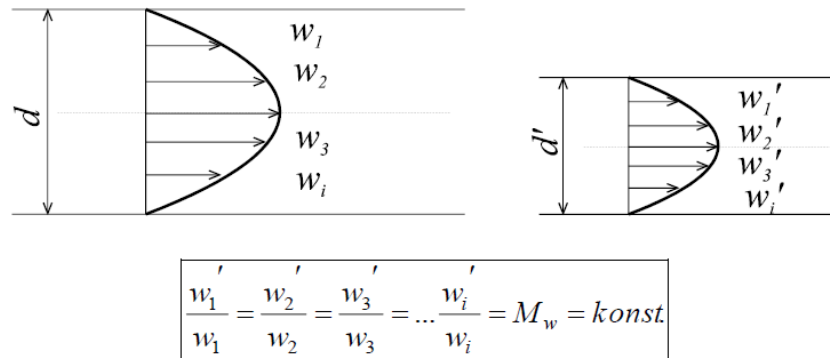
V případě, že $M_l=1$, pak jsou oba systémy geometricky shodné. Konstanta podobnosti délek M_l je při vlastním experimentálním modelování rovněž označována jako **délkové měřítko** (*scale factor*), tzn. měřítko, ve kterém je model fyzicky sestaven vzhledem k dílu.



Obrázek – Příklad geometricky podobného plošného (a) systému.

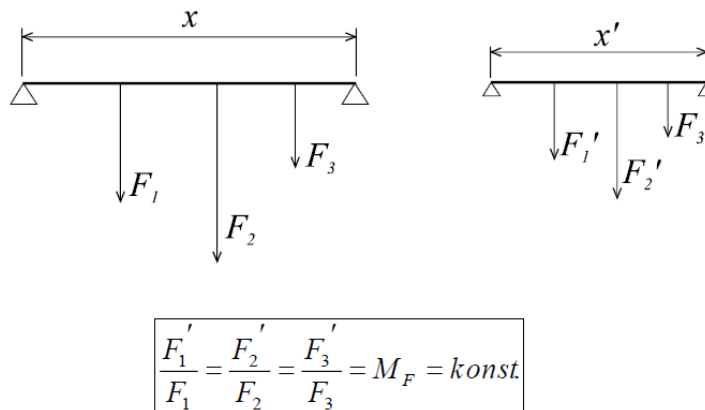
Kinematická podobnost vyjadřuje **podobnost pohybu**, tj. **podobnost rychlostních polí a polí zrychlení**. Kinematická podobnost je v podstatě pozorována mezi dvěma systémy geometricky

podobnými, ve kterých je poměr rychlostí (resp. poměr zrychlení) v navzájem odpovídajících místech modelu a díla stálý, přičemž směr rychlosti nebo zrychlení je totožný v obou systémech.



Obrázek – Kinematická podobnost rychlostních polí při laminárním a ustáleném proudění vazké tekutiny v potrubí různého průměru.

Dynamická podobnost vyjadřuje **podobnost sil** a rovněž je pozorována mezi dvěma geometricky podobnými systémy, ve kterých je poměr sil v navzájem odpovídajících místech a časech stálý a směr jejich působení totožný. U dynamické podobnosti se předpokládá podobnost geometrická i kinematická.



Obrázek – Dynamická podobnost silových polí působících ve dvou geometricky podobných systémech.

Dynamická podobnost při proudění tekutiny V dynamicky podobných systémech, kde probíhá proudění tekutiny za izotermických podmínek je nutno uvažovat všechny relevantní síly, které mají vliv na výsledný charakter proudění. Základní rozdělení těchto sil: **síly vnější a síly vnitřní**. Síly vnější působí na systém (kapalinu) zevnějšku a síly vnitřní jsou generovány jako důsledek vlastností kapaliny.

Tab. 1.1 Základní typy sil uvažované při proudění tekutiny v dynamicky podobných systémech

	Síla	Vzorec
Vnější	Setrvačná	$F_s = m \cdot a \cong \rho \cdot l^2 \cdot w^2$
	Tíhová	$F_g = m \cdot g = \rho \cdot V \cdot g \cong \rho \cdot l^3 \cdot g$
	Hybnostní	$F_g = Q_m \cdot \Delta w = m \cdot \tau^{-1} \cdot \Delta w \cong \rho \cdot l^3 \cdot \tau^{-1} \cdot \Delta w$
Vnitřní	Tlaková	$F_p = p \cdot S \cong p \cdot l^2$
	Vazká	$F_t = \eta \cdot \Delta w \cdot \Delta y^{-1} \cdot l^2 \cong \eta \cdot w \cdot l$
	Kapilární	$F_k = \sigma \cdot l$

Kde m – hmotnost, kg

a – zrychlení, $m \cdot s^{-2}$

ρ – hustota, $kg \cdot m^{-3}$

L – charakteristický rozměr, m

w – rychlost, $m \cdot s^{-1}$

g – tíhové zrychlení, $m \cdot s^{-2}$

V – objem, m^3

τ – čas, s

p – tlak, Pa

p_d – dynamický tlak, Pa

η – dynamická viskozita, $Pa \cdot s$

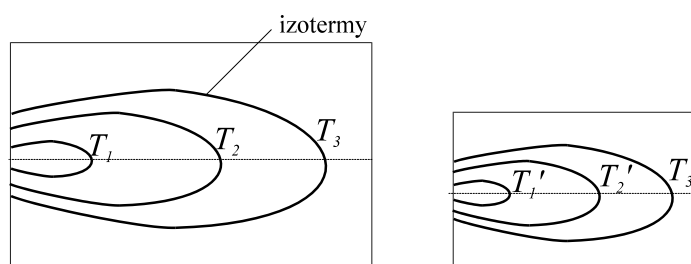
ν – kinematická viskozita, $m^2 \cdot s^{-1}$

σ – povrchové napětí, $N \cdot m^{-1}$

F – síla, N

Tepelná podobnost charakterizuje podobnost teplot, teplotních gradientů a tepelných toků v odpovídajících časech procesu a odpovídajících místech geometricky podobných systémů. Tepelnou podobnost je nutno zajistit při modelování neizotermálních procesů.

$$\frac{T_1'}{T_1} = \frac{T_2'}{T_2} = \frac{T_3'}{T_3} = M_T = konst.$$



Obrázek – Tepelná podobnost teplotních polí ve dvou geometricky podobných systémech.

Chemická podobnost vyjadřuje podobnost koncentrací a koncentračních gradientů v odpovídajících časech procesu a odpovídajících místech geometricky podobných systémů.

Obdobným způsobem by bylo možné charakterizovat i další druhy podobností.

Bezrozměrové parametry

Vyjádření podobnosti dvou systémů pomocí konstant podobnosti je sice možné, ale z praktického hlediska není příliš rozšířené. Nejčastěji využívaným způsobem vyjádření podobnosti dvou systémů je pomocí tzv. **bezrozměrových parametrů**.

Bezrozměrový parametr K_q v základním systému:

$$K_q = \frac{q_i}{q_j} \quad (2.1)$$

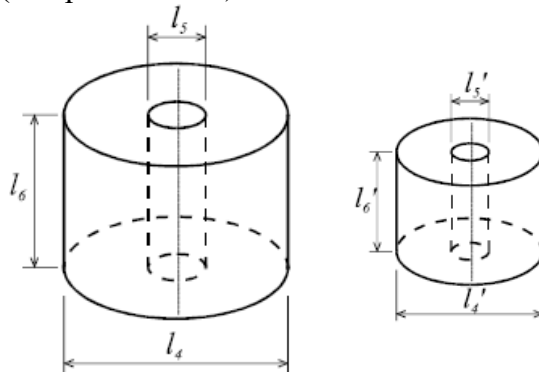
kde: K_q – bezrozměrový parametr veličiny q

$\frac{q_i}{q_j}$ – poměr dvou libovolně zvolených veličin q v základním systému
(např. poměr l_5/l_6)

Bezrozměrový parametr K'_q v podobném systému

$$K'_q = \frac{q'_i}{q'_j} \quad (2.2)$$

kde: $\frac{q'_i}{q'_j}$ – poměr stejných veličin v homologických bodech podobného systému (tzn. poměr l'_5/l'_6)



Obrázek – Geometricky podobné systémy.

Z podílu bezrozměrových parametrů K'_q a K_q vyplývá

$$\frac{K'_q}{K_q} = \frac{q'_i}{q'_j} \cdot \frac{q_j}{q_i} = M_q \cdot \frac{1}{M_q} = 1 \quad (2.3)$$

U podobných systémů musí tedy platit

$$K_q = K'_q \quad (2.4)$$

Bezrozměrový parametr má v homologických bodech podobných systémů stejnou hodnotu – nemění se, je invariantní (první věta podobnosti). Bezrozměrový parametr nemá však ve všech bodech těchto systémů stálou hodnotu!

V oblasti aplikace teorie podobnosti a modelování jsou bezrozměrové parametry označovány jako **kritéria podobnosti** (invarianty podobnosti, podobnostní čísla, π -proměnné) - např. kritérium Reynoldsovo (Re), Froudeho (Fr), Eulerovo (Eu), Grasshoffovo (Gr) ad.

Většinu těchto kritérií podobnosti lze vyjádřit vhodně zvoleným poměrem vybraných sil působících v systému např. setrvačné, tíhové (gravitační), vazké ad.

Tabulka Vybraná kritéria podobnosti.

Název kritéria	Označení	Vzorec	Interpretace	Aplikace
Froudeho	<i>Fr</i>	$\frac{w^2}{g \cdot l}$	Poměr sil setrvačných a tíhových.	Volné proudění tekutiny, vlnění tekutiny. Při vynuceném proudění odpadá.
Galileovo	<i>Ga</i>	$\frac{g \cdot l^3}{v^2}$	Poměr sil tíhových a vazkých při volném proudění	Gravitační proudění vazké tekutiny.
Homochronismu (Strouhalovo)	<i>Ho</i> (<i>Str</i>)	$\frac{w \cdot \tau}{l}$	Bezrozměrový čas.	Charakterizuje ustálenost pohybu v soustavě.
Machovo	<i>Ma</i>	$\frac{w}{c}$	Poměr rychlosti proudění k rychlosti zvuku.	Průtok plynu vysokými rychlostmi.
Pecletovo dif.	<i>PeD</i>	$\frac{w \cdot l}{D}$	Poměr rychlosti konvektivního přenosu hmoty k difuznímu přenosu hmoty	Přenos hmoty při proudění tekutin.
Reynoldsovo	<i>Re</i>	$\frac{w \cdot l}{\nu}$	Poměr sil setrvačných a vazkých.	Přenos hybnosti při proudění tekutin.
Stokesovo	<i>Stk</i>	$\frac{w \cdot d^2 \cdot \rho}{\eta \cdot l}$	Poměr sil setrvačných a sil vazkých působících na pevnou částici v tekutině.	Klesání, sedimentace částic v tekutinách.

Kritéria libovolného jevu mohou být transformována na jiná kritéria vzájemným dělením, násobením, umocněním konstantou nebo násobením konstantou.

Stanovení bezrozměrových parametrů metodou podobnostní transformace rovnic

Většina fyzikálních procesů může být popsána *úplnou fyzikální rovnicí*, přičemž se většinou jedná o rovnice diferenciální (obyčejné či parciální) nebo o systém diferenciálních rovnic. **Úplná fyzikální rovnice** se vyznačuje tím, že bere v úvahu všechny závislosti mezi relevantními veličinami, tzn. mezi veličinami, které mají v daném procesu rozhodující význam. Tato rovnice musí být pro popis konkrétního jevu doplněna **podmínkami jednoznačnosti**:

- ✓ *fyzikální podmínky* (fyzikální vlastnosti látky, v níž proces probíhá – viskozita, hustota, měrné teplo, součinitel tepelné vodivosti ad.).
- ✓ *počáteční podmínky* (stav systému na počátku procesu - např. pole rychlostí a teplot)
- ✓ *hraniční podmínky* (stav systému na styku s vnějším prostředím – drsnost stěn, tepelné toky přes stěny, vstupní a výstupní rychlosti proudícího média aj.).

Sjednocení úplné fyzikální rovnice a podmínek jednoznačnosti dává **základní rovnice**.

K popisu fyzikálního jevu, jehož rovnice je nesnadno řešitelná nebo není známa se s výhodou používá **kriteriální rovnice**. V kriteriální rovnici jsou **relevantní veličiny nahrazeny bezrozměrovými parametry** (kritérii podobnosti), které jsou z těchto relevantních veličin odvozeny (druhá věta podobnosti). Vzájemné funkční závislosti mezi bezrozměrovými parametry se určují experimentálně měřením na modelu.

V případě, že studovaný děj lze popsat určitou formou základní rovnice (většinou diferenciální), lze pro odvození bezrozměrových parametrů použít metod, které vychází právě **z tvaru** těchto rovnic. Výhoda těchto metod spočívá v tom, že nemusíme hledat relevantní veličiny, neboť příslušná rovnice tyto relevantní veličiny obsahuje. Rovnice je tak funkcí bezrozměrových parametrů a rovněž počátečních a hraničních podmínek. Uvedenou metodu získávání bezrozměrových parametrů preferuje mnoho autorů právě s ohledem na její větší objektivitu, přesnost a jednoduchost.

Jsou známy tři základní metody podobnostní transformace – metoda indikátorů podobnosti, metoda bezrozměrových rovnic a metoda integrálních analogů.

Podstatu metody s použitím indikátorů podobnosti lze objasnit na analýze diferenciální rovnice toku skutečné viskózní kapaliny.

Pro tok ve směru horizontální osy x a při gravitačním zrychlení g_x má tato rovnice tvar:

$$\rho \cdot \frac{\partial w_x}{\partial \tau} + \rho \cdot \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} w_x + \frac{\partial w_x}{\partial y} w_y + \frac{\partial w_x}{\partial z} w_z \right) = \rho \cdot g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \cdot \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} \right)$$

Pro libovolný zmenšený (nebo zvětšený) systém, který má být podobný systému základnímu, vyjádříme předchozí rovnici pomocí příslušných konstant podobnosti – provedeme tedy podobnostní transformaci rovnice.

$$\frac{M_\rho \cdot M_w}{M_\tau} \cdot \rho \frac{\partial w_x}{\partial \tau} + \frac{M_\rho \cdot M_w^2}{M_l} \cdot \rho \cdot \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} w_x + \frac{\partial w_x}{\partial y} w_y + \frac{\partial w_x}{\partial z} w_z \right) =$$

$$= M_\rho \cdot M_g \cdot \rho \cdot g_x - \frac{M_p}{M_l} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{M_\eta \cdot M_w}{M_l^2} \eta \cdot \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} \right)$$

kde : $M_q = \frac{q'}{q}$ – konstanta podobnosti veličiny q

q' – hodnota veličiny q na modelu

q – hodnota veličiny q na díle

Aby byly obě rovnice identické tzn., aby byla zachována podobnost dějů, musí platit, že vzniklé *komplexy konstant podobnosti* u každého z členů druhé rovnice budou shodné tzn.:

$$\frac{M_\rho \cdot M_w}{M_\tau} = \frac{M_\rho \cdot M_w^2}{M_l} = M_\rho \cdot M_g = \frac{M_p}{M_l} = \frac{M_\eta \cdot M_w}{M_l^2}$$

Tuto rovnici můžeme dále upravit, např. vydělením druhým členem:

$$\frac{M_l}{M_w M_\tau} = \frac{M_g M_l}{M_w^2} = \frac{M_p}{M_\rho M_w^2} = \frac{M_\eta}{M_l M_\rho M_w} = 1$$

Takto vzniklé bezrozměrové komplexy skládající se z konstant podobnosti jednotlivých veličin označujeme jako **indikátory podobnosti**. U podobných jevů jsou tyto indikátory podobnosti rovny jedné (první věta podobnosti). V každém indikátoru podobnosti je obsažena jedna veličina, která určuje povahu tohoto indikátoru. V prvním je to čas τ , ve druhém zrychlení g , ve třetím tlak p a ve čtvrtém viskozita η .

Tvar bezrozměrových parametrů pro výše uvedený případ toku viskózní kapaliny můžeme získat úpravou jednotlivých indikátorů podobnosti z rovnice:

$$\frac{M_l}{M_w M_\tau} = \frac{\frac{l'}{l}}{\frac{w' \cdot \tau'}{w \cdot \tau}} = 1 \quad \frac{w' \cdot \tau'}{l'} = \frac{w \cdot \tau}{l}$$

Tento bezrozměrový parametr je znám jako **kritérium homochronismu (Ho)**

$$Ho = \frac{w \cdot \tau}{l}$$

Obdobným způsobem je možno odvodit další parametry z dalších indikátorů podobnosti. Získáme tak **kritérium Froudeho (Fr)**, **Eulerovo (Eu)** a **Reynoldsovo (Re)**

$$Fr = \frac{w^2}{g \cdot l}, \quad Eu = \frac{p}{\rho \cdot w^2}, \quad Re = \frac{w \cdot l \cdot \rho}{\eta} = \frac{w \cdot l}{\nu}$$

Kritériální rovnice má pak tvar:

$$\phi(Ho; Fr; Eu; Re) = 0$$

Tato rovnice se rovněž velmi často uvádí ve tvaru

$$Eu = \phi(Ho; Fr; Re)$$

Z této rovnice vyplývá, že pro získání identické hodnoty kritéria Eu na dílo a jeho modelu je nutno zabezpečit rovněž i identitu kritérií Ho , Fr a Re pro dílo a jeho model. Mezi kritérii existuje tedy příčinný vztah. Jedno kritérium je určené (Eu) a ostatní kritéria jsou určující.

Jaký vliv má změna tvaru základní diferenciální rovnice na podmínky podobnosti lze demonstrovat na následujícím příkladu:

V případě ustáleného pohybu je

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} = 0,$$

odpadá první člen rovnice a tím i nutnost splnění identity kritéria homochronismu (Ho).

Pokud je tok pouze v horizontálním směru lze předpokládat $g_x = 0$, odpadá třetí člen rovnice, a tedy i nutnost identity kritéria Froudeho (Fr).

Pokud obě výše uvedené podmínky platí současně je možno kritériální rovnici redukovat na vztah

$$Eu = \phi(Re)$$

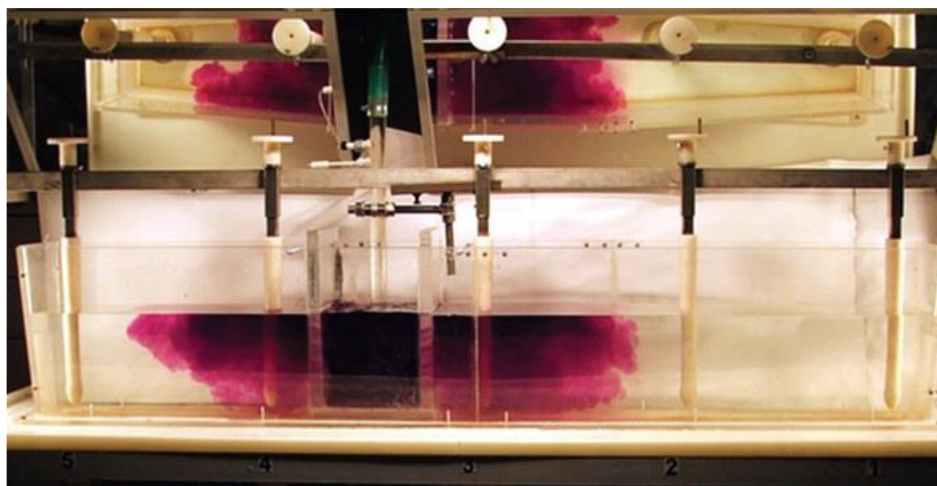
a jedinou podmínkou je splnění identity Re kritéria pro dílo a jeho model tzn. $Re = Re'$.

Experimentální podstata fyzikálního modelování

Konstrukce fyzikálního modelu na základě teorie podobnosti je pouze prvním (ač velmi důležitým) krokem v procesu fyzikálního modelování. Neméně důležitá je také vizualizace a interpretace probíhajících dějů. Metalurgické reaktory můžeme obecně rozdělit na průtočné a pánvové, přičemž na určitý typ reaktoru se při fyzikálním modelování aplikují různé metody vizualizace proudění. U průtočných reaktorů se stanovují tzv. **retenční časy**, tzn. časy zdržení tekutiny v reaktoru. Princip těchto metod, spočívá v injektáži značkovací (stopovací) látky do proudu tekutiny vstupující do reaktoru a vyhodnocování koncentrace či jiné měřitelné veličiny této látky na výstupu z reaktoru. U pánvových reaktorů retenční časy pozbývají významu, neboť v těchto typech reaktorů většinou po celou dobu proudí stejný objem tekutiny (nedochází k průtoku). Využívá se tedy převážně **vizualizace proudění** tekutiny, které lze provádět také v případě průtočných reaktorů.

Metody vizualizace proudění zahrnují experimentální postupy, pomocí kterých můžeme získat optický záznam proudového pole, obraz proudění v okolí těles, tvar proudnic, rychlostní profily, obrazy recirkulačního proudění, tvorbu vírů, oblasti laminárního a turbulentního proudění, zpětné proudění a mnoho dalších jevů při proudění. Samotný vizualizační experiment je vhodné zaznamenat pomocí videokamery nebo alespoň pomocí fotoaparátu.

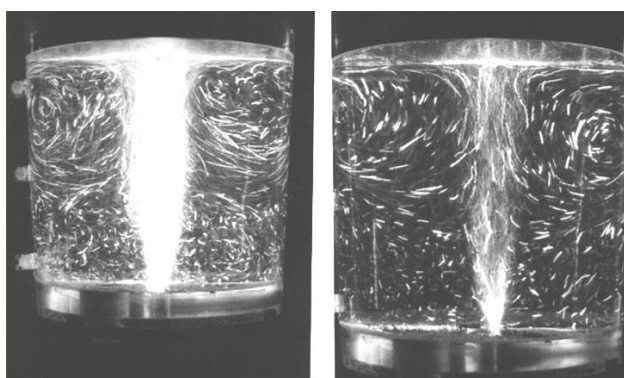
Metoda obarvené kapaliny: princip spočívá v injektáži vhodné barevné kapaliny do proudu vstupujícího do reaktoru (roztoky manganistanu draselného, inkoustu, tuše, malachitové zeleně, metylenové modři apod.). Nevýhodou metody obarvené kapaliny je nutnost výměny veškeré kapaliny v reaktoru po provedeném pokusu za novou a zcela čistou kapalinu, protože jinak by docházelo k ovlivnění a zkreslení výsledků dalšího experimentu.



Obrázek – Využití metody obarvené kapaliny při fyzikálním modelování proudění oceli v mezipánvi.

Metoda vláken: využívá vláknových sond, jež jsou tvořeny soustavou převážně vlněných nití, které jsou upevněny na kovovém rámečku. Nítě po vložení do proudu kapaliny jsou orientovány ve směru toku kapaliny. Lze určit vychýlení proudnic, oblasti zavíření, vratného proudění, laminárního a turbulentního proudění apod.

Metoda vznášejících se reflexních částic: spočívá v přidávání reflexních částic do proudu kapaliny v reaktoru. Částice musí mít stejnou hustotu jako kapalina, tehdy jsou unášeny proudem a jejich trajektorie je shodná s trajektorií proudu. Při fotografickém snímání určitou expoziční dobou vytvářejí tyto reflexní částice kontrastní stopy na filmu, z jejichž orientace a délky lze určit charakter pohybu a rychlostní pole. Pro osvětlení se většinou používá plošného světelného svazku vycházejícího ze štěrbinového světelného zdroje. Vhodným nasměrováním tohoto zdroje vytváříme tzv. **světelný řez** určitého místa modelu. Směr pozorování nebo snímání je přitom kolmý k rovině světelného svazku. Jako částice lze využít neexpandovaný polystyren, jehož hustotu lze doladit na hustotu kapaliny (většinou vody) mírným tepelným zpracováním při teplotách do 100°C.



Obrázek – Příklad využití metody vznášejících se reflexních částic při fyzikálním modelování proudění oceli v mezipánvi.

Odbarvovací nebo zbarvovací metody: jsou založeny na neutralizační reakci mezi slabými roztoky kyselin a zásad. Pro zviditelnění se přidávají barevné indikátory, které se změnou pH mění zabarvení. Vhodným barvivem je např. fenolftalein, který s kyselinou dává bezbarvý se zásadou

pak červenofialový roztok. Pomocí těchto indikátorů lze poměrně dobře vizualizovat průběh směšovacího pochodu v modelu reaktoru.

3.5 Kontrolní otázky

1. Popište obecný princip modelování procesů.
2. Co vyjadřuje kinematická podobnost?
3. Definujte kritérium podobnosti.
4. Uveďte příklady kritérií podobnosti.
5. Co vyjadřuje Reynoldsovo kritérium?
6. Co znamená základní rovnice?
7. Jaký má v teorii podobnosti dvou systémů význam kritériální rovnice?

3.6 Doporučená studijní literatura

- MICHALEK, K. *Využití fyzikálního a numerického modelování pro optimalizaci metalurgických procesů*. VŠB-TU Ostrava, 2001, 125 s.
- SATERNUS, M. *Physical modelling of phenomena occurring during refining process of Fe and Al solutions by means of inert gases*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2020, 139 s. ISBN 978-83-7880-730-8
- MAZUMDAR, D. a EVANS, J., W.: *Modeling of Steelmaking Processes*. CRC Press, 1 edition, 2009. 493 p. ISBN-13: 978-1420062434
- GRZYC, K., MICHALEK K., HUDZIECZEK Z. a TKADLEČKOVÁ M. PHYSICAL MODELLING OF FLOW PATTERN IN 5-STRAND ASYMMETRICAL TUNDISH WITH BAFFLES. In: *Conference Proceedings: 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON METALLURGY AND MATERIALS*. 1. Ostrava: TANGER, 2010, s. 42-46. ISBN 978-80-87294-17-8.

4 Kapitola: Realizace laboratorního experimentu zaměřeného na fyzikální modelování rafinace slitin kovů

4.1 Klíčová slova

fyzikální modelování, proudění, rafinace hliníkové taveniny, odplynění

4.2 Cíle kapitoly

Cílem kapitoly je seznámit studenta s fyzikálním modelem jednotky pro rafinaci hliníkové taveniny Foundry Degassing Unit (FDU), dostupným v laboratoři VŠTE v ČB. Popsat metodiku průběhu experimentů na tomto modelu a teoreticky studenty připravit na navazující laboratorní cvičení.

4.3 Úvod do kapitoly

V laboratoři Vysoké školy technické a ekonomické v Českých Budějovicích se nachází fyzikální model rafinace hliníkové slitiny. Hliníková slitina se v provozních podmínkách zpracovává na zařízení pro rafinaci hliníkové taveniny nazývaném FDU (Foundry Degassing Unit). Toto zařízení se skládá z rotoru, kterým je do taveniny přiváděn rafinační plyn (v provozních podmínkách dusík) a vlnolamu. Po zanoření rotoru do pánve s hliníkovou taveninou se rotor začne otáčet a současně dochází k dmýchání rafinačního plynu, který z taveniny odstraňuje škodlivý vodík (detailnější popis procesu je uveden v kapitole 2). Fyzikální model má tedy za úkol na základě teorie podobnosti v laboratorních podmínkách predikovat intenzitu odstranění vodíku z taveniny hliníku v reálném procesu.

4.4 Výklad

Jak bylo řečeno v předchozí kapitole, fyzikální modelování je založeno na teorii podobnosti dvou systémů. Předlohou pro fyzikální model pánve pro rafinaci taveniny byla provozní pánve, využívaná společností MOTOR JIKOV Slévárna a.s. Fyzikální model reaktoru včetně rotoru a vlnolamů byl vyroben v měřítku 1:1 k této pánvi, čímž se zajistila geometrická podobnost modelu a díla. K dispozici je také model pánve pro nízkotlaké lití uvedené společnosti.

Dynamická podobnost modelu a díla byla zajištěna nahrazením taveniny hliníkové slitiny vodou, která při pokojové teplotě vykazuje podobnou dynamickou viskozitu jako hliník. Škodlivý vodík byl pro potřeby fyzikálního modelování nahrazen kyslíkem, který má ve vodě při pokojové teplotě podobné vlastnosti jako vodík v tavenině hliníku. Obsah kyslíku ve vodě je monitorován dvěma optickými sondami, umístěnými v různých vzdálenostech od dna modelu. Sondy využívají jev luminiscence, jejíž intenzita je závislá na obsahu kyslíku ve vodě.

Cílem fyzikálního modelování je zachytit intenzitu odplynění a analyzovat pokles obsahu kyslíku ve vodě při změně různých parametrů (počet otáček, ponor rotoru, počet vlnolamů, tvar rotoru). Poznatky získané v rámci fyzikálního modelování sloužil k optimalizaci modelované technologie, tedy ke stanovení optimálních provozních podmínek rafinace hliníkové taveniny při změně definovaných parametrů procesu.

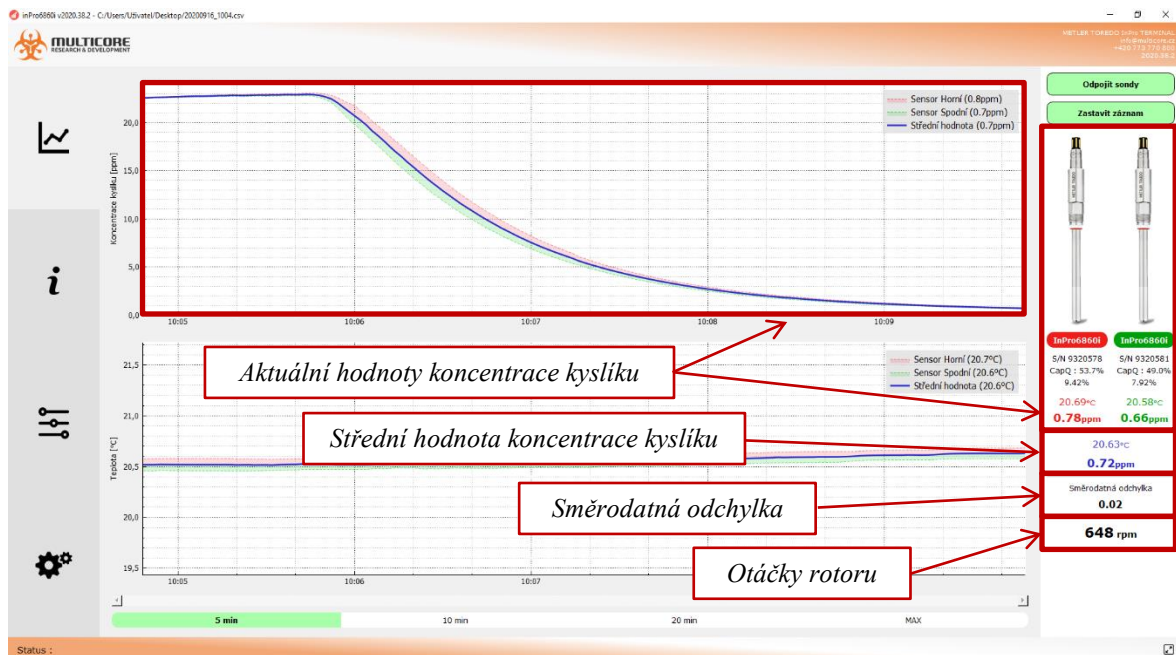


Obrázek – Kompletní sestava fyzikálního modelu jednotky FDU

Vlastní sestava fyzikálního modelu se skládá z následujících částí:

- *zdvíhací plošina pro umístění modelů pánví*
- *2x modely pánví z plexiskla v měřítku 1:1*
- *1x vnější čtvercová nádoba z plexiskla pro umístění modelů pánví (určeno pro audiovizuální interpretaci)*
- *nosná konstrukce s následujícími komponenty → motor pro pohon rotoru, univerzální spojka rotoru, grafitový rotor, 2x uchycení vlnolamů, rozvod plynu do rotoru, laserový otáčkoměr*
- *panel pro ovládání průtoků plynů → kyslík → naplynění, argon → rafinace*
- *2x sonda METTLER-TOLEDO InPro6860i/12/120/mA Ex pro měření obsahu kyslíku ve vodě*
- *řídící panel → skříň s ovládacím PC → regulace a řízení otáček rotoru + záznam průběhu odplynění*

Základní princip fyzikálního modelování odstranění rozpuštěného vodíku z hliníkové taveniny spočívá v odstraňování rozpuštěného kyslíku z modelové kapaliny (vody) za pomoci argonu. Pro kontinuální měření obsahu kyslíku byly vybrány optické sondy firmy METTLER-TOLEDO, dovolující měření obsahu rozpuštěného kyslíku do $26 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (26 ppm). Pro sondy bylo nutno vyvinout software, který splňuje požadavky na měření koncentrace kyslíku včetně komunikace přes PC, archivace dat a jejich hodnocení. Na obrázku je pro představu uvedeno rozhraní pro monitorování koncentrace kyslíku v průběhu fyzikálního modelování.



Obrázek – Ukázka SW rozhraní pro monitorování koncentrace kyslíku

Konstrukce modelu je velmi variabilní, umožňuje změnu několika parametrů, a tedy i definici celé řady modelovaných variant. Mezi tyto parametry patří:

- typ rotoru
- vzdálenost rotoru od dna pánve (pracovní výška)
- počet vlnolamů
- počet otáček
- průtok inertního plynu (Ar)

Pro fyzikální modelování odstranění vodíku z taveniny hliníku na jednotce FDU, byla vyvinuta metodika, která spočívá v následujících krocích:

- *ustavení nádoby do požadované polohy neboli pracovní výšky 160 mm → pro rotor XDR 190 od dna pánve za pomoci zdvižné plošiny*
- *naplnění modelu vodou, přičemž hladina vody dosahuje výšky vyznačené výšky*
- *nastavení požadovaného průtoku plynu dle požadavků dané varianty experimentu, při zachování tlaku plynu 0,4 bar*
- *sycení kyslíkem na stanovenou hodnotu při rychlosti otáčení rotoru 350 ot.min⁻¹ a tlaku plynu 0,4 bar. Následuje prodleva, během které dojde k doběhu koncentrace kyslíku, homogenizaci koncentrace kyslíku v objemu vody a její ustálení na požadované hodnotě 22 ppm. Během prodlevy je vypnuto otáčení rotoru*
- *nastavení požadovaných otáček pro danou variantu experimentu → v průběhu prodlevy*
- *spuštění měření → po skončení prodlevy současně spuštění dmýchání argonu, otáčení rotoru a záznamu dat z optických sond*
- *ukončení měření → vypnutí otáček a zastavení přívodu plynu, jakmile střední hodnota koncentrace kyslíku z měřicích sond dosáhne hodnoty 0,5 ppm*

4.5 Kontrolní otázky

1. K čemu slouží fyzikální model jednotky FDU?
2. Z jakých částí se skládá fyzikální model jednotky FDU?
3. Popište princip fyzikálního modelování rafinace hliníkové slitiny.
4. Jaké výsledky jsou při fyzikálním modelování rafinace hliníkové taveniny standardně získávány?

4.6 Doporučená studijní literatura

- SOCHA, L., GRYC K., SVIŽELOVÁ J., PRÁŠIL T., POSPÍŠIL R. a GRÁF M. ASSESSMENT OF ROTARY IMPELLER EFFICIENCY BY PHYSICAL MODELLING OF AN ALUMINUM REFINING PROCESS. In: *Conference Proceedings: 30th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials*. Ostrava: TANGER, 2021, s. 1160-1165. ISBN 978-80-87294-99-4. ISSN 2694-9296. DOI:10.37904/metal.2021.4258
- SOCHA, L., GRYC K., SVIŽELOVÁ J., PRÁŠIL T., POSPÍŠIL R. a GRÁF M. OPTIMIZATION OF OPERATING CONDITIONS OF ALUMINUM MELT REFINING PROCESS IN LABORATORY CONDITIONS. In: *Conference Proceedings: 30th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials*. Ostrava: TANGER, 2021, s. 1166-1172. ISBN 978-80-87294-99-4. ISSN 2694-9296. DOI: 10.37904/metal.2021.4257

5 Kapitola: Vyhodnocení získaných výsledků a jejich provozně technologická interpretace

5.1 Klíčová slova

fyzikální modelování, FDU, koncentrační křivky, hodnocení dat

5.2 Cíle kapitoly

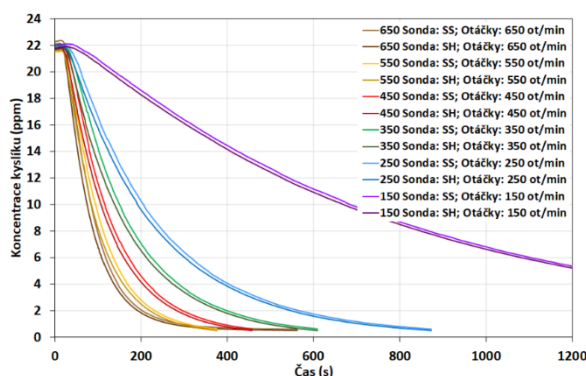
Tato kapitola popisuje typické výsledky získané v rámci experimentů na fyzikálním modelu jednotky FDU a poskytuje představu o způsobu jejich hodnocení.

5.3 Úvod do kapitoly

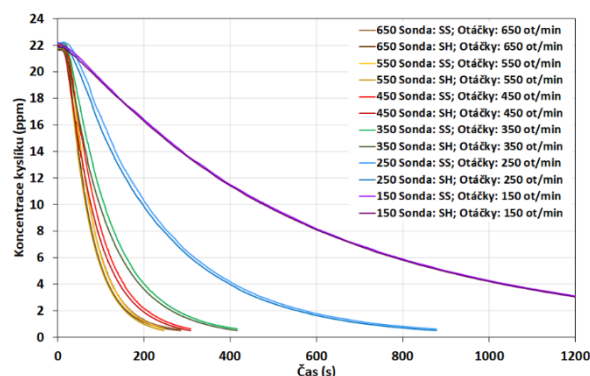
Jak bylo zmíněno výše, v průběhu fyzikálního modelování byla zaznamenána data, která lze interpretovat různými způsoby.

5.4 Výklad

Software pro monitorování úbytku koncentrace kyslíku z vody zaznamenává koncentraci kyslíku ve vodě v závislosti na čase. Po zanesení naměřených dat k jednotlivým variantám do grafu, lze vyhodnotit vlivy stěžejních parametrů na průběh procesu. Na obrázku jsou pro představu uvedeny grafy úbytku koncentrace kyslíku pro různé otáčky a průtoky plynu.



a) průtok: $12 \text{ Nl} \cdot \text{min}^{-1}$

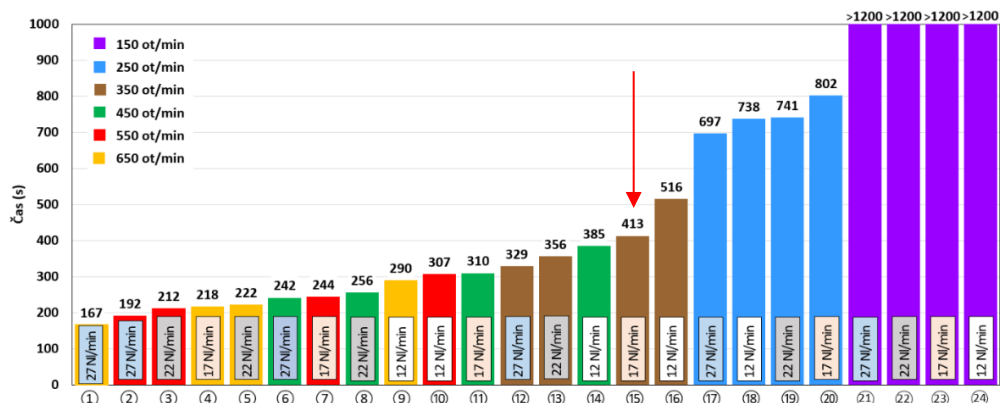


b) průtok: $22 \text{ Nl} \cdot \text{min}^{-1}$

Obrázek – ukázka grafického zpracování dat z fyzikálního modelu – koncentrační křivky

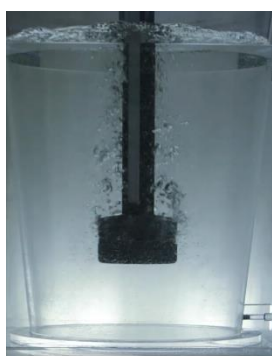
Tato data lze hodnotit také z jiného úhlu pohledu. Předchozí grafy poskytují převážně informace o trendech, které se projevují při změně konkrétního parametru (tedy např. zda se zkrátí čas odplynění při zvýšení otáček rotoru). Další možností je hodnocení dat z pohledu kvantitativní účinnosti jednotlivých variant dle doby snížení koncentrace kyslíku na požadovanou hodnotu, jak uvádí obrázek níže. Graf barevně rozlišuje varianty dle počtu otáček a uvnitř sloupců současně uvádí průtoky argonu definované pro daný experiment. Pro lepší přehlednost jsou varianty řazeny dle dosažených časů snížení koncentrace kyslíku na požadovanou hodnotu od nejkratšího (nejvíce

efektivní) po nejdelší (nejméně efektivní). V tomto grafu je jasně vidět, kde se nachází provozní varianta (označeno šipkou) a jaké změny je třeba provést, aby se zvýšila efektivita procesu.



Obrázek – Kvantitativní účinnosti jednotlivých variant dle doby snížení koncentrace kyslíku

Kromě grafického zpracování průběhu snižování koncentrace kyslíku během rafinace inertním plynem přiváděným přes rotor se v průběhu experimentu pořizují videosekvence a snímky, které dobře dokumentují proudění kapaliny a distribuci vznikajících bublin dmýchaného argonu pro jednotlivé varianty. Ukázka snímků charakteru vnitřního proudění, chování a distribuce vznikajících bublin dmýchaného argonu při průtoku argonu $17 \text{ Nl} \cdot \text{min}^{-1}$ jsou uvedeny obrázku.



a) otáčky: $150 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$



b) otáčky: $350 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$



c) otáčky: $650 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$

Obrázek – Ukázka charakteru vnitřního proudění a distribuce argonu při průtoku $17 \text{ Nl} \cdot \text{min}^{-1}$

5.5 Doporučená studijní literatura

- SOCHA, L., GRYC K., SVIŽELOVÁ J., PRÁŠIL T., POSPÍŠIL R. a GRÁF M. ASSESSMENT OF ROTARY IMPELLER EFFICIENCY BY PHYSICAL MODELLING OF AN ALUMINUM REFINING PROCESS. In: *Conference Proceedings: 30th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials*. Ostrava: TANGER, 2021, s. 1160-1165. ISBN 978-80-87294-99-4. ISSN 2694-9296. DOI:10.37904/metal.2021.4258
- SOCHA, L., GRYC K., SVIŽELOVÁ J., PRÁŠIL T., POSPÍŠIL R. a GRÁF M. OPTIMIZATION OF OPERATING CONDITIONS OF ALUMINUM MELT REFINING PROCESS IN LABORATORY CONDITIONS. In: *Conference Proceedings: 30th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials*. Ostrava: TANGER, 2021, s. 1166-1172. ISBN 978-80-87294-99-4. ISSN 2694-9296. DOI: 10.37904/metal.2021.4257

6 Kapitola: Úvod do metod numerického modelování procesu odlévání a tuhnutí

6.1 Klíčová slova

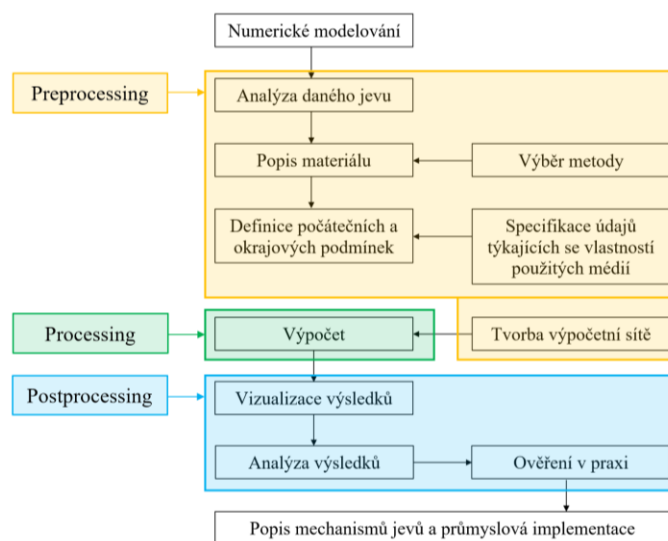
numerické modelování, numerické metody, výpočetní síť, MAGMASOFT®

6.2 Cíle kapitoly

Cílem kapitoly je studenta seznámit se základním principem numerického modelování, vysvětlit funkci numerických modelů a výpočetních sítí. V rámci kapitoly je také uveden výpočetní SW MAGMASOFT®, využívaný k simulacím metalurgických procesů, zejména odlévání odlitků.

6.3 Úvod do kapitoly

V jedné z předchozích kapitol bylo představeno fyzikální modelování. Druhým ze způsobů modelování je modelování numerické, jehož cílem je predikce daného děje na základě jeho fyzikální podstaty a matematického popisu. Prostřednictvím numerického modelování je možné řešit stejné procesy, jako na fyzikálních modelech. Výsledky získané pomocí těchto dvou metod nelze srovnávat, lze však říci, že se navzájem vhodně doplňují a přispívají k lepšímu pochopení modelovaného jevu. Každá z těchto metod má také svoje výhody a nevýhody. Fyzikální modelování je relativně levné, rychlé a při dodržení určitých pravidel poměrně přesné. Na druhou stranu je potřeba navrhnout a zkonstruovat nádobu modelu. Numerické modelování nevyžaduje fyzickou konstrukci modelu, avšak vyžaduje kvalitní výpočetní techniku a nezřídka dlouhý výpočetní čas, který lze zkrátit pouze na úkor přesnosti výsledků. I přesto se numerické modelování v současnosti těší velké oblibě. Tomuto faktu přispívá vývoj stále více sofistikovanějších programových produktů a neustálý vývoj výpočetní techniky, který bezesporu vede ke zkracování výpočetních časů při zachování kvality výsledků.



Obrázek – Schéma procesu numerického modelování

6.4 Výklad

V metalurgii je numerické modelování v dnešní době využíváno s velkými výhodami (oproti fyzikálnímu modelování). Vzhledem k extrémním podmínkám průběhu metalurgických dějů je často upřednostňováno před modelováním fyzikálním, při kterém je nutné pracovat s teorií podobnosti a nahrazovat modelovaná média modelovými, jež mají podobné vlastnosti, ovšem za jiných podmínek.

Metalurgické operace lze chápat jako soubor několika přírodních dějů, které současně vedou k požadovanému výsledku. Většinu elementárních přírodních dějů lze popsat pomocí základních řídicích rovnic. Tyto rovnice bývají implementovány v **numerických modelech**. V současnosti se numerické modelování provádí prostřednictvím výpočetních programů (např. MAGMASoft, ProCAST, COMSOL Multiphysics, ANSYS Fluent apod.), které jsou určeny pro konkrétní aplikace (např. proudění, tuhnutí, napěťové stavy v metalurgii, chemické reakce, crash testy, předpověď počasí, apod). Princip těchto programů je založen na řešení soustavy parciálních diferenciálních rovnic procesů pomocí **numerických metod**.

Numerické metody

Protože by přímé řešení parciálních diferenciálních rovnic bylo velice složité, používají se k řešení rovnic daných procesů tzv. **numerické metody**, jejichž cílem je najít diskrétní řešení v dostatečně malých podoblastech základní výpočetní domény. V oblasti numerických simulací jsou v současné době využívány tři základní metody:

- Metoda konečných prvků (Finite Element Method – **FEM**)
- Metoda konečných objemů (Finite Volume Method – **FVM**)
- Metoda konečných diferencí (Finite Differences Method – **FDM**)

Metoda konečných objemů: Starší z uvedených numerických metod je metoda konečných objemů. Metoda konečných objemů nejprve dělí výpočetní doménu do určitého počtu nepřekrývajících se konečných objemů pomocí výpočetní sítě. Řídicí rovnice je poté diskretizována a integrována přes každý konečný objem. Dalšími matematickými úpravami se získá soustava algebraických rovnic, která je jednodušší na řešení a jejímž výsledkem je hledané řešení.

Výpočet diskretizovaných řídicích rovnic většinou probíhá pouze v jednom bodu, který reprezentuje daný konečný objem. Tento bod bývá situován ve středu konečného objemu a obsahuje informaci o hodnotách skalárních veličin a složek rychlosti. To platí pro modelovaný případ po inicializaci ale také po skončení výpočtu. Vypočítané veličiny jsou situovány ve středech kontrolních objemů, odkud jsou přenášeny také na hranici objemu (stěny výpočetní buňky sítě). Hodnoty na hranicích objemu se získávají interpolací, k čemuž slouží různá interpolační schémata, integrovaná přímo ve výpočetních softwarech. Volbou vhodného interpolačního schématu je možné ovlivnit kvalitu a přesnost výsledků numerické simulace.

Definice metody konečných objemů přinesla určité výhody oproti starší a jednodušší metodě konečných diferencí. Nemusí se omezovat pouze na strukturovanou síť a je možné využívat různých tvarů kontrolních objemů. V porovnání s metodou konečných prvků jsou kladeny menší

požadavky na operační paměť. Výsledkem je kratší výpočetní čas pro náročnější úlohy. Metoda konečných objemů má ovšem i své nevýhody. Při použití nevhodného interpolačního schématu, případně v kombinaci s nevhodnou sítí, může dojít k výraznému zkreslení výsledků výpočtu (zvyšuje se numerická difuze).

Metoda konečných prvků (FEM): hojně využívána především k řešení úloh pružnosti a pevnosti, ovšem je možné s ní řešit také např. proudění a tuhnutí kovů, díky čemuž je využitelná také v metalurgii. V současné době se těší největší popularitě a je obsažena ve spoustě sofistikovaných simulačních programů.

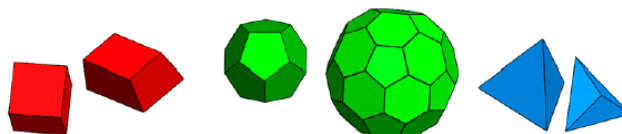
Cílem výpočtu metodou konečných prvků je nalezení neznámých funkcí, které představují řešení daného problému. Podobně jako u předchozí metody se v prvním kroku provádí rozdělení objemu do konečného počtu prvků. Na základě slabé matematické formulace jsou poté sestaveny aproximační funkce – lineární kombinace předem zvolených (tzv. bazových) funkcí a neznámých parametrů, které jsou předmětem výpočtu. Dosazováním a vylučováním je postupně dosaženo pouze jednoho typu neznámé (např. teploty, posuvy v mechanice apod.) Neznámé funkce hledaných veličin se většinou aproximují lineární nebo kvadratickou funkcí, což je možné díky rozdělení výpočetní domény na jednotlivé prvky. Pomocí aproximačních funkcí se odhaduje sledovaný parametr v uzlech každého prvku, z kterého se vypočtou další požadované veličiny po aplikaci okrajových podmínek. FEM se obecně snaží nalézt soustavu lineárních algebraických rovnic, které jsou snadno řešitelné numericky a které vedou k výsledku s co nejmenší chybou.

Z principu metody konečných prvků je zřejmý význam výpočetní sítě. Je jasné, že čím menší bude prvek výpočetní sítě, tím bude aproximační funkce přesnější. Uživatel může volit velikost konečného prvku, a tedy i rychlost výpočtu a přesnost řešení. Nevýhodou této metody je časová náročnost řešení, která roste s rostoucím počtem elementů výpočetní sítě.

Typy výpočetních sítí

Aby mohla být aplikována numerická metoda, je potřeba výpočetní doménu rozčlenit na menší objemové úseky (budeme-li uvažovat o třírozměrných úlohách) a v těchto dostatečně malých podoblastech základní geometrie hledat diskrétní řešení pomocí systému tzv. diferenčních (algebraických) rovnic. Výpočet hledaných veličin probíhá v cyklech nazývaných iterace. Výsledkem řešení je hodnota hledané veličiny v diskrétním bodě tzv. výpočetní sítě. Rozdíl mezi řešeními diferenciálních a diferenčních rovnic je pak definován jako diskretizační chyba.

Nezávisle na zvolené numerické metodě se proto v první etapě numerických simulací provádí **diskretizace domény**, tzn. zmíněné pokrytí geometrie výpočetní sítě a její rozdělení na diskrétní objemy (nahrazení kontinua diskrétními body). Simulační programy jsou schopny pracovat s různými typy sítí, složenými z různých typů elementů. Moderní výpočetní systémy již nejsou limitovány nutností použití konkrétního typu výpočetního elementu a je tedy možné pracovat také s kombinovanými sítěmi, složenými z různých typů výpočetních elementů. Základní typy elementů jsou zobrazeny na obrázku.

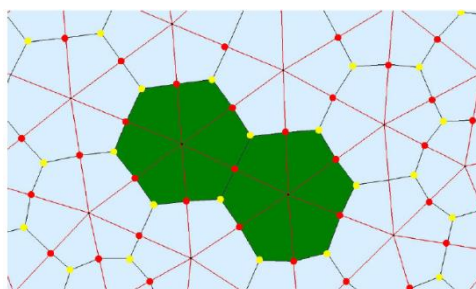


Obrázek – Typy výpočetních elementů (zleva – hexaedrické, polyedrické, tetraedrické)

Použití **hexaedrických sítí** je v CFD analýzách vhodné při simulaci usměrněného proudění. Jestliže proud směřuje kolmo na stěnu buňky, síť se vyznačuje nízkou numerickou difuzí. V případě, že proud není kolmý ke stěnám buňky, numerická difuze se zvyšuje. Na složitých geometriích je navíc tvorba hexaedrické sítě, která by dokonale pokryla její tvar, komplikovaná.

Jisté řešení poskytuje **tetraedrická síť**, která je schopna komplexní geometrii lépe vyplnit. Tetraedrické elementy však nemohou být příliš deformovány, proto je potřeba pro pokrytí geometrie a dosažení požadované kvality sítě a přesnosti výpočtu jejich výrazně vyšší počet. Nevýhodou je také obtížnější zachycení gradientů veličin vlivem vzájemné polohy výpočetních uzlů, které může působit obtíže spojené s konvergencí výpočtu.

Ve snaze vyvarovat se nevýhodám předchozích dvou typů sítí byla vyvinuta **síť polyedrická**, vyznačující se nízkou numerickou difuzí a schopností vyplnit i složitější geometrie. Polyedrické elementy jsou také méně citlivé na deformaci, což vede k lepší stabilitě numerického modelu. V některých případech může polyedrická síť dosáhnout vyšší přesnosti než hexaedrická, a to díky většímu počtu sousedních elementů. Dochází tak k výměně hmoty přes více ploch, čímž se snižuje účinek numerické difuze, způsobený prouděním, které nesměruje kolmo na jejich stěnu. Této skutečnosti se využívá u případů, kdy např. nelze identifikovat převládající směr proudění. Tvorba polyedrické sítě spočívá v rozkladu tetraedrických buněk na dílčí objemy a jejich složení na výsledné buňky polyedrické, jak je naznačeno na obrázku. Výsledkem je výrazně nižší počet buněk polyedrické sítě ve srovnání se sítí tetraedrickou.



Obrázek – Princip tvorby polyedrické sítě

Využití numerických simulací v procesu výroby odlitků

V průběhu výroby odlitků zpravidla dochází k situacím, které vedou ke vzniku vad v těchto odlitcích. Je třeba mít na paměti, že vady nemusí mít zákonitě fatální vliv na kvalitu odlitku. Pokud však opakovaně vzniká vada, která se neslučuje s kvalitativními požadavky zákazníka, je třeba tuto situaci řešit. Vhodným nástrojem jsou v tomto případě numerické simulace, neboť je jejich prostřednictvím možné simulovat různé kombinace procesních parametrů bez potřeby výroby odlitku.

Abychom byli schopni vyřešit problém, je třeba najít příčinu. Strukturovaný přístup umožňuje efektivnější analýzu a odstranění hlavních příčin problému. Tento přístup pomůže při cíleném popisu problémů, které mají být vyřešeny, a při definování vhodných řešení a opatření.

Nejprve vyvstává následující otázka: „Jaké jsou cíle určené uživatelem/slévárnou pro simulace? V této souvislosti se v zásadě rozlišuje mezi dvěma různými charakteristikami. Na jedné straně je třeba zlepšit kvalitu výrobku; na druhé straně je třeba zefektivnit výrobní procesy. Cílem je vytvoření bezporézního odlitku, který by měl být rozměrově vyhovující s mechanickými vlastnostmi shodnými s požadavky.

To vše by mělo být samozřejmě dosaženo při nízkých nákladech. To vyžaduje robustní návrh procesu. Tento robustní návrh procesu může vytvořit uživatel simulačního softwaru. Za tímto účelem se vezme v úvahu nejen individuální provozní bod, ale vypočítá se několik variant, například s různými teplotami. Na základě simulace je možné předdefinovat určitý toleranční rozsah pro lící teploty ve slévárně. Např. „Pokud lící teplota neklesne pod teplotu X, bude to mít za následek výrobu odlitků s povrchovými vadami.“ Takový přístup umožňuje snížení zmetkovitostí i nákladů. Virtuálními experimenty se tedy může dosáhnout stanovených cílů a realizovat neustálá zlepšení definováním a implementací bezpečných opatření bez ekonomických rizik. V podmínkách českých sléváren se pro zmíněný účel využívá atraktivní profesionální výpočetní software MAGMASOFT®.

MAGMASOFT® je komplexní a efektivní nástroj pro optimalizaci kvality odlitků, optimalizaci procesních podmínek a snížení výrobních nákladů. V důsledku toho lze s využitím metodiky virtuálního návrhu experimentů a autonomní optimalizace stanovit robustní procesní parametry a optimalizované technologické návrhy odlitků pro všechny odlévané materiály a procesy včetně tepelného zpracování a metalurgie taveniny. Při práci s tímto programem je uživatel veden pomocí následujících šesti kroků (azv. MAGMA APPROACH):

1. Stanovení cílů

Prvním krokem MAGMA APPROACH je definice cíle. Cíle, které budou použity k určení nejlepších možných návrhů nebo parametrů procesu, mohou být kvalitativní, nákladové nebo výrobně orientované. To může často zahrnovat vyvažování konkurenčních cílů, jako je snížení množství porezity při dosažení co nejmenšího rozměru nálitků.

2. Stanovení proměnných

Po určení klíčových cílů je dalším krokem rozhodnutí, které **proměnné** definovat ve snaze dosáhnout stanovených cílů. Proměnné mohou zahrnovat změny libovolného rozměru odlitku nebo nástroje, procesních parametrů nebo materiálů.

3. Specifikace kritérií

Software umožňuje specifikaci jednoho nebo více **kritérií kvality** nebo parametrů souvisejících s náklady, aby kvantitativně zhodnotil výsledky experimentů.

4. Efektivní řešení daného problému

MAGMASOFT® disponuje mnoha různými funkcemi, které minimalizují výpočetní úsilí a časy pro sestavení projektu. Plně automatizovaná smyčka pro nastavení simulace v MAGMASOFT® podstatně snižuje inženýrský čas.

5. Volba vhodné metody

Autonomous Engineering s MAGMASOFT® nabízí různé strategie pro dosažení definovaných cílů. Mezi tyto strategie patří provozování individuálních simulací, nastavení virtuálního návrhu experimentů pro testování různých proměnných, které jsou předmětem zájmu, nebo provedení komplexní autonomní optimalizace, která využívá genetické algoritmy.

6. Kontrola zlepšení

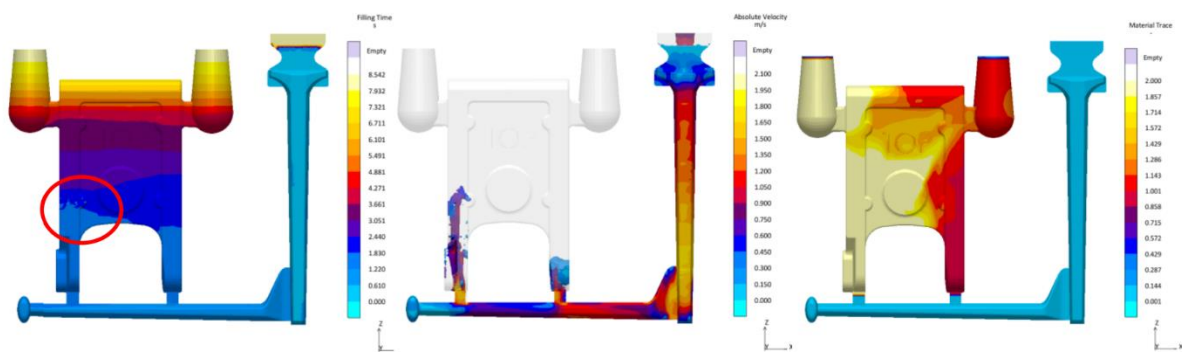
Posledním krokem je podniknout kroky založené na informacích, které MAGMASOFT® poskytl. To může zahrnovat modifikaci nástrojů/forem založené na optimalizovaných technologiích nálitkování a vtokování, vzdělávání různých pracovníků o významu různých procesních proměnných, které se ukázaly být kritické, nebo definování rozsahů pro různé procesní proměnné.

Ukázky použití MAGMASOFT® v praxi

Zlepšení charakteru plnění formy

V této kapitole jsou ukázány některé příklady použití MAGMASOFT® včetně MAGMA APPROACH s jeho šesti otázkami pro práci na různých úkolech. Nejprve je představen projekt s reálným odlitkem. Cílem bylo zlepšení průběhu lití. Během výroby odlitku dochází k neustálému výskytu vad stejného charakteru. Počet zmetků převyšuje počet odlitků, které projdou kontrolou kvality. Když se podíváte na simulaci, rychle zjistíte příčinu problému. Na obrázku můžete vidět rozdílné výsledky lití, které vykazují vznik vad.

Vlevo je zobrazen výsledek „Filling Time“ udávající, po jaké době je oblast poprvé zaplněná. Doba plnění je uvedena v sekundách. Zde již můžete vidět, že zakroužkovaná oblast za zářezem vlevo je zaplněná dříve. Toto zjištění je dále podporováno středovým obrázkem, který ukazuje „Absolute Velocity“. Výsledek „Absolute Velocity“ označuje rychlost v určitém čase během plnění. Jako první začíná plnit s vysokou rychlostí kovu levý zářez. To má za následek více kovu vstupujícího do dutiny skrz tento zářez. Aby se zajistilo klidné a rovnoměrné plnění formy, mělo by být množství taveniny vstupující do dutiny přibližně stejné pro oba zářezy.



Obrázek – Výsledky plnění: „Filling Time“, „Absolute Velocity“ a „Material Trace“

Úkolem bylo dosažení tohoto cíle. Za tímto účelem musíte zvážit následující aspekty:

- Jak mohu dosáhnout lepšího chování taveniny při plnění?
- Jak zabráním rozstříknutí taveniny v levém zářezu?
- Jak mohu dosáhnout klidného plnění formy.

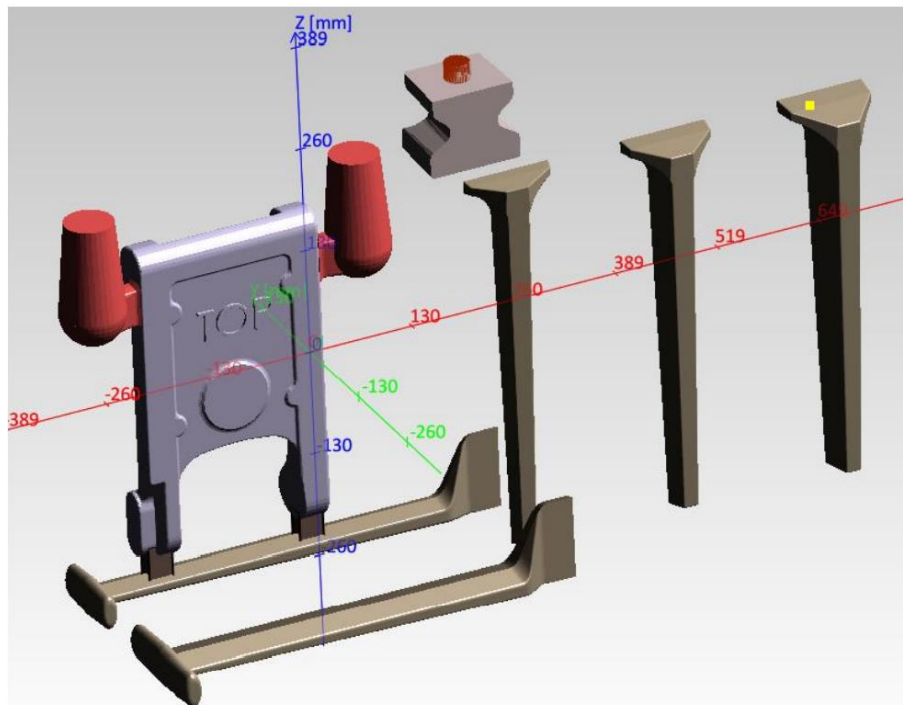
Poté je potřeba přemýšlet o tom, co se má v systému změnit, abyste dosáhli těchto požadavků. Existují nějaké geometrické změny, které byste mohli provést při lití? Můžete upravit vtokový kanálek? Můžete změnit rychlost taveniny tak, že výsledkem bude klidnější plnění formy? V tomto příkladu nelze v odlitku provádět žádné další geometrické změny. Vtokový kanálek však změnit lze. Je poměrně tenký a může být rozšířen a zvětšen.

Musíte prozkoumat, jaké změny jsou ve vašem systému možné a které stupně volnosti je možné definovat. Je možné že, v některých případech budou změny, které můžete provést, pouze procesní nikoli geometrické.

Pokud jste definovali stupně volnosti, musíte přemýšlet o tom, jak měřit úspěšnost dosažení cílů. Pro vyhodnocení změn potřebujete výsledky z programu MAGMASOFT®. V tomto příkladu to jsou tyto výsledky: rychlost plnění, směr toku taveniny a volný povrch taveniny.

V dalším kroku je nutné zvážit, jak nastavit odpovídající testovací pole. Jak nastavíte tento experiment? Stačí počítat simulaci plnění nebo je nutná také simulace tuhnutí? Pokrývá výpočet pouze jedinou variantu nebo všechny varianty návrhu experimentů (DoE)?

Tyto jednotlivé body jsou uvedeny v tabulce. Nyní zvolte stupně volnosti, na základě, kterých chcete nastavit návrh experimentů (DoE). Pokuste se nastavit svůj prostor pro experimenty co nejmenší. Proto si pečlivě zvolte stupně volnosti a nejprve prokombinujte pouze několik stupňů volnosti. To vám umožní provést úplný návrh experimentů („full factorial desing of experiments“). Tímto způsobem systematicky dosahujete výsledků a neztrácíte se žádné informace.




Obrázek – Variace vtokovky se třemi různými licími kůly a dvěma různými kanálky

Nejprve se změní geometrie rozváděcího kanálu. Data CAD byla odpovídajícím způsobem připravena a průřez kanálu byl změněn. Takto získáme tři různé velikosti licího kůly a dvě různé rozváděcího kanálu. Tyto geometrie jsou načteny do geometrické perspektivy a umístěny do makra „Geometry Exchange“, což má za následek vygenerování šesti různých variant, které lze vypočítat.

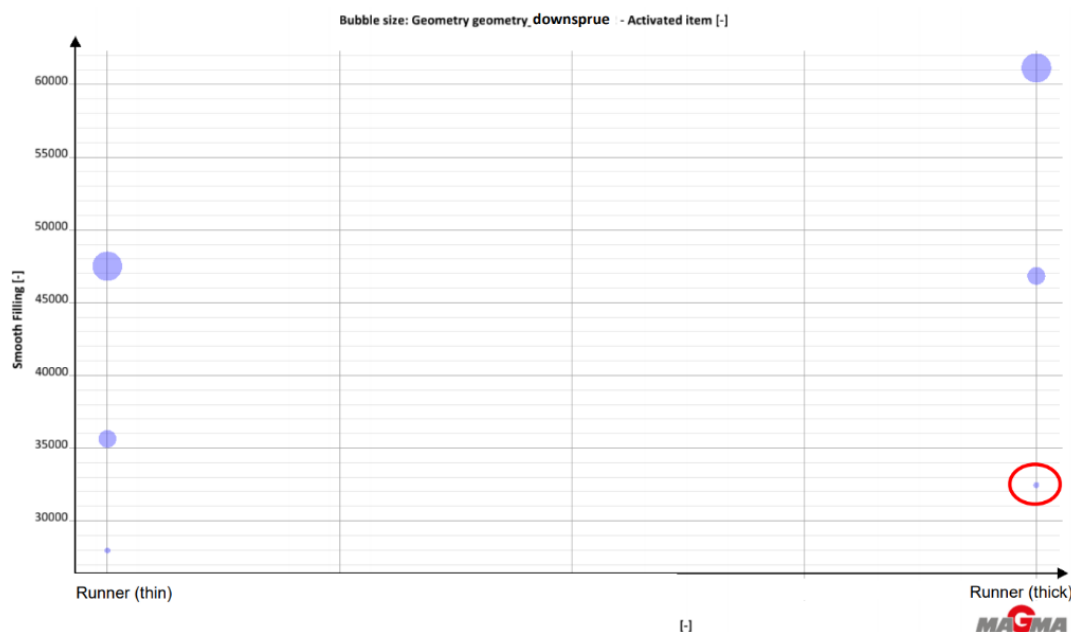
Rank	Design	Filling Time Max (-)	Reduce Gate Velocities (-)	Smooth Filling (-)
Rank 1	Design 2	7.83	2.5	32462.11
Rank 2	Design 1	8.45	2.31	27977.65
Rank 3	Design 3	7.81	2.59	35640.94
Rank 4	Design 6	7.14	2.49	61145.68
Rank 5	Design 4	7.03	2.82	46845.11
Rank 6	Design 5	7.84	2.95	47513.43

Obrázek – Přehled variant se třemi různými cíli

Po výpočtu můžete varianty vyhodnotit. Za tímto účelem přejděte do „Assesment Perspective“ a vyhodnoťte různé varianty pomocí různých diagramů. Na obrázku 182 můžete vidět šest různých variant seřazených podle tří cílů, jmenovitě „Filling Time Max.“ (maximální doba plnění), „Reduce Gate Velocities“ (sniž rychlost v zářezech) a „Smooth Filling“ (klidné plnění). Doporučujeme vám vždy zvážit vícero cílů. V tomto příkladu chcete dosáhnout klidného plnění formy, je však třeba zvážit i další kritéria. Dosažení klidného plnění formy je zbytečné, pokud je proces plnění tak pomalý, že je doba licího cyklu zbytečně dlouhá. Proto je důležité zvážit několik cílů. V tomto příkladu kromě výsledku „Smooth Filling“ zohledňujeme také „Filling Time Max.“ abychom viděli, jak moc je ovlivněna doba cyklu.

Když poprvé vstoupíme do „Assesment Perspective“. Mají všechny cíle stejnou váhu. Nejlepší kompromis variant pro všechny cíle je tedy na prvním místě. V případě, že chcete jednotlivé cíle považovat jinak, v pravém horním rohu nad tabulkou najdete ikonu (). Zde posuvníky umožňují změnit váhu jednotlivých cílů.

Na následujícím obrázku je vidět „Scatter Chart“ (bodový diagram), osa Y představuje „Smooth Filling“, zatímco osa X představuje „Geometry exchange“ rozváděcího kanálu. Různé velikosti bublin představují různé licí kůly. Malá bublina představuje malý licí kůl, střední bublina střední licí kůl atd.



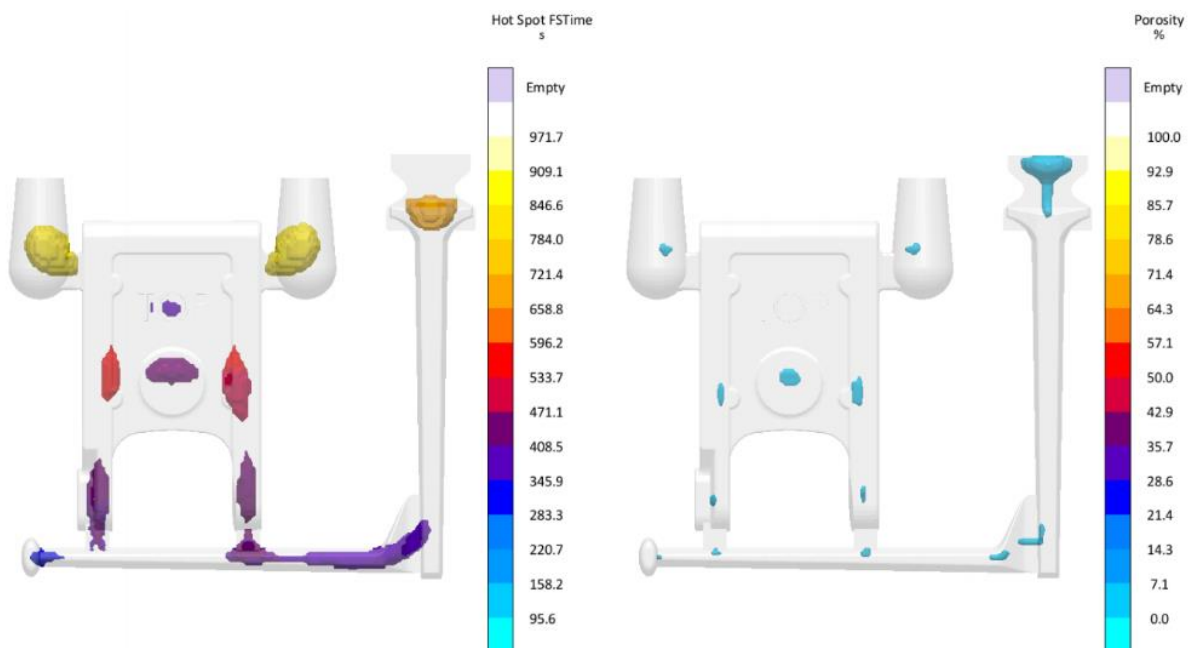
Obrázek – Bodový diagram

Můžete jasně vidět, že nejlepšího výsledku pro „Smooth Filling“ je dosaženo pomocí tenkého kanálku a malého licího kůlu. Čím tenčí a menší je kanálek, tím lepší je výsledek „Smooth Filling“. Po vyhodnocení návrhu experimentů se rozhodnete pro jednu variantu a dále ji podrobíte

zkoumání, pokud je to potřeba. V tomto příkladu byla vybrána varianta č. 2 (v diagramu zakroužkovaná červeně), jelikož je nejlepším kompromisem mezi klidným plněním („Smooth filling“) a zkrácením doby cyklu („Filling Time Max.“).

Varianta č.2 kombinuje silnější rozváděcí kanál a malý licí kůl. Tato varianta umožňuje dosažení dobrého výsledku „Smooth Filling“ a kratší doby plnění ve srovnání s variantou č.1, která by byla jinak variantou s nejlepším výsledkem „Smooth Filling“.

Nakonec se pro variantu č. 2 provede úplná simulace, aby se také vyhodnotily výsledky tuhnutí, a pokud je to nutné, provede se další návrh experimentů se zaměřením na tuhnutí. Na následujícím obrázku můžete vidět výsledky tuhnutí „Hot Spot FSTime“ a „Porosity“ pro variantu č. 2. Jako další krok v této souvislosti byste mohli analyzovat, jak snížit porozitu v odlitku. Za tímto účelem byste mohli měnit pozici a velikost nálitku.



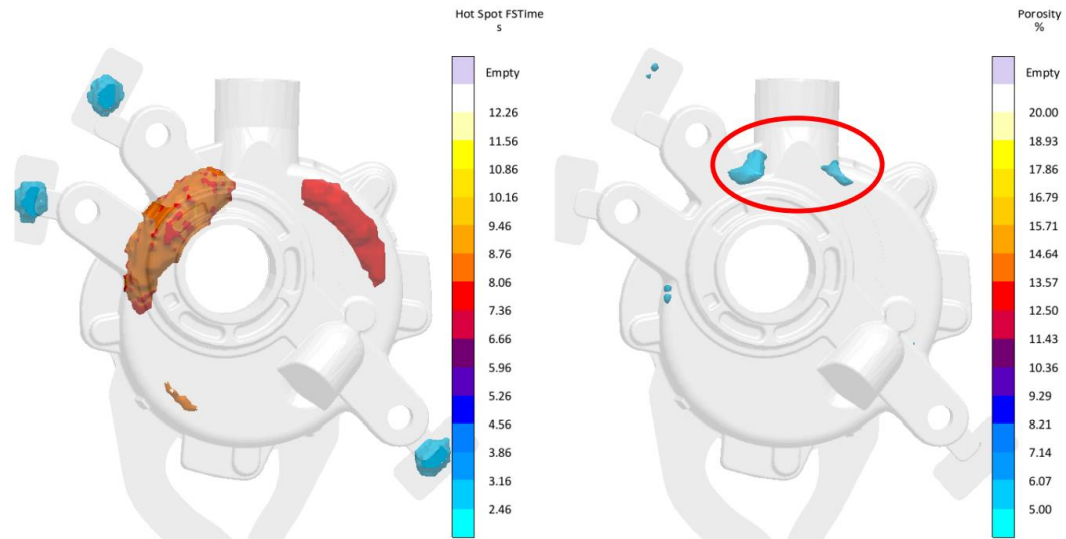
Obrázek – Výsledky tuhnutí „Hot Spot“ a „Porosity“

Další analýza tohoto odlitku související s plněním by například mohla zahrnovat variantu zaměřenou na zářezy. Dalším možným aspektem, který by mohl být změněn, by mohla být šířka zářezů. Pokud by už nebyli možné geometrické změny, mohli byste upravit vzdálenost licí výšky. Chcete-li zjistit, jak robustní je výroba odlitku, můžete nastavit návrh experimentů s různými teplotami lití. Během procesu lití, může kdykoli dojít k teplotním změnám. Takový návrh experimentů vám pak umožní, aby bylo jasně vidět, jak se odlitek chová, když dojde k výkyvům licí teploty.

Je důležité, abyste svoji úlohu rozdělili na menší úkoly. Například, pokud máte dva cíle jako „Smooth filling of the mold“ a „reduce the porosity in the casting“ nezapomeňte nejprve analyzovat pouze jeden cíl a podle toho definovat další proměnné. Na tomto základě vytvořit další návrh experimentů pro další cíl. Jinak návrhy experimentů budou tak velké a matoucí, že ztratíte přehled o výsledcích a nevidíte, které proměnné mají vliv na vaše hodnotící kritéria kvality a do jaké míry.

Zlepšení průběhu tuhnutí

Během výroby skříně čerpadla se opakovaně objevuje vysoká zmetkovitost odlitků. Na rentgenových snímcích se nachází dvě vnitřní staženiny v kritické oblasti, ve které následně dochází k vrtání děr. Následující obrázek ukazuje tyto dvě staženiny (vpravo) a také teplotní uzly (vlevo). Cílem je minimalizovat nebo ideálně eliminovat tyto staženiny.



Obrázek – „Hot Spot“ a „Porosity“ v odlitku

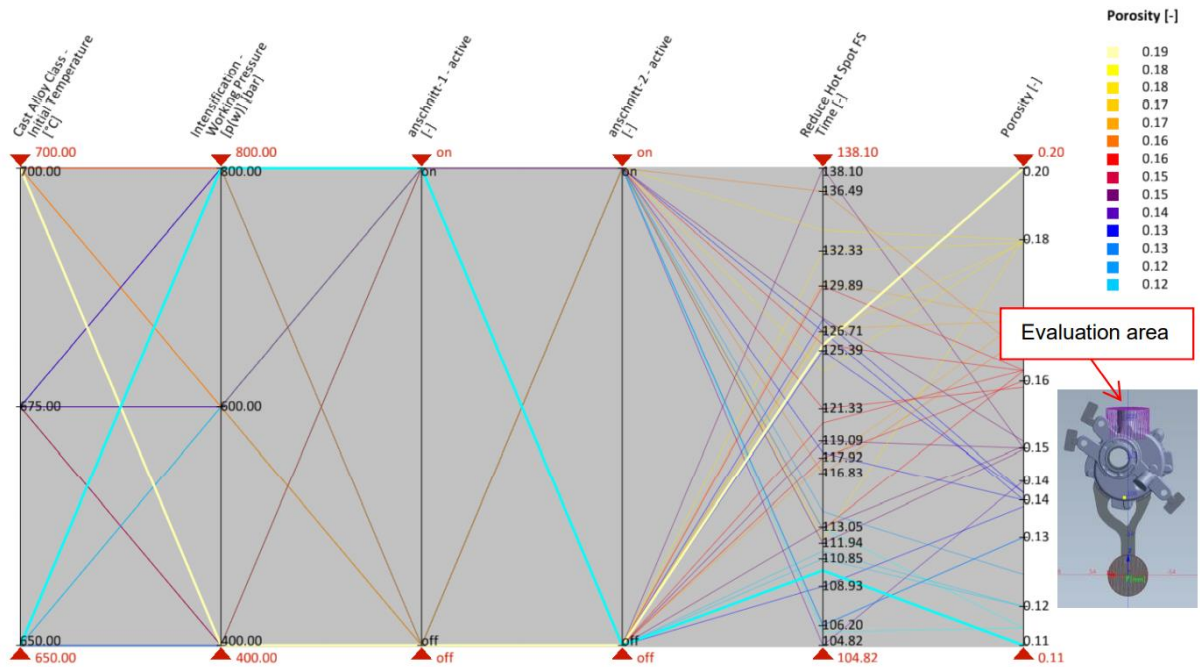
S MAGMA APPROACH můžete nyní vytvořit přehled, který pomůže vyřešit tento problém systematicky. Cíl spočívá ve výrobě celistvého odlitku s minimem vad. To znamená, že je nutný robustní procesní postup. Zaprvé, lící teplota, tloušťka zářezu, vstřelovací tlak a dotlak jsou definovány jako proměnné. Přitom se však opomíjí změna rozměru pístu, protože toto opatření by bylo velmi drahé.

Definujeme tedy „full factorial DoE“ (návrh experimentů) se třemi různými teplotami lití, dvěma různými tloušťkami zářezu a vysoký a nízkým vstřelovacím tlakem. Ve výsledku bylo vypočteno 36 různých variant bez plnění a poté vyhodnoceno na základě kvalitativních kritérií „Hot Spot FSTime“ a „Porosity“. Pro vyhodnocení porozity, byla definována hodnoticí oblast („Evaluation area“) nacházející se v kritické oblasti odlitku.

Tabulka – Zlepšení průběhu tuhnutí s pomocí MAGMA APPROACH

Objective	Degrees of freedom	Variables	Experimental set-up	Method	Measures
Sound casting	Pouring temperature	Hot spots	Only solidification	Full factorial design of experiments	
	Gate thickness	Porosity			
	Intensification pressure	Squeezer			

Obrázek ukazuje spojnicový diagram pro toto „DoE“. První osa představuje lící teplotu od 650 do 700 °C. Druhá osa ukazuje tlak intenzifikace v rozmezí od 400 do 800 bar. Osy 3 a 4 ukazují, zda byla nebo nebyla zvětšena tloušťka zářezu, „on“ znamená, že tloušťka zářezu byla zvětšena o 1 mm.



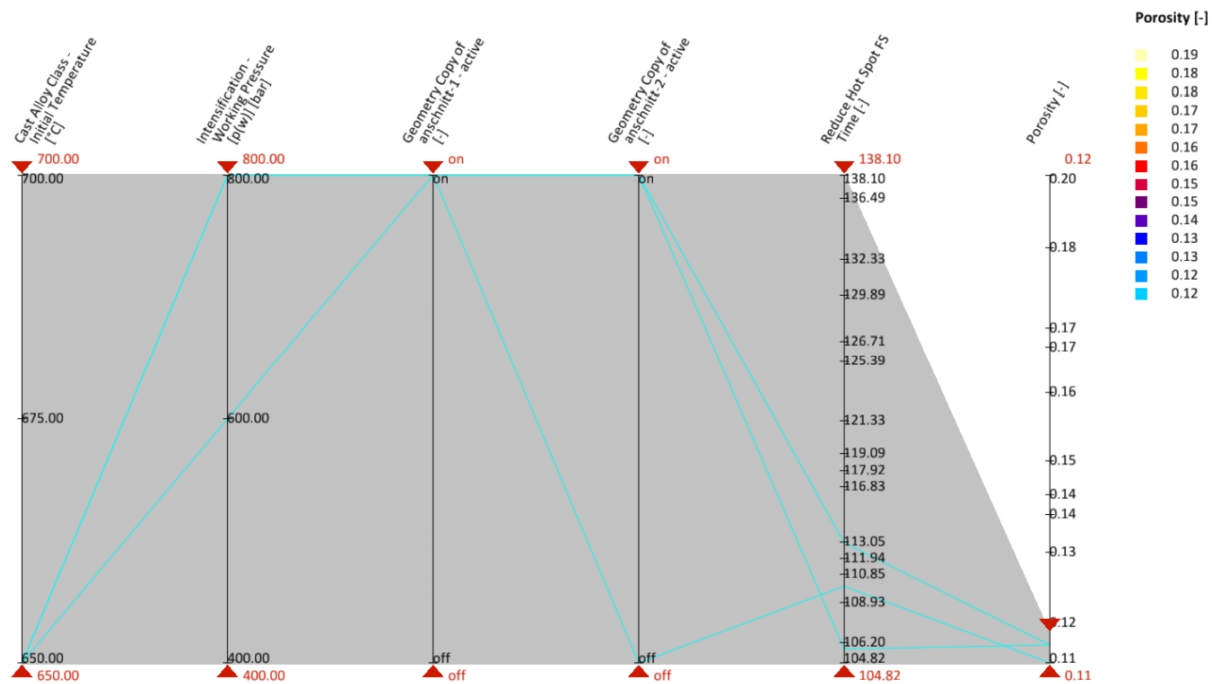
Obrázek – Spojnicový diagram

Poslední dvě osy představují cíle pro „Hot Spot FS Time“ a „Porosity“. Na tomto obrázku byly vybrány dvě spojnicové čáry, a proto se zobrazují tučně. Světle modrá čára označuje variantu poskytující nejlepší výsledek porezity (nejmenší staženina), zatímco žlutá čára ukazuje variantu s nejhorším výsledkem porezity. Díky tomu můžete na první pohled vidět, ze které kombinace parametrů je složena odpovídající varianta:

- Nejlepší výsledek porezity, což znamená výsledek s nejmenší staženinou (modrý), je dosažen s lící teplotou 650 °C a intenzifikačním tlakem 800 bar. Kromě toho se pro tuto variantu zvětšuje tloušťka prvního zářezu, zatímco tloušťka druhého zářezu je zachována.
- Nejhorší varianta (žlutá čára) má následující kombinaci parametrů: lící teplota 700 °C, intenzifikační tlak 400 bar a dva tenké zářezy.

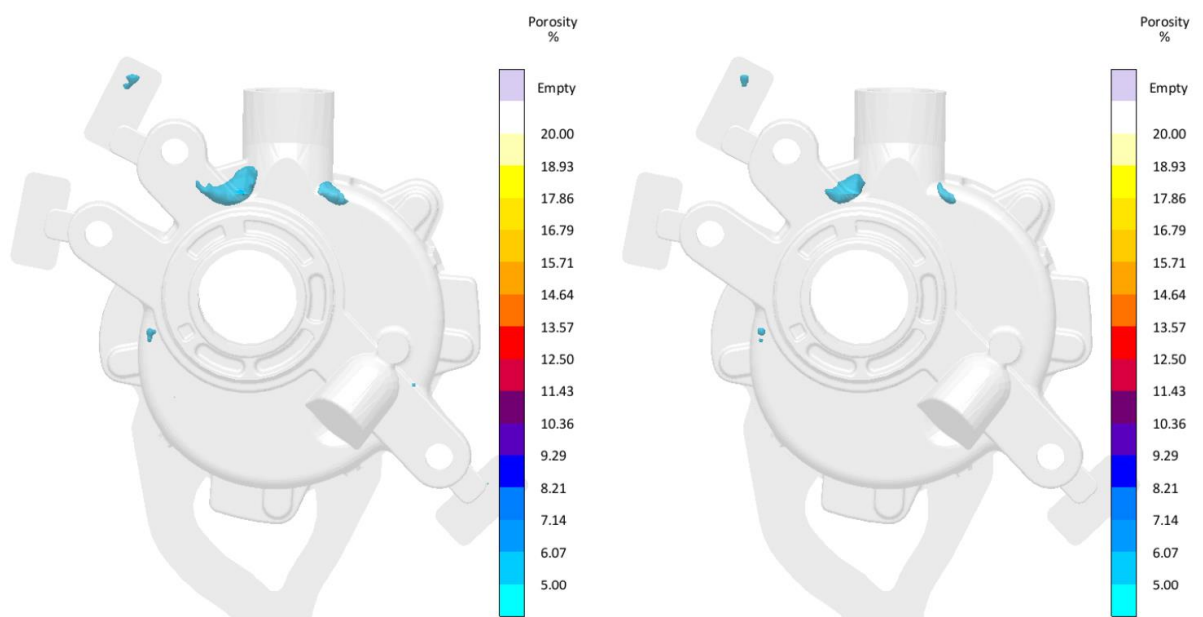
Nejhorší návrh je podobný původnímu návrhu. To znamená, že s parametry, které byly odlišné, lze návrh zlepšit.

Nyní můžete také zmenšit rozsah zobrazených variant přesunutím červených trojúhelníků na osách diagramu. Pokud posunete červený trojúhelník poslední osy dolů, zobrazí se pouze ty varianty s nejnižší porezitou. To je znázorněno na obrázku. Toto zobrazení umožňuje podrobně vidět, které parametry mají největší vliv na váš cíl. Nejlepší výsledky z hlediska porezity jsou dosaženy s lící teplotou 650 °C, intenzifikačním tlakem mezi 600 a 800 bar a zvětšením tloušťky alespoň jednoho ze zářezů.



Obrázek – Spojnicový diagram, s nastaveným filtrem pouze na nejlepší výsledky

To vám umožní zjistit, zda jste definovali robustní proces, a také identifikovat podmínky, která vám brání v dosahování dobrých výsledků. Nicméně, výsledky jsou zatím neuspokojivé. Obrázek ukazuje distribuci pórovitosti pro nejhorší design (vlevo) i pro nejlepší design (vpravo).


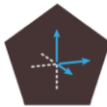






Obrázek – Výsledky porezity pro nejhorší návrh (vlevo) a pro nejlepší návrh (vpravo)

V případě nejlepšího návrhu se staženiny celkově zmenšily, ale bohužel levá staženina je stále velmi blízko vrtané díry a je velmi pravděpodobné, že po odvrtání díry bude na povrchu odlitku. Za prvé, výsledky jsou specifikovány následovně:

- Teplota lití je nastavena na 650 ° C
- Je definován intenzifikační tlak na 800 bar.
- Tloušťka zářezu je zvětšena u všech zářezů.

Tabulka – Měření pro zlepšení průběhu tuhnutí

Objective	Degrees of freedom	Variables	Experimental set-up	Method	Measures
					
Sound casting	Pouring temperature	Hot spots	Only solidification	Full factorial design of experiments	Define parameters for the simulation
	Gate thickness	Porosity			Increase the gate thickness
	Intensification pressure				Further investigations with a squeezer
	Squeezer				

S tímto nastavením parametrů jsou nyní prováděny další analýzy, jak je uvedeno v tabulce. Například, jako další krok, je přidán squeezer a pomocí DoE je identifikován vhodný časový okamžik pro uvolnění pístu. Poté je třeba výsledky ověřit. To znamená, že jakmile definujete určité parametry, nastavíte kompletní simulaci pro plnění a tuhnutí na základě těchto nastavení. To vám umožní vidět, jak vaše nastavení ovlivňuje celý proces. V tomto příkladu je tloušťka zářezu zvětšena u obou zářezů, což má silný vliv na proces plnění. Proto, nejprve musíte analyzovat tento krok v nové verzi aktuálního projektu.

6.5 Kontrolní otázky

1. Uveďte výhody numerického modelování.
2. Jaký je princip numerického modelování
3. Z jakých tří fází sestává proces numerického modelování?
4. Co je cílem numerických metod?
5. Jaké numerické metody znáte?
6. Jaké znáte typy výpočetních sítí?
7. K čemu slouží výpočetní síť v procesu numerického modelování?

6.6 Doporučená studijní literatura

- KOZUBKOVÁ, M., BLEJCHAŘ, T., a BOJKO M. *Modelování přenosu tepla, hmoty a hybnosti*. Učební text. VŠB-TU Ostrava, 2011, 174 s.
- MAZUMDAR, D. a EVANS, J., W.: *Modeling of Steelmaking Processes*. CRC Press, 1 edition, 2009. 493 p. ISBN-13: 978-1420062434
- MARŠÍK, F. *Numerické metody mechaniky kontinua*. Praha, Akademie věd ČR, 1990, 295 s.
- Basic Training: MAGMASOFT 5.4.1. Aachen: MAGMA GmbH, 2020, 150 s.

7 Kapitola: Základy práce s MAGMASOFT®

7.1 Klíčová slova

numerická simulace, MAGMASOFT®, preprocessing, uživatelské rozhraní

7.2 Cíle kapitoly

Cílem kapitoly je studenta seznámit uživatelským rozhraním a ovládáním SW MAGMASOFT®, včetně základních operací, jako je založení nového projektu.

7.3 Úvod do kapitoly

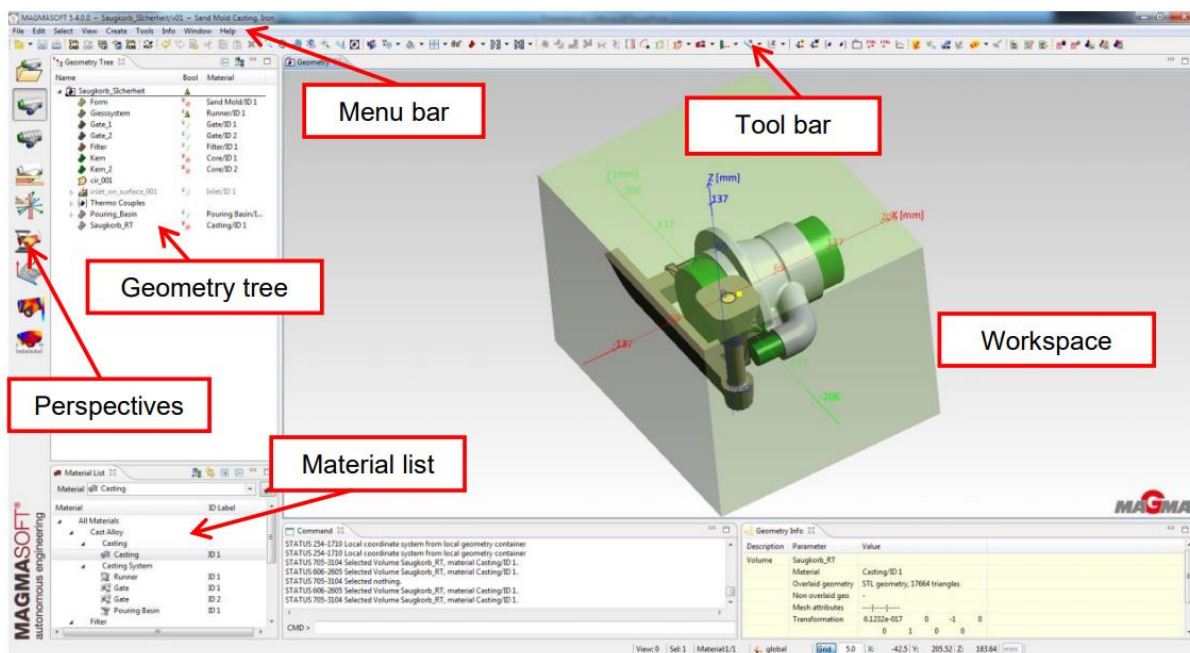
Úvod k používání softwaru je uveden v následující kapitole. Je vysvětleno grafické uživatelské rozhraní a ovládací prvky, aby se usnadnilo zacházení se softwarem.

7.4 Výklad

Struktura uživatelského rozhraní

Přehled základních prvků uživatelského rozhraní (GUI) MAGMASOFT® je zobrazena na obrázku. Největší část uživatelského rozhraní je vyplněna pracovním oknem. Podokna, které obklopují pracovní okno, slouží k provádění různých úkolů.

V horní části GUI je menu bar a hlavní panel nástrojů. Obsah závisí na aktuálně používané perspektivě. Ve spodní části je stavový řádek označující důležité stavové informace. Na levé straně uživatelského rozhraní je k dispozici několik perspektiv, které je nutné zpravidla projít v pořadí od shora dolů, abyste správně připravili a spustili simulaci. Mezi jednotlivými perspektivami můžete kdykoli přepínat. Není třeba ukládat obsah jedné perspektivy samostatně; k tomu dojde automaticky, pokud je MAGMASOFT® uzavřen. Aktuální stav můžete uložit také pomocí tlačítka „Save“.

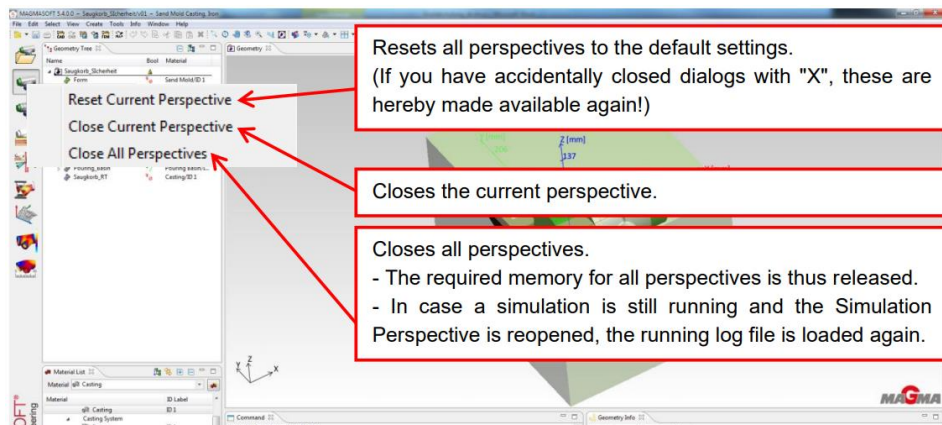


Obrázek – Uživatelské rozhraní Geometry Perspective

Perspektivy jsou následující:

- **Project** – řízení projektů (vytvoření, otevření, přejmenování atd.),
- **Geometry** – Zde je vytvořena 3D geometrie modelu,
- **Mesh** – Generování výpočetní sítě,
- **Definition** – Definice všech parametrů spojených se simulací,
- **Optimization** – Definice všech parametrů spojených s optimalizací,
- **Simulation** – Zde je možné nastavit a spustit výpočet simulace,
- **Assessment** – Statistické vyhodnocení optimalizace,
- **Results** – Zde jsou zobrazeny výsledky všech simulací.

Perspektivy lze uzavřít nebo znovu otevřít jednotlivě. Pokud se náhodou ztratíte při změně rozvržení okna, můžete původní rozvržení obnovit. Chcete-li tak učinit, klepněte pravým tlačítkem myši na jednu z perspektiv a zobrazí se tři možnosti výběru. Tyto různé možnosti jsou vysvětleny na obrázku 2 níže.



Obrázek – Obnovení výchozího rozvržení perspektiv

Funkce myši

Levé tlačítko myši: Klikněte na objekt pro jeho aktivaci, upravení nebo funkci nebo k otevření podmenu. K otevření dialogu použijte dvojité kliknutí.

Pravé tlačítko myši: Klepnutím na pravé tlačítko myši, můžete otevřít další podmenu (kontextová menu) na spoustě míst v uživatelském rozhraní.

Prostřední tlačítko myši: Posunutím kolečka se geometrie přiblíží nebo oddálí, tato funkce bere v potaz polohu kurzoru.

CTRL + levé tlačítko myši: Pokud tyto dvě klávesy podržíte najednou, znamená to rotaci celé geometrie.

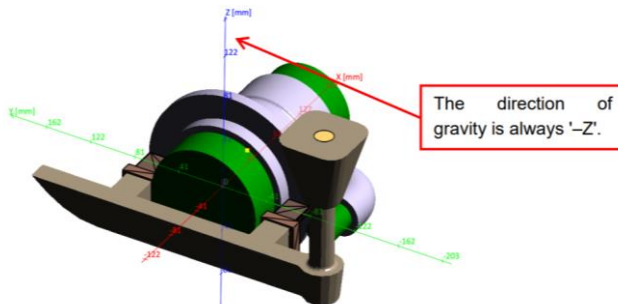
CTRL + prostřední tlačítko myši (kolečko): Pokud tyto dvě klávesy podržíte najednou, způsobíte pohyb celé geometrie.

CTRL+ pravé tlačítko myši: Pokud tyto dvě klávesy podržíte najednou, způsobíte přiblížení či oddálení celé geometrie.

Pokud potřebujete do MAGMASOFT® zadat číselné hodnoty, můžete tyto hodnoty jednoduše změnit otočením kolečka myši. Za tímto účelem podržte kurzor nad příslušným hodnotovým oknem a otáčením kolečka myši změňte hodnoty po 1 jednotce. Pokud navíc stisknete SHIFT na klávesnici, hodnoty se začnou zvyšovat nebo zmenšovat o 10 jednotek.

Souřadnicový systém v MAGMASOFT®

Souřadná osa „-Z“ popisuje gravitační vektor. Je nezbytné ujistit se, že odpovídajícím způsobem přizpůsobíte orientaci 3D modelu. Osy „X“ a „Y“, stejně jako poloha modelu v souřadném systému, však na simulaci nemají žádný vliv; je třeba zvážit pouze srovnání s osou „-Z“.



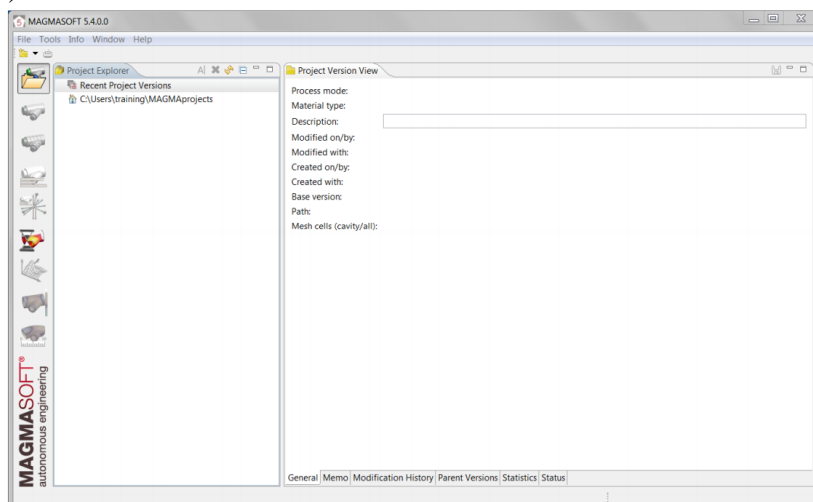
Obrázek – Osy souřadného systému

Project Perspective

V *Project Perspective* najdete všechny potřebné funkce pro správu MAGMA projektů. Tyto funkce zahrnují:

„Open Project“, „New Project“, „New Version“, „Rename Project“, „Delete Project“, „Delete Results“.

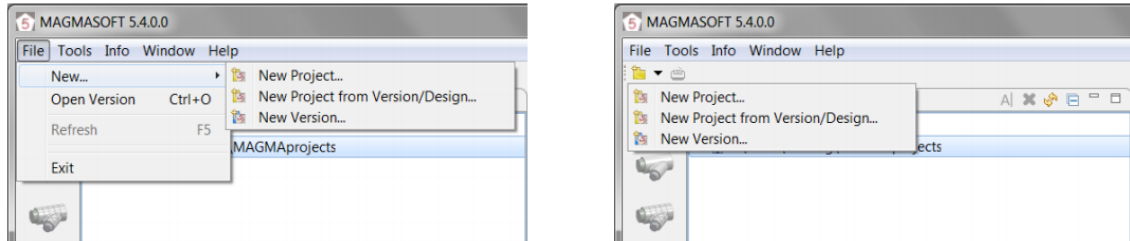
Při spuštění aplikace MAGMASOFT® uvidíte obsah složek adresářů projektu, jak je znázorněno na obrázku. V průzkumníku projektů („Project Explorer“) najdete „Recent Project Versions“. Zde se zobrazí posledních pět upravených verzí pro rychlý přístup. Přimo pod těmito verzemi najdete složku projektů. Zde jsou všechny projekty uloženy ve výchozím nastavení. Tuto složku můžete kdykoli změnit v okně nastavení (*Window > Preferences... > Project Management > Default project directory*).



Obrázek – Uživatelské rozhraní po spuštění MAGMASOFT®

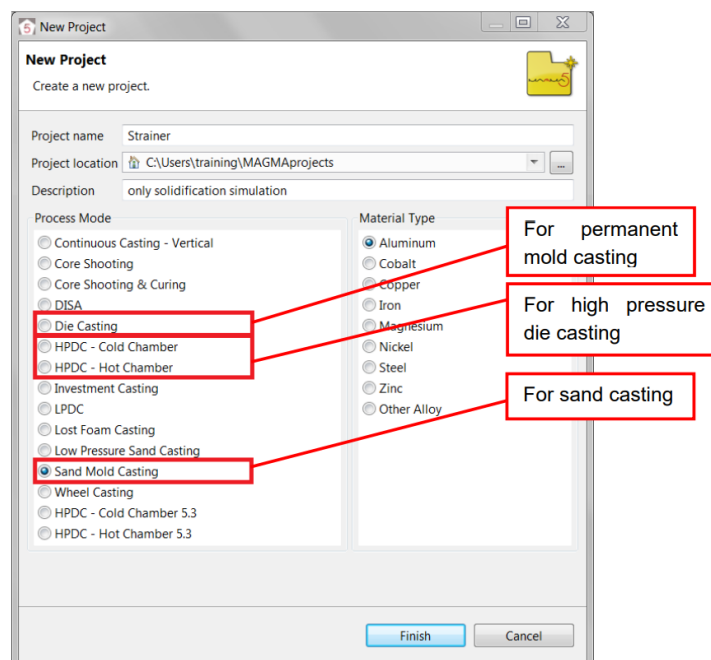
Vytvoření projektu

MAGMASOFT® vám nabízí různé možnosti pro vytvoření nového projektu. V nabídce *File*>*New...* vyberte „New Project ...“. Alternativně můžete také použít odpovídající ikonu na panelu nástrojů.



Obrázek – Možnosti vytvoření nového projektu

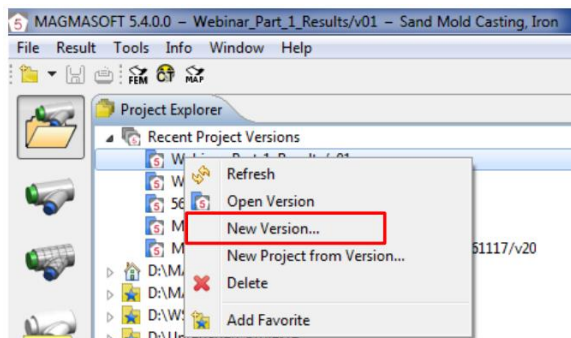
V obou případech se otevře stejný dialog pro definování dalších nastavení specifických pro proces. Při vytváření projektu musíte určit režim procesu a typ slitiny. Tyto informace jsou vyžadovány, aby vám byly v průběhu definování projektu k dispozici příslušné nastavení a materiály. Tento dialog navíc použijete také k přiřazení názvu projektu. Doporučujeme nepoužívat pro název projektu speciální znaky. Dále zde vyberete umístění úložiště pro svůj projekt. Můžete si vybrat mezi standardní složkou projektu a oblíbenými položkami. Sem můžete také přidat popis projektu. Následně budete automaticky přeměrování do *Geometry Perspective*.



Obrázek – Vytvoření nového projektu

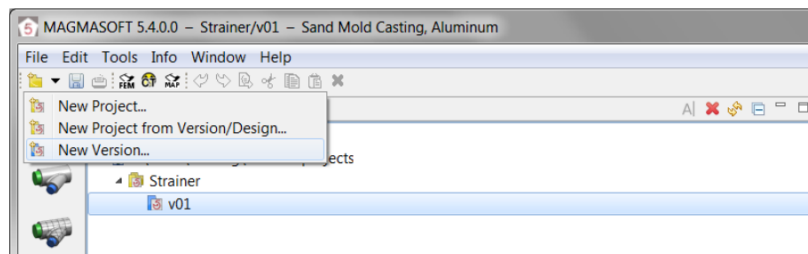
Vytvoření nové verze

Pro vytvoření nové verze projektu existují dvě možnosti. Pokud vytvoříte novou verzi pomocí funkce „New Version“, musíte nejprve určit základní verzi této nové verze. Za tímto účelem vyberte odpovídající verzi v adresáři projektu. Poté můžete definovat data základní verze, která budou převedena do nové verze.

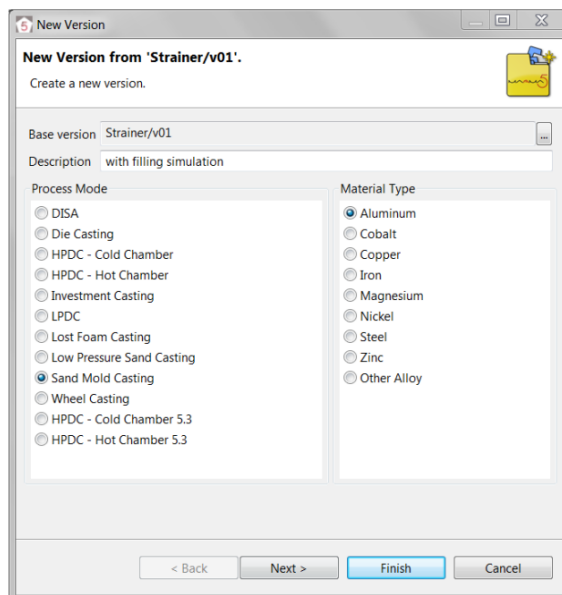


Obrázek – Vytvoření nové verze s použitím kliku pravého tlačítka myši

Otevře se dialogové okno pro vytvoření nové verze. Základní verze označuje, na které verzi je nová verze založena. Kromě toho můžete znovu přidat popis. Dále můžete změnit jak procesní režim, tak materiál. Doporučujeme však neměnit procesní režim v rámci projektu, protože jinak dojde ke ztrátě mnoha závislostí v softwaru. Chcete-li změnit proces, místo toho vytvořte nový projekt.

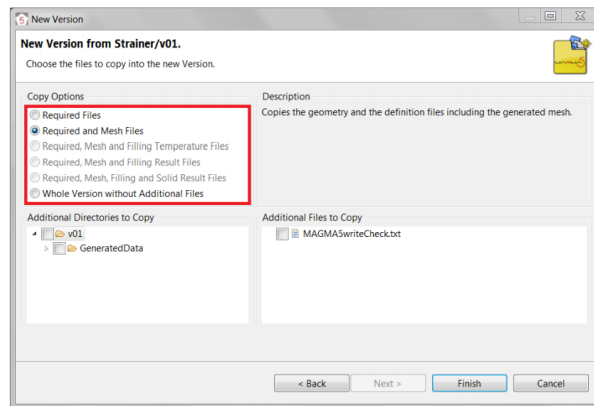


Obrázek – Vytvoření nové verze pomocí nástrojové lišty



Obrázek – Vytvoření nové verze

Pokud nyní zvolíte „Finish“, všechna nastavení ze základní verze budou převzata pro vaši novou verzi (s výjimkou výsledků).



Obrázek – Pokročilá nastavení pro novou verzi

Pokud vyberete možnost „Next“, můžete si také vybrat z následujících možností:

- Použijte „Required Files“, pokud chcete změnit geometrii.
- Použijte „Required and Mesh Files“, pokud požadované změny nevyžadují nové generování sítě, například při změně licí teploty nebo podmínek plnění.
- Chcete-li změnit nastavení tuhnutí a chladnutí, například parametry očkování v simulaci litin, použijte „Required, Mesh and Filling Temperature Files“. V tomto případě se výpočet tuhnutí provádí na základě výsledků plnění základní verze, to znamená, že nebudete muset znovu počítat plnění dutiny formy. Výsledky plnění však nejsou zkopírovány do nové verze. V takovém případě můžete také použít volbu „Required, Mesh and Filling Result Files“. Zde již budou k dispozici výsledky plnění základní verze pro vyhodnocení v nové verzi.
- Chcete-li provádět simulace napětí s různými nastaveními (které jsou závislé na výpočtu tuhnutí a chladnutí), použijte volbu „Required, Mesh, Filling and Solid Result Files“.
- Možnost „Whole Version“ vytvoří kopii základní verze.

7.5 Kontrolní otázky

1. Jakým způsobem je členěn výpočetní SW MAGMASOFT®?
2. V které perspektivě probíhá tvorba výpočetní sítě?
3. K čemu slouží perspektiva Simulation?
4. Která souřadná osa popisuje v SW MAGMASOFT® gravitační vektor?
5. Lze v SW MAGMASOFT® vytvořit nový projekt z libovolné verze projektu?

7.6 Doporučená studijní literatura

Problematiku k dané kapitole naleznete na stránkách uvedených za publikací.

- Basic Training: MAGMASOFT 5.4.1. Aachen: MAGMA GmbH, 2020, 150 s.

8 Kapitola: Možnosti tvorby a úpravy geometrie v MAGMASOFT®

8.1 Klíčová slova

MAGMASOFT®, preprocessing, výpočetní geometrie, definice materiálových skupin, inlet

8.2 Cíle kapitoly

Cílem kapitoly je studenta seznámit se základními operacemi, týkajícími se výpočetní geometrie odlitku, definice materiálových skupin a vytvoření oblasti tzv. inletu.

8.3 Úvod do kapitoly

V této kapitole je postupně popsána práce s geometrií v SW MAGMASOFT®, zahrnující import dat, úpravy geometrie, přiřazení materiálových skupin a tvorbu inletu.

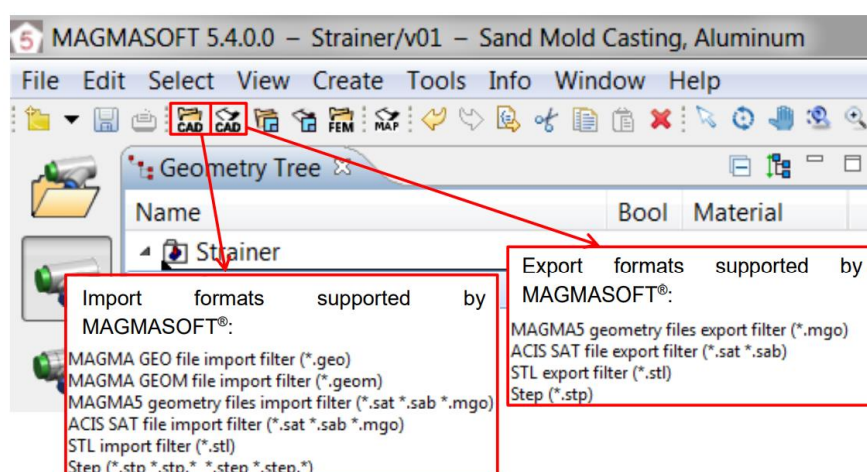
8.4 Výklad

Geometry Perspective

V *Geometry Perspective* se vytváří geometrie 3D modelu pro simulaci. Za tímto účelem můžete importovat CAD data z jiných CAD systémů pomocí funkce „Import CAD“ (*File > Import > Import CAD*) nebo vytvořit parametrické geometrie přímo v *Geometry Perspective*.

Import a Export CAD dat v MAGMASOFT®

V *Geometry Perspective* máte řadu možností pro import CAD dat z jiných systémů. Simulační model můžete vytvořit pouze z externích dat nebo je také kombinovat s geometrií vytvořenou v MAGMASOFT®.



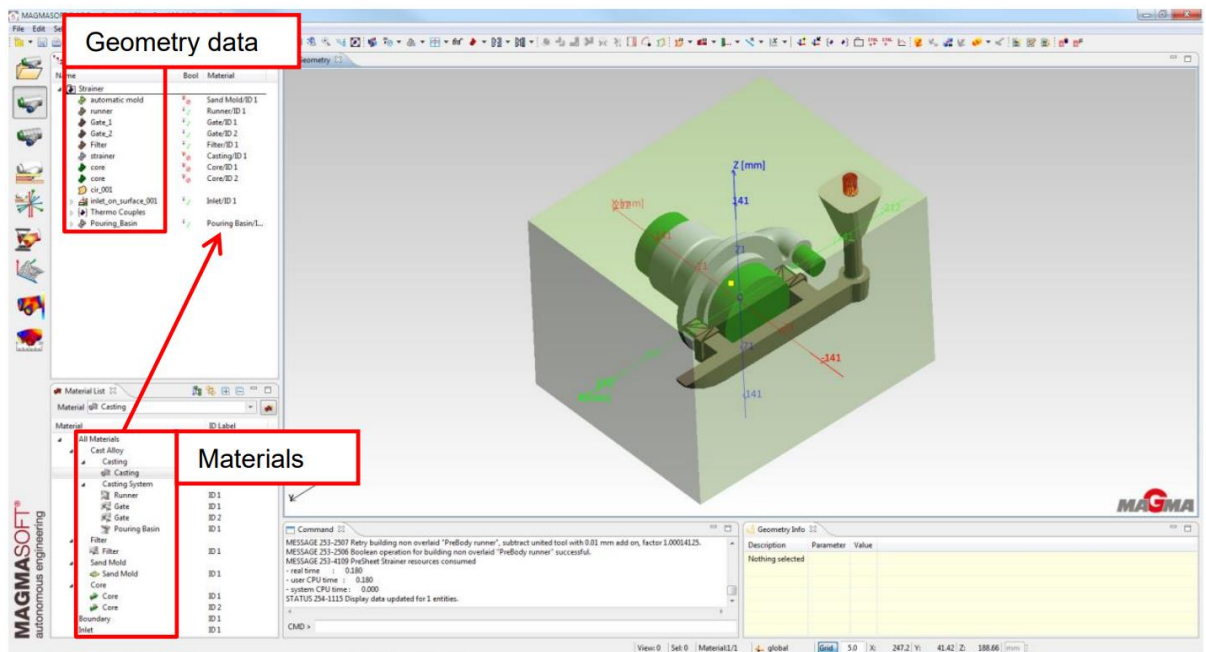
Obrázek – Import a Export geometrií v MAGMASOFT®

Ikona CAD vlevo umožňuje importovat data CAD. Na obrázku můžete vidět formáty importu a exportu podporované programem MAGMASOFT®. Funkci pro export CAD dat najdete vedle


ikony pro import CAD. Chcete-li exportovat geometrie, musíte je nejprve vybrat. Pouze tehdy lze použít funkci pro export.

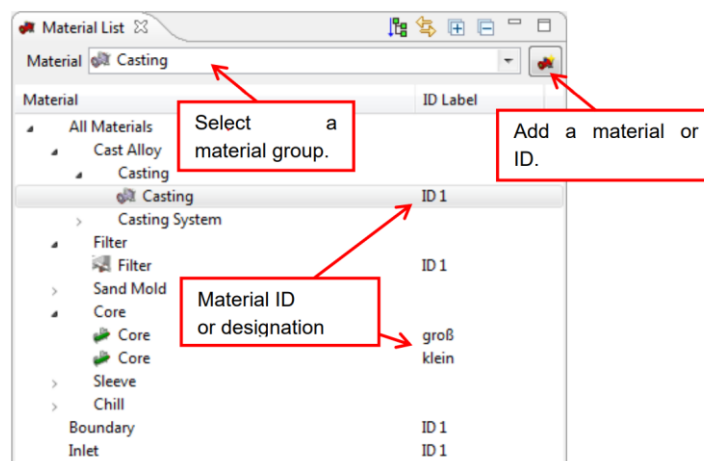
Přiřazení materiálových skupin

K importovaným geometrickým datům ze seznamu materiálů musíte přiřadit správné materiály. Na obrázku můžete vidět 3D zobrazení svého modelu v pracovním okně. Různé barvy představují různé materiály. Ke každé geometrii musí být přiřazen odpovídající materiál. Například tmavě hnědá představuje filtr, kterému bude později přiřazena konkrétní funkce a hodnota/vlastnost.



Obrázek – Přiřazení materiálových skupin

Kromě toho můžete materiály dále rozdělit na další materiály se stejnou základní funkcí („sub-ID“), což vám například umožňuje přiřadit různé proměnné vlastnosti různým nálitkům nebo zářezům. Obrázek ukazuje seznam dostupných materiálů pro proces gravitačního lití do pískové formy. Chcete-li přidat další „dílní ID“, vyberte příslušný materiál ze seznamu a přidejte jej kliknutím na ikonu () napravo od rozbalovací nabídky.



Obrázek – Seznam materiálů

Seznam vybraných dostupných materiálů pro gravitační lití do pískových forem (Sand Casting), do kokil (Permanent Mold) a forem pro vysokotlaké lití (HPDC) uvádí tabulka:

Tabulka – Seznam materiálů

Název materiálu	Význam	Popis	Sand Casting	Permanent Mold	HPDC
Biscuit	Přebytečný kov na konci vstřikovacího válce studené komory	Obvykle je vytvořen a přiřazen automaticky při použití funkce „HPDC Inlet“/“HPDC Shot Chamber“			x
Boundary	Okrajová podmínka	Tvořena automaticky. Může být použita k dělení geometrie.	x	x	x
Breaker Core	Podnálitková podložka		x	x	
Casting	Odlitek		x	x	x
Chill	Chladítko		x	x	
Core	Pískové jádro		x	x	
Cover Die	Pevná část formy	Může být použita pro modelování pevné části formy.			x
Ejector Die	Pohyblivá část formy	Může být použita pro modelování pohyblivé části formy (část s vyhazovačem).			x
Feeder	Nálitek		x	x	
Feederneck	Krček nálitku		x	x	
Filter	Filtr		x	x	
Gate	Zářez	Pokud existuje více zářezů, může se každému z nich přiřadit různé ID.	x	x	x
Inlet	Zdroj kovu	Odpovídá příčnému řezu proudu kovu. V závislosti na módu procesu jsou dostupné různé funkce.	x	x	x
Insert	Vložka		x	x	x
Insulation	Izolace		x	x	
Machining Allowance	Přídavek na obrábění	Důležitý z hlediska výpočtu deformace	x	x	x
Melt Reservoir	Zásobárna tekutého kovu		x	x	
Overflow	Ledvinky	Může být použito pro průduchy a vakuové kanálky.			x

Tabulka – Seznam materiálů

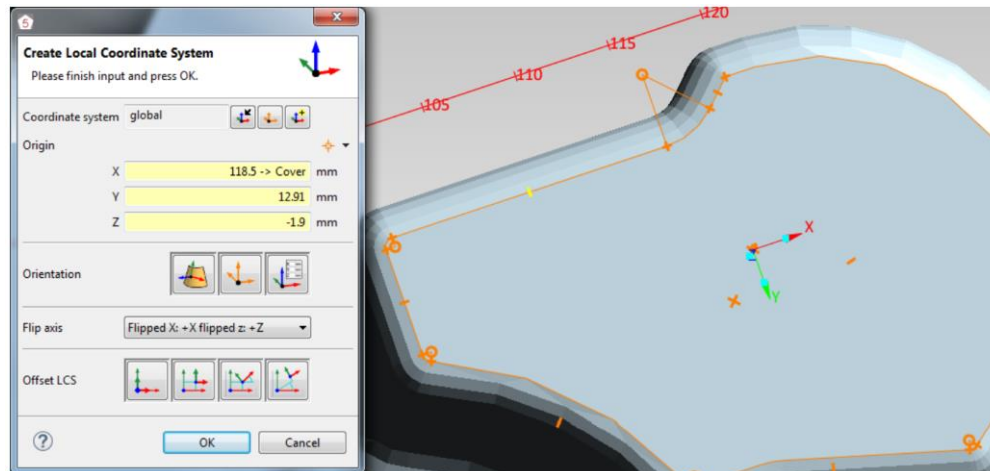
Název materiálu	Význam	Popis	Sand Casting	Permanent Mold	HPDC
Permanent Mold	Permanentní forma (kokila)		x	x	
Plunger	Píst				x
Pouring Basin	Licí jamka		x	x	
Runner	Rozváděcí kanálek (struskovák)		x	x	x
Sand Mold	Písková forma		x	x	
Shot Chamber	Vstřikovací komora	Obvykle je vytvořen a přiřazen automaticky při použití funkce „HPDC Inlet“/“HPDC Shot Chamber“			x
Side Core	Slider				x
Sleeve	Obklad nálitku		x	x	
Squeeze Stamp	Squeezovací známka				x
Tempering Channel	Temperační kanály pro řízení teploty formy	Použitelný pro veškeré účely kontroly teploty (chladicí nebo topné kanály).	x	x	x
Thermal Boundary	Proměnná okrajové podmínky		x	x	
Top Core	Horní jádro			x	
User Defined	Uživatelská funkce	Nejčastěji využívaná pro pohlcování vzduchu a vzduchové mezery.	x	x	x

Vytvoření lokálního souřadného systému (LCS)

Lokální souřadný systém (nebo „LCS“) vám pomůže vytvořit geometrie v požadované poloze a orientaci. Může být umístěn na existující prvky geometrie buď v závislosti na geometrii, nebo nezávisle.

Především potřebujete lokální souřadnicové systémy pro optimalizaci geometrie. LCS umožňuje navrhovat prvky geometrie vůči sobě navzájem. Je tak možné zajistit konzistentní automatické posunutí a změnu geometrie.

LCS můžete vytvořit buď pomocí položky nabídky *Create > local coordinate system*, nebo přes odpovídající symbol na panelu nástrojů. V obou případech se otevře okno „Create Local Coordinate System“, které vyžaduje několik vstupů:



Obrázek – Dialogové okno pro vytvoření lokálního souřadnicového systému

- **„Coordinate system“**: Zde určíte existující souřadnicový systém, na základě kterého (podle kterého) bude nový LCS vytvořen. Chcete-li to provést, můžete buď, zvolit globální souřadný systém, vybrat existující LCS nebo nejprve definovat nový LCS, ke kterému se později vrátíte. Existující LCS můžete vybrat buď ve stromu geometrie, nebo v samotné geometrii.
- **„Origin“**: Zde definujete počátek pro nový „LCS“ vzhledem k dříve vybranému souřadnému systému. Můžete zadat hodnoty nebo kliknout na bod v geometrii. Když kliknete na geometrii, MAGMASOFT® vám automaticky nabídne rychlý výběr geometrických funkcí pro kliknutí (obrázek 19). Pokud využijete možnost „Reference Input“, LCS se pevně odkazuje na vybraný bod – v případě, že přesunete část, bude přesunuta také LCS, včetně všech geometrií vytvořených na jejím základě. Je-li volba „Reference Input“ aktivní, jsou vstupní okna souřadnic (XYZ) označena žlutě a v okně „X“ můžete vidět, která geometrie byla použita jako referenční (například „Cover“ na obrázku 19). Při použití možnosti „Default Input“ je nový LCS vždy vytvořen v globálním souřadném systému.
- **„Orientation“**: Zde definujete zarovnání os nového LCS.
- **„Flip axis“**: Zde můžete LCS zarovnat výměnou (převrácením) os. To lze také provést kliknutím a přetažením modrých značek k osám nového LCS (viz obrázek 20). Růžová šipka potom ukazuje směr otáčení.
- **„Offset LCS“**: Toto umožňuje dodatečně přesunout nebo otočit nový LCS.

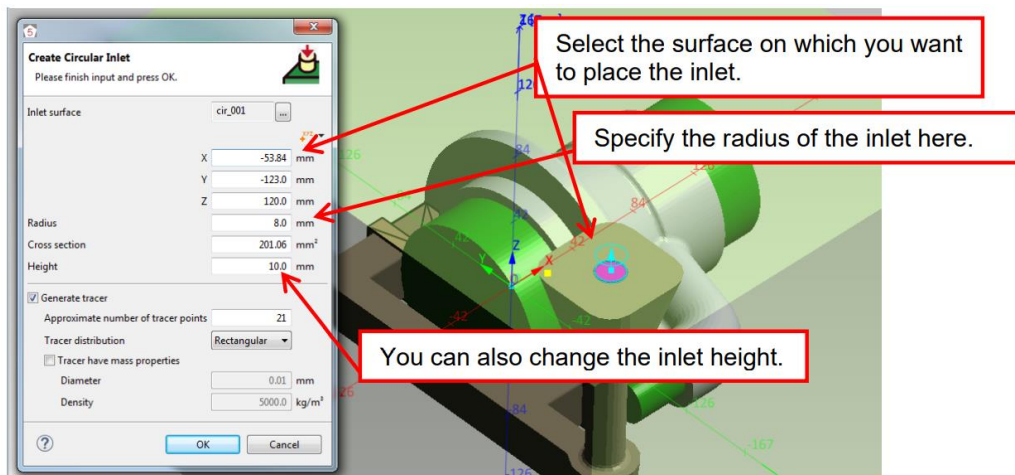


Obrázek – Rotace a orientování nového lokálního souřadnicového systému přesouváním modrých značek

Definice „Inlet“

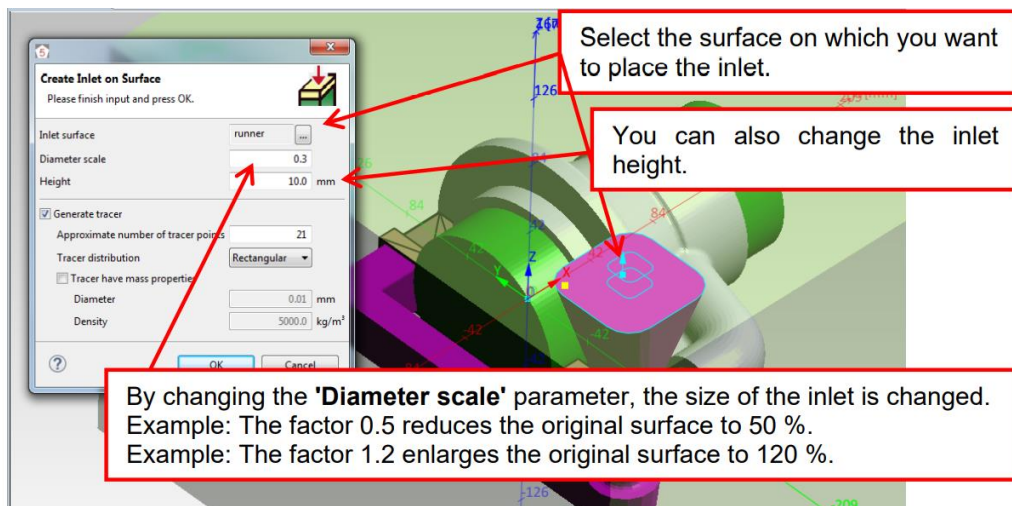
V simulaci pozice a velikost „Inlet“ (zdroje/vstup taveniny) definuje proud tekutého kovu v průběhu plnění dutiny formy. V MAGMASOFT® je „Inlet“ definován jako prvek „Boundary“. Upozorňujeme, že funkce „Circular Inlet“ a „Inlet on Surface“ jsou integrovány do každého procesu lití. Funkce „HPDC Inlet“ nebo „HPDC Shot Chamber“ jsou však k dispozici pouze pro procesy vysokotlakého lití.

Tvorba „Circular Inlet“: Zvolte *Create > Boundary > Circular Inlet...*



Obrázek – „Circular Inlet“

Tvorba „Inlet on Surface“: Zvolte *Create > Boundary > Inlet od Surface...*



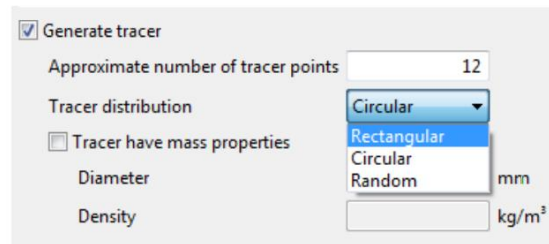
Obrázek – „Inlet on Surface“

Trasovací částice

Funkce „Tracer“ vám umožňuje vizualizovat dráhu proudění během plnění, např. kde a jak tavenina proudí uvnitř dutiny formy, kde se usazuje, nebo kde se vyskytuje turbulence.

Stopovací částice jsou definovány ve spodní části dialogového okna „Inlet“. Pomocí možnosti „Generate Tracer“ můžete automaticky vytvořit trasovací body ve vstupním otvoru („Inlet“). Za tímto účelem stačí definovat počet trasovacích bodů a způsob rozložení v průřezové oblasti. Potom se trasovací body automaticky umístí do „Inlet“.

Trasovací částice můžete umístit třemi různými způsoby. Ty jsou znázorněny na obrázku. Rozložení může být „Rectangular“ (pravoúhlé), „Circular“ (kruhové) nebo „Random“ (náhodné).



Obrázek – Generování „Fill Tracer“

8.5 Kontrolní otázky

1. Lze přímo v MAGMASOFT® vytvářet výpočetní geometrie?
2. Je možné do MAGMASOFT® importovat CAD data, vytvořená v jiných programech?
3. Kterou operaci je nutno provést po importu/vytvoření geometrie výpočetní oblasti?
4. Kdy je vhodné využít tvorbu lokálního souřadného systému?
5. K čemu slouží tzv. Inlet?
6. Ke znázornění kterého děje slouží trasovací částice?

8.6 Doporučená studijní literatura

Problematiku k dané kapitole naleznete na stránkách uvedených za publikací.

- Basic Training: MAGMASOFT 5.4.1. Aachen: MAGMA GmbH, 2020, 150 s.

9 Kapitola: Možnosti tvorby výpočetní sítě v MAGMASOFT®

9.1 Klíčová slova

MAGMASOFT®, preprocessing, výpočetní síť, kvalita sítě

9.2 Cíle kapitoly

Cílem kapitoly je obeznámit studenta se způsoby tvorby výpočetní sítě a vysvětlit základní nastavení.

9.3 Úvod do kapitoly

Tato kapitola popisuje různé způsoby tvorby výpočetní sítě v programu MAGMASOFT® a možnosti nastavení.

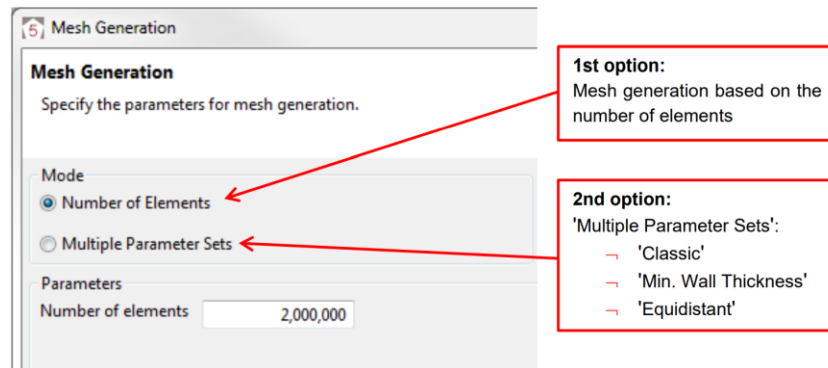
9.4 Výklad

Mesh Perspective

V *Mesh Perspective* (perspektivě sítě) je nutné určit parametry výpočetní sítě, vygenerovat síť a rozhodnout, zda síť splňuje vaše požadavky. Základní možnosti síťování jsou stejné pro všechny procesy lití. Při vysokotlakém lití do formy se však používá jiný výpočetní algoritmus, který může zpracovávat nestrukturované sítě. To vyžaduje pokročilou generaci sítí. V následujícím textu jsou zdůrazněny rozdíly v postupu generování sítě. Pro jednotlivé případy.

Pro generování sítě jsou dvě základní možnosti, které jsou stejné pro všechny procesy odlévání:

- „**Number of Elements**“ Program generuje síť, která primárně odpovídá definovanému počtu prvků. Jednoduše zadejte požadovaný počet prvků do pole „Number of Elements“. Vytváření sítě se pak provádí automaticky. V síti se však pravděpodobně neobjeví důležité geometrické prvky, jako jsou drážky, úkosy, tenké zářezy atd. Proto je obzvláště důležité zkontrolovat vygenerovanou síť.
- „**Multiple Parameter Sets**“ „Multiple Parameter Sets“ obsahuje tři různé metody generování sítě: „Classic“, „Min. Wall Thickness“ a „Equidistant“. Každé nastavení parametrů („Parameter Set“) můžete definovat individuálně pomocí libovolné metody a různých parametrů sítě.



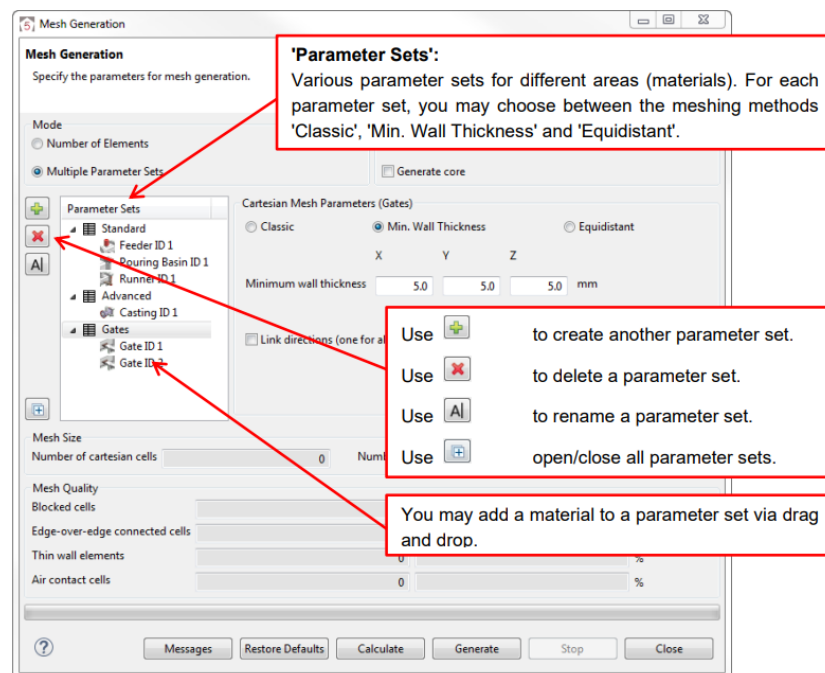
Obrázek – Možnosti vytvoření sítě

Nastavení parametrů („Parameter Sets“)

Pro vytváření různých sítí pro dané skupiny materiálů, musíte vytvořit sady parametrů. Při lití do pískových forem a při lití do trvalých forem jsou dostupná dvě výchozí nastavení parametrů: „Standard“ a „Advanced“. Při vysokotlakém lití do formy je dostupných šest nastavení: „Mold“, „Runner“, „Tempering Channel“, „Shot Chamber“, „Casting“ and „Gate“.

Můžete však vytvořit více sad parametrů. Kromě toho můžete sady parametrů také přejmenovat nebo odstranit. Při vysokotlakém lití můžete odstranit všechny sady parametrů s výjimkou nejvyšší sady. Při lití do pískové formy a lití do trvalých forem nemůžete odstranit dvě nejvyšší sady parametrů (bez ohledu na název). Chcete-li je odstranit, změňte pořadí sad parametrů pomocí přetažení. Nakonec přiřaďte požadované skupiny materiálů jednotlivým sadám parametrů pomocí přetažení.

Poznámka: Síť v nejnižší sadě parametrů (viz část „Parameter Sets“ na obrázku 75) překrývá síť z předchozích sad parametrů. Proto musí být vždy nejjemnější síť aplikována na nejnižší sadu parametrů.

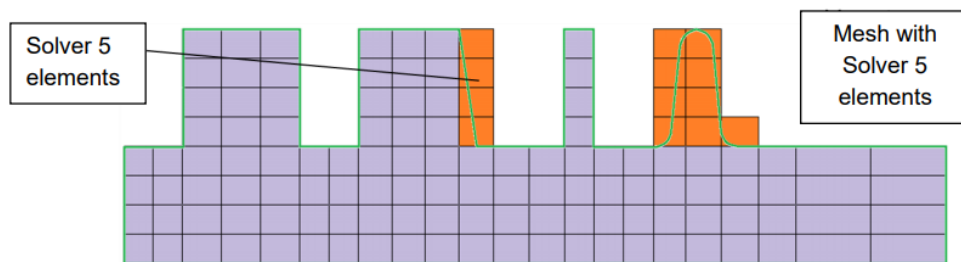


Obrázek – Vytváření sítě nastavení parametrů

Vytváření sítě pomocí Solver 5 (nedostupné pro vysokotlaké lití).

Jak můžete jasně vidět na obrázku, geometrii není vždy možné s dostatečnou přesností popsat pouze pomocí elementů typu kvádr. Elementy sítě, které lze jednoznačně přiřadit ke skupině materiálů, jsou vybaveny odpovídající skupinou materiálů.

S funkcí „Mesh for Solver 5“ jsou prvky na okrajích, které nelze jednoznačně přiřadit (zobrazeny oranžově), znovu zpracovány samostatně a program vytvoří některé další informace. Tyto informace budou později použity při výpočtu, například pro posouzení vlivu povrchového napětí. Funkce „Mesh for Solver 5“ je ve výchozím nastavení aktivní a lze jej v případě potřeby deaktivovat



Obrázek – Porovnání standardního Solveru a Solver 5

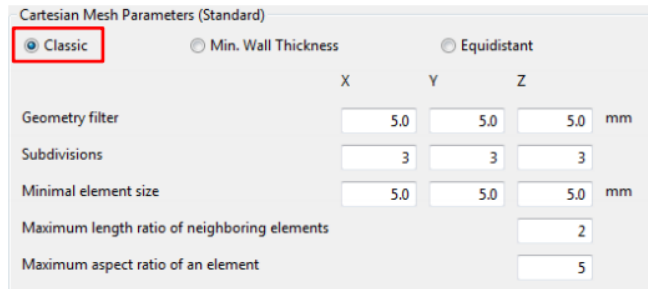
Pozor:

Elementy zohledněny Solverem 5 jsou buňky, rozdělené na materiál odlitku a materiál formy hranicí geometrie, takže se skládají například z poloviny z materiálu „Casting“ a z druhé poloviny z materiálu „Sand Mold“ (to znamená, že tyto buňky budou mít porozitu 50 %).

Standardní vytváření sítě

V případě standardního generování sítě („Classic“) ovládáte počet prvků (velikost sítě) pomocí parametrů. Chcete-li povolit použití této metody síťování, nezapomeňte nastavit „Cartesian Mesh Parameters“ na „Classic“.

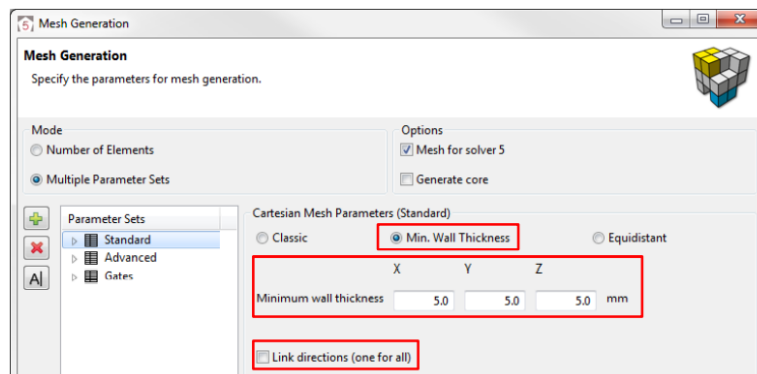
- „**Geometry Filter**“ Určuje minimální velikost kroku, se kterou je geometrie skenována jako první krok sítě.
- „**Subdivisions**“ Toto je počet podrozdělení, které mají být použity pro oblast, která byla identifikována po prvním kroku generování sítě.
- „**Minimal Element Size**“ Určuje minimální přípustnou tloušťku nejmenší vrstvy sítě.
- „**Maximum length ratio of neighboring cells**“ Určuje poměr velikostí, které mohou mít sousedící prvky.
- „**Maximum aspect ration of an element**“ Určuje maximální poměr délky, šířky a výšky prvku objektu.



Obrázek – Tvorba sítě – „Multiple Parameter Sets“ – „Classic“ (Standartní nastavení)

Vytváření sítě s použitím „Minimum wall thickness“

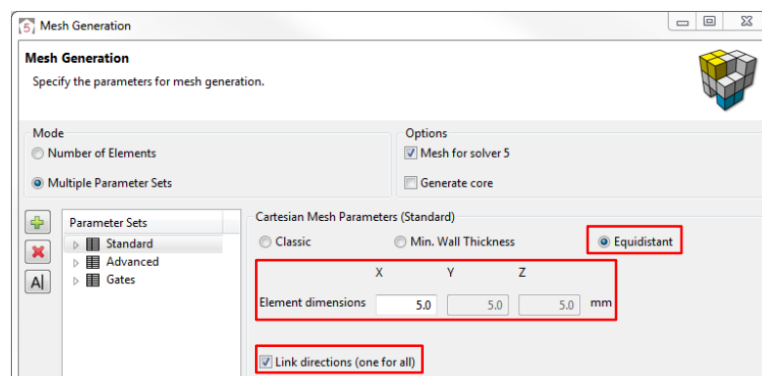
Pomocí metody „Minimum wall thickness“ (Minimální tloušťka stěny) program rozdělí předdefinovanou hodnotu „Minimum wall thickness“ na dva až tři prvky sítě. To znamená že, by tato hodnota měla zhruba odpovídat průměrné tloušťce stěny daného odlitku pro získání odpovídající sítě. Hodnoty pro každý směr souřadnic můžete zadat samostatně nebo jednu hodnotu pro všechny tři směry pomocí možnosti „Link Directions“.



Obrázek – Tvorba sítě – „Multiple Parameter Sets“ – „Minimum Wall Thickness“

Vytváření sítě s použitím „Equidistant“

Generování sítě pomocí metody „Equidistant“ (Ekvidistantní síť) nabízí možnost vytvoření sítě s buňkami stejné velikosti. Stačí zadat požadovanou velikost prvku pro odpovídající směr souřadnic. Program poté vytvoří geometrii s prvky mřížky, které mají jednotnou velikost, jak je uvedeno pro směr X, Y a Z. Síťový algoritmus potom rozdělí síť tak, aby buňky co nejpřesněji odpovídaly požadované velikosti prvku. U této metody síťování neovlivňuje geometrie velikost síťových prvků. Tato metoda síťování zároveň vytváří velmi jednoduchou síť.



Obrázek – „Tvorba sítě – „Multiple Parameter Sets“ – „Equidistant“

Kvalita sítě

Při hodnocení kvality sítě je zásadní najít dobrý kompromis mezi počtem elementů sítě a časem výpočtu z toho odvozeným. Spíše malé elementy, které znamenají poměrně velké množství elementů sítě, obvykle povedou k dlouhým výpočetním časům. Po vygenerování sítě se okamžitě zobrazí počet prvků v dialogu „Mesh generation“. Ve všech procesech lití získáte informace o „Number of cartesian cells“ a „Number of cartesian cavity cells“. První hodnota označuje celkový počet elementů sítě. Druhá hodnota ukazuje počet elementů dutiny formy (místo proudění tekutého kovu). To jsou prvky, které mají nejvýraznější vliv na dobu výpočtu, protože zde je třeba řešit pohybové rovnice.

Při vysokotlakém lití získáte další informace o síti. „Number of composed cells“ označuje celkový počet elementů sítě po procesu sloučení buněk. Vidíte, že obvykle lze ušetřit až 90% prvků ve formě. Podrobnosti pro „Number of cartesian cavity cells“ a „Number of composed cavity cells“ jsou totožné, protože u elementů v dutině formy není slučování buněk dovoleno.

Mesh Size			
Number of cartesian cells	21,028,896	Number of cartesian cavity cells	452,196
Number of composed cells	1,294,765	Number of composed cavity cells	452,196

Obrázek – Počet elementů sítě

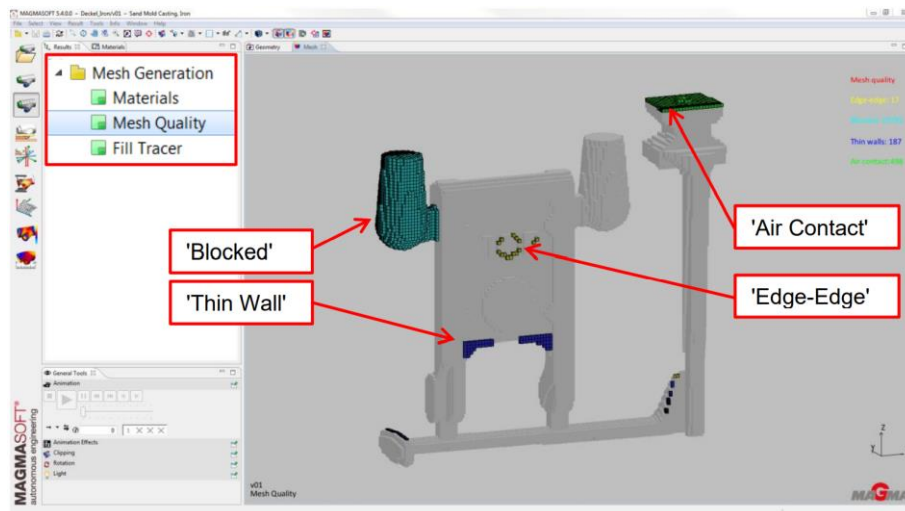
Dalším výsledkem zobrazeným přímo po vygenerování sítě je absolutní a relativní počet potenciálně kritických elementů. Čím větší je číslo, tím horší je síť. Nezapomeňte však vždy porovnat absolutní číslo s relativním počtem elementů. Například v jemné síti 27 chybných elementů není tak závažných jako v hrubé síti.

Mesh Quality			
Blocked cells	0		0.0 %
Edge-over-edge connected cells	27		0.0 %
Thin wall elements	62		0.0 %
Air contact cells	380		0.2 %

Obrázek – Počet potenciálně kritických elementů – absolutní vs. relativní

Nejprve zkontrolujte kvalitu sítě pomocí výsledků „Materials“. Zde vidíte, kolik prvků každého typu je k dispozici v tloušťce stěny. Obecným pravidlem je, že zářez by měl mít alespoň tři elementy. To platí také pro oblasti, kde se vyskytují reálné vady nebo místa, které jsou vystaveny vysokému namáhání.

Výsledek „Mesh Quality“ ukazuje polohu potenciálně kritických elementů. Zde vidíte na první pohled, ve které oblasti jsou kritické elementy umístěny. Pokud se kritické prvky hromadí v určité oblasti, doporučujeme vám upravit parametry sítě.



Obrázek – Kontrola kvality sítě nástrojem „Mesh Quality result“

„**Edge-Edge**“ elementy jsou spojeny pouze hranou. V MAGMASOFT® jsou informace předávány styčnými plochami mezi dvěma elementy. Prvky „Edge-Edge“ si proto nemohou vyměňovat informace. Pokud máte, mnoho prvků „Edge-Edge“, může to již vést k nepřesnému výpočtu.

„**Thin Wall**“ elementy se zobrazí, pokud je v tloušťce stěny pouze jeden prvek. Při odlévání to může být kritické, zatímco na spojení přetoků (ledvinek) s odlitkem jedna vrstva elementů není nijak kritická.

„**Blocked elements**“ jsou znázorněny tam, kde elementy nemají žádný kontakt se vstupem tekutého kovu („Inlet“). Tato oblast tedy nemůže být během procesu plnění zaplněna. Nezapomeňte se vyhnout blokovaným prvkům. Pokud se prvky tohoto typu objeví ve vaší síti, změňte parametry sítě a opakujte proces generování sítě, dokud v síti nezůstanou žádné kritické prvky typu „Solver 5“.

„**Air Contact**“ elementy jsou zobrazeny všude, kde má síťový prvek kontakt s okrajovou podmínkou pro vzduch, a tedy s okolní teplotou. Pro gravitační lití to platí samozřejmě pro oblasti v blízkosti licí jamky, protože tam je forma otevřená. Musíte se však ujistit, že se prvkům „Air Contact“ vyhnete v dutině formy. V těchto místech může docházet k odvádění nekontrolovatelně velkého množství tepla do okolního prostředí. Tím se výrazně sníží výsledná teplota. Kromě toho může vzduch zachycený během plnění formy z těchto míst nekontrolovaně unikat. To by se pak okamžitě projevilo na výsledcích tlaku vzduchu. Tyto elementy mohou například vzniknout kvůli špatně se překrývající geometrii nebo velkým vůlím mezi odlitkem a formou. Pokud se ve vaší síti objeví prvky „Air Contact“, změňte parametry sítě a opakujte proces generování sítě, dokud v síti dutiny formy nezůstanou žádné další prvky tohoto typu.

Kritické elementy typu „Solver 5“ (nejsou k dispozici při HPDC) označují spojení uvnitř sítě, která v modelu CAD neexistují. Elementem typu „Solver 5“ nenáleží stoprocentně materiálu formy ani odlitku, ale pouze např. 50%. Pokud jsou dva prvky tohoto typu umístěny vedle sebe, může jimi tavenina pomalu protékat. Pokud se prvky tohoto typu objeví ve vaší síti, změňte parametry sítě a opakujte proces vytváření sítě, dokud v síti nezůstanou žádné kritické prvky typu „Solver 5“. Chcete-li zobrazit kritické prvky typu Solver 5, nezapomeňte dodatečně aktivovat

materiál formy v záložce „Materials“. Ve výsledku „Mesh Quality“ mohou být tyto elementy pouze zobrazeny v oblasti formy.

„Element Aspect Ratio“ (k dispozici pouze při HPDC) označuje poměr délky / šířky / výšky jednotlivých seskupených objektů. To vám umožní snadno zjistit, zda jste splnili doporučené parametry.

Obecné rady pro vytváření sítí

V následujícím textu získáte další obecné rady pro generování výpočetních sítí.

- Začátek a konec materiálu „Cast“ má nejvyšší prioritu, aby bylo zajištěno, že vnější obrysy odlitku jsou správně zmapovány v sítí.
- Geometrie je vždy skenována ve směru + X, + Y + Z.
- Při hledání identifikačních znaků v geometrii má materiál „Gate“ vyšší prioritu než např. Materiál „Casting“. To má zajistit, aby průřezová plocha zářezů byla v průběhu generování sítě co nejpřesnější.
- Při hledání identifikačních značek mají materiály formy nejmenší význam při určování sítě.
- Pořadí sad parametrů („Multiple Parameter Set“) má poměrně velký vliv na výsledek generování sítě. Hodnoty poslední (dolní) sady parametrů mají nejvyšší prioritu, a tak překrývají parametry z předchozí sady parametrů.
- U souboru STL může algoritmus síťování vykazovat mírně odlišné chování. Je to kvůli velkému počtu uzlových bodů, které vedou k dalším identifikačním značkám i v oblastech bez geometrických změn.
- Používáte-li symetrickou geometrii, je důležité zajistit, aby importované geometrie (STL, STEP) a odpovídající vygenerovaná síť byla opravdu symetrická, jinak mohou být výsledky plnění nesymetrické.

9.5 Kontrolní otázky

1. V které z perspektiv programu probíhá tvorba výpočetní sítě?
2. Jaké jsou základní možnosti generování výpočetní sítě v MAGMASOFT®?
3. Jaký je princip tvorby výpočetní sítě v MAGMASOFT®?
4. Lze v MAGMASOFT® kontrolovat kvalitu výpočetní sítě?
5. Podle jakých typů elementů se řídí kvalitativní kontrola výpočetní sítě?
6. Který z materiálů má při síťování nejvyšší prioritu?

9.6 Doporučená studijní literatura

Problematiku k dané kapitole naleznete na stránkách uvedených za publikací.

- Basic Training: MAGMASOFT 5.4.1. Aachen: MAGMA GmbH, 2020, 150 s.

10 Kapitola: Nastavení výpočtu

10.1 Klíčová slova

MAGMASOFT[®], preprocessing, počáteční a okrajové podmínky, HTC, definice výpočtu

10.2 Cíle kapitoly

Cílem kapitoly je studenta seznámit s definicí vlastností materiálů, počátečních a okrajových podmínek výpočtu plnění a tuhnutí odlitku a volby požadovaných výsledků v rámci numerické simulace v SW MAGMASOFT[®].

10.3 Úvod do kapitoly

Tato kapitola popisuje proces definice podmínek výpočtu v SW MAGMASOFT[®].

10.4 Výklad

Definition Perspective

Všechna procesní data potřebná pro simulaci jsou shrnuta v *Definition Perspective*. Zde musíte zadat všechny relevantní údaje, jako jsou materiálové údaje nebo koeficienty přestupu tepla. Zde můžete také definovat kompletní proces lití, například parametry očkování pro odlévání litin nebo vstřelovací křivku pro vysokotlaké lití. Proces lití je jasně shrnut v tzv. procesní tabulce.

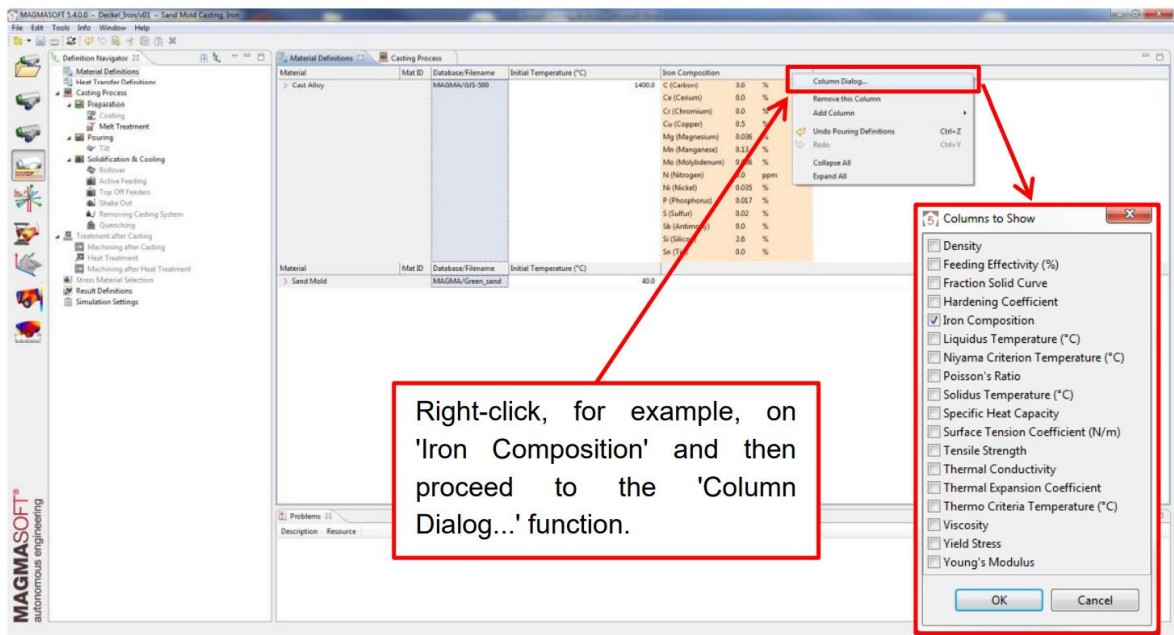
V následujícím textu jsou vysvětleny různé kroky během definice procesních dat a procesu lití. Pokud se proces definování liší od reálného procesu lití, toto bude podrobněji vysvětleno v samostatné podkapitole.

Definice materiálů

Při vytváření projektu jste se museli rozhodnout, který materiál bude simulován. V důsledku toho jsou během procesu definování materiálu k dispozici pouze odpovídající slitiny. V případě potřeby můžete okamžitě upravit složení slitiny v dialogu „Material Definitions“ (v závislosti na dostupných licencích) a zadat libovolnou počáteční teplotu (teplotu lití).

Všechny parametry jsou uloženy pro aktuální projekt a znovu nabízeny v následujících verzích. Změny, např. chemické složení slitiny, **nezmění** datový materiál v databázi. Bílá barva pozadí označuje, že hodnota byla ručně změněna. Všechny hodnoty pocházející z databáze nebo navržené softwarem jsou zvýrazněny oranžovou barvou.

Funkce „Column Dialog“ v kontextové nabídce pravého tlačítka myši umožňuje zobrazit další data z databáze.



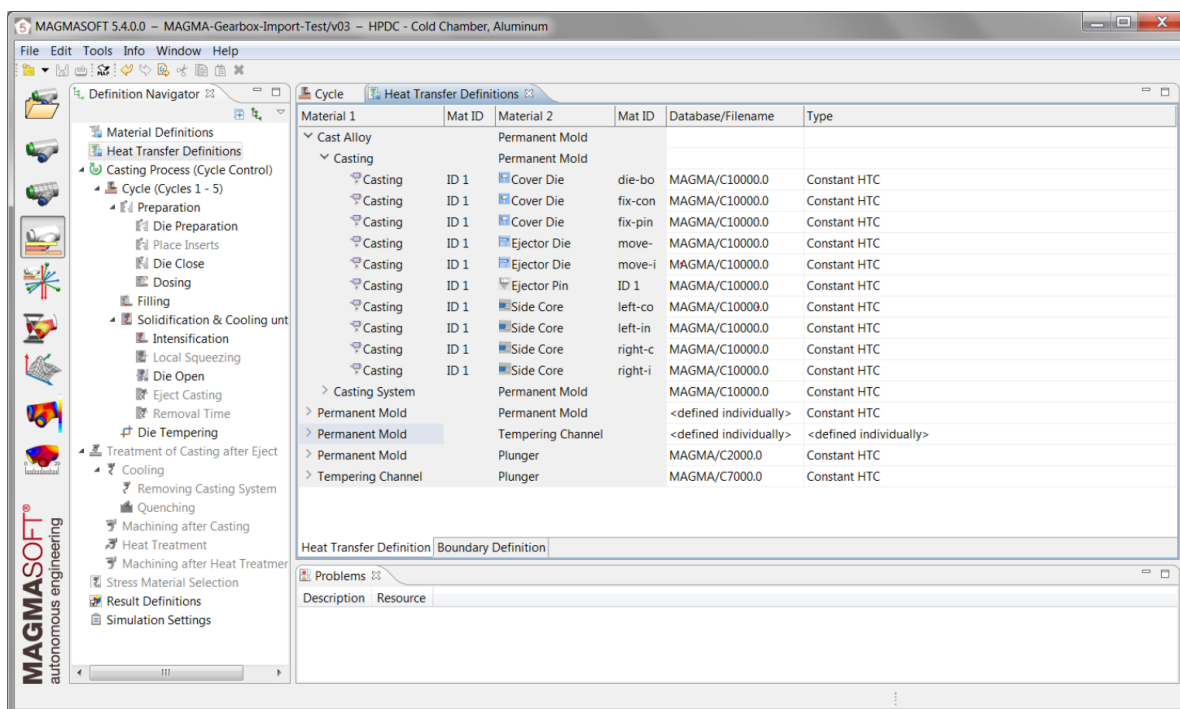
Obrázek – Zobrazení určení materiálů

Definování koeficientů přestupu tepla

Koeficienty přestupu tepla (HTC) popisují intenzitu přenosu tepla na rozhraní dvou látek. Potřebujete různé HTC, protože HTC jsou určovány vlastnostmi použitých materiálů, vlastnostmi povrchu a teplotními efekty.

Při lití do písku a vysokotlakého lití je k dispozici „HTC Template“. V této šabloně je definováno mnoho materiálových dvojic; proto pro nejběžnější kombinace materiálových dvojic se koeficienty přestupu tepla nastavují automaticky. Šablonu HTC můžete kdykoli přizpůsobit svým potřebám. Vzhledem k velkému množství variant nejsou předdefinované HTC k dispozici pro všechny možné kombinace materiálů v MAGMASOFT®. V těchto případech musíte HTC nastavit ručně nebo je definovat prostřednictvím své individuálně vytvořené HTC šablony. Vezměte prosím na vědomí, že výpočet může být zahájen až poté, co jsou všechny HTC k dispozici a jsou nastaveny.

Pro gravitační lití do kovové formy není v MAGMASOFT® k dispozici žádná šablona HTC. Je to kvůli skutečnosti, že nelze použít žádné výchozí parametry pro kokilové lití z důvodu velké rozmanitosti materiálů. Již jen použití různých povlaků (materiál, tloušťka, četnost atd.) znemožňují přiřazení standardizovaných parametrů.



Obrázek – Určení koeficientů přestupu tepla

Stejně jako u materiálových definic, funkce „Column Dialog“ v kontextové nabídce pravého tlačítka myši umožňuje zobrazit další data z databáze.

Typické koeficienty přestupu tepla pro gravitační lití do pískové formy, vysokotlakého lití a lití do kokil uvádí následující tabulky.

Tabulka – Typické koeficienty přestupu tepla pro lití do pískových forem

Rozhraní	HTC [W/m ² K]	Magma databáze	Typ
Sand core/sand mold	800	C 800	Konstantní
Sand mold/sand mold	800	C 800	Konstantní
Casting/sand mold	400-800 104-940	Al – Sand Steel – Sand	Závislá na teplotě
Iron/sand mold	300-800	Templron	Závislý na teplotě
Chill/casting	1000-1250		Konstantní
Chill/sand mold	800		Konstantní
Insulation/feeder	800		Konstantní
Insulation/sand mold	800		Konstantní
Air cooling – stagnant air	75		Konstantní
Air cooling – flowing air	400		Konstantní
Conducting black coating	1630		Konstantní

Tabulka – Typické koeficienty přestupu tepla při vysokotlakém lití

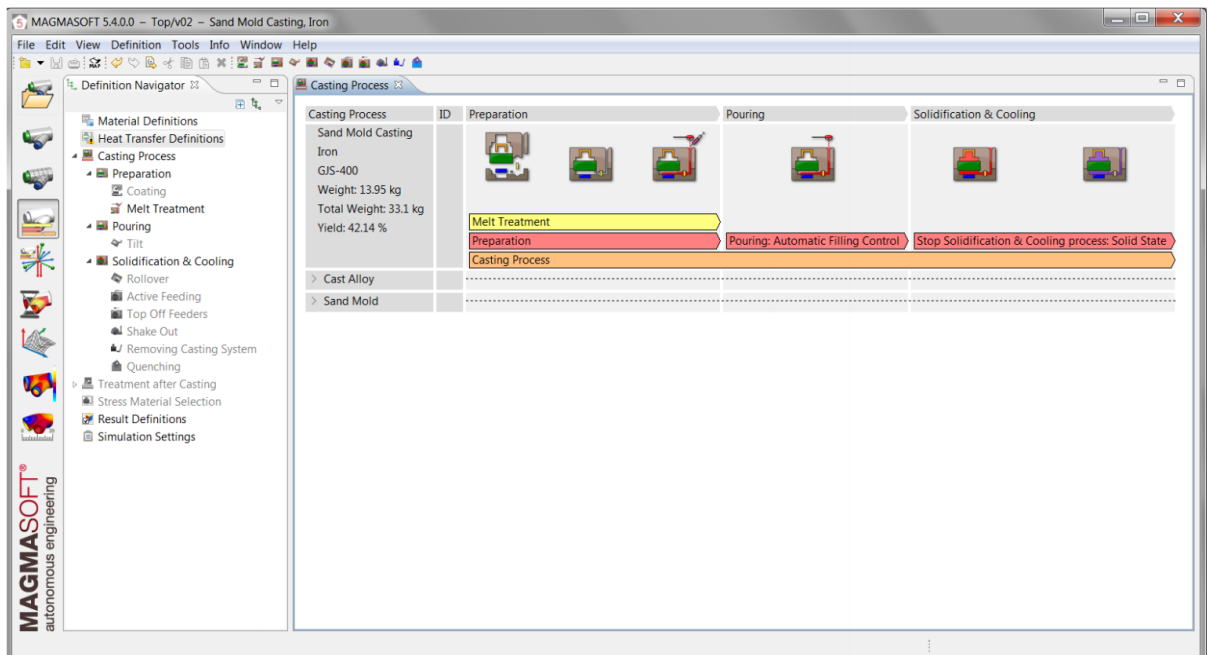
Rozhraní	HTC [W/m ² K]	Magma databáze	Typ
Die/shot chamber	10000	MAGMA	Konstantní
Casting/insert	10000	MAGMA	Konstantní
Die/insert	1500	MAGMA	Konstantní
Squeeze stamp/squeeze volume	10000	MAGMA	Konstantní
Die/squeeze volume	10000	MAGMA	Konstantní
Dien/plunger	2000	MAGMA	Konstantní
Casting/plunger	10000	MAGMA	Konstantní
Temperature control channel/plunger	7000	MAGMA	Konstantní
Casting/die	10000	MAGMA	Konstantní
Fixed part of the die/side core	2000	MAGMA	Konstantní
Movable part of the die/side core	2000		
Die/die	3500	MAGMA	Konstantní
Casting systém/plunger	10000	MAGMA	Konstantní

Tabulka – Typické koeficienty přestupu tepla při lití do kokil

Rozhraní	HTC [W/m ² K]		Magma databáze	Typ
	Teplota Solidu	Teplota Likvidu		
Die/die	800	800	C 800	Konstantní
Die/sand core	300	300	C 800	Konstantní
Die/casting – no coating	1000	2500		Závislý na teplotě
Die/casting – white coating – very thin	420	870		Závislý na teplotě
Die/casting – white coating – thin	400	810		Závislý na teplotě
Die/casting – white coating – thick	380	570		Závislý na teplotě
Die/casting – white coating – very thick	360	510		Závislý na teplotě
Melt/sand core – graphite	500	2000		Závislý na teplotě
Melt/sand core – furan	400	1000		Závislý na teplotě
Melt/sand core – „cold box“	500	1200		Závislý na teplotě
Sand core/sand core	200	200	C 200	Konstantní
Water cooling – flowing water	6000	6000	C 6000	Konstantní
Oil tempering – flowing oil	1000	1000	C 1000	Konstantní
Air cooling – stagnant air	75	75	C 75	Konstantní
Air cooling – flowing air	400	400	C 400	Konstantní

Definice plnění/lití

Pracovní okno „Casting Process“ poskytuje přehled o úplném procesu odlévání, od přípravy formy, plnění formy, až po tuhnutí a ochlazování odlitku.



Obrázek – Procesní okno pro gravitační lití do pískových forem

V zásadě máte čtyři různé možnosti, jak definovat plnění formy za předpokladu, že jste vytvořili v *Geometry Perspective* geometrii s materiálovým ID pro „Inlet“ (vstup tekutého kovu):

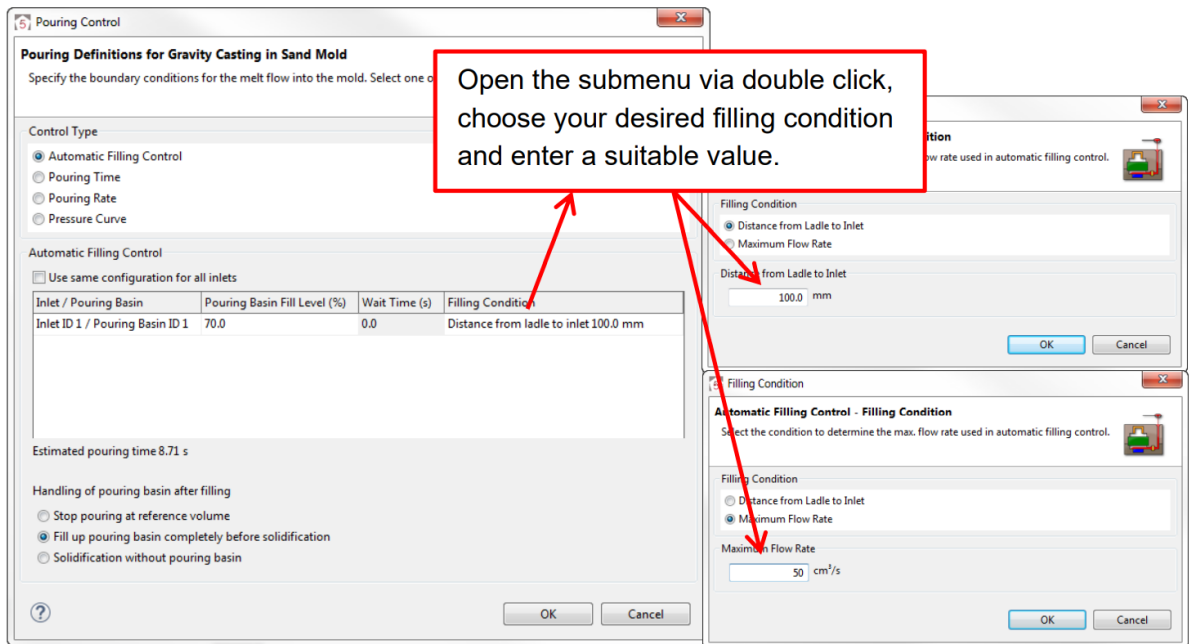
1. „Automatic Filling Control“ (automatické plnění)

Tato možnost plnění vyžaduje, aby v geometrickém 3D modelu byla vytvořena geometrie s přiřazeným materiálovým ID „Pouring Basin“ (licí jamka) a „Inlet“. V dialogovém okně do pole „Distance from Ladle to Inlet“ zadejte výšku proudu kovu nad jamkou tzn. vzdálenost mezi licí pávní a vrškem licí jamky v mm (lití na hubičku). Pro druhou variantu „Maximum Flowrate“ definujte hodnotu objemového průtoku, při kterém má být zahájen proces plnění (viz obrázek 88).

V poli „Pouring Basin Fill Level %“ můžete uvést procento hladiny, které má být během plnění formy trvale udržováno v licí jamce.

Ve spodní části dialogového okna můžete určit, jak zacházet s licí jamkou na konci plnění:

- Zastavit lití, jakmile licí jamka dosáhne 70 % úrovně naplnění.
- Na konci plnění naplnit licí jamku.
- Na konci plnění má být licí jamka prázdná.

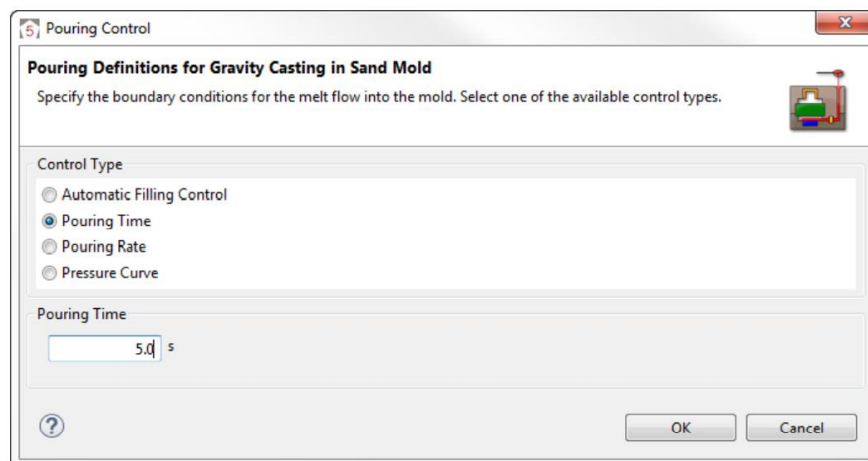


Obrázek – Určení plnicího procesu s použitím Automatic Filling Control

2. „Pouring Time“

Chcete-li definovat proces plnění pomocí doby lití, zadejte v dialogovém okně čas v sekundách. Na základě této definice a objemu, který má být naplněn, se vypočítá konstantní objemový průtok pro plnění formy.

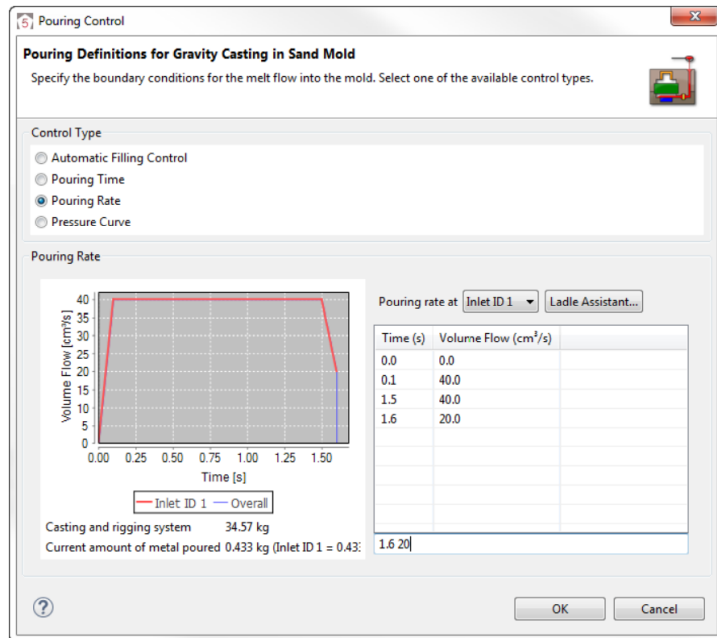
Upozornění: Pokud je doba lití příliš nízká a lící jamka se kompletně „zaplní“, MAGMASOFT® začne plnit formu tlakem, aby bylo zajištěno, že celý proces plnění proběhne v definované době odlévání. Prosím ujistěte se, že nastavená lící doba opravdu odpovídá reálnému času plnění.



Obrázek – Definice procesu plnění s použitím Pouring Time

3. „Pouring Rate“

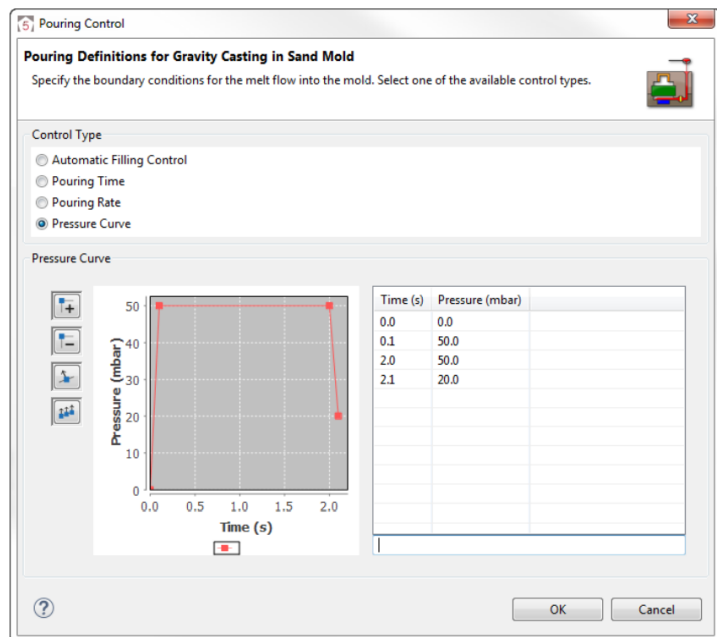
Při definování procesu plnění pomocí „Pouring Rate“ průběh lití definujete jako objemový průtok za jednotku času. Chcete-li to provést, zadejte do pole pod tabulkou dvojice hodnot oddělené prázdnou mezerou a potvrďte každou z nich 'OK'. Posledně zadaná položka je zachována až do konce procesu plnění. Funkce „Ladle Assistant“ je vysvětlen dále v textu.



Obrázek – Definování plnicího procesu s použitím „Pouring Rate“

4. „Pressure Curve“

Při definování procesu plnění pomocí proměnné přetlakové křivky definujete tlak v inletu na základě času. Zadání hodnotových párů je podobné definici rychlosti nalévání (viz výše).

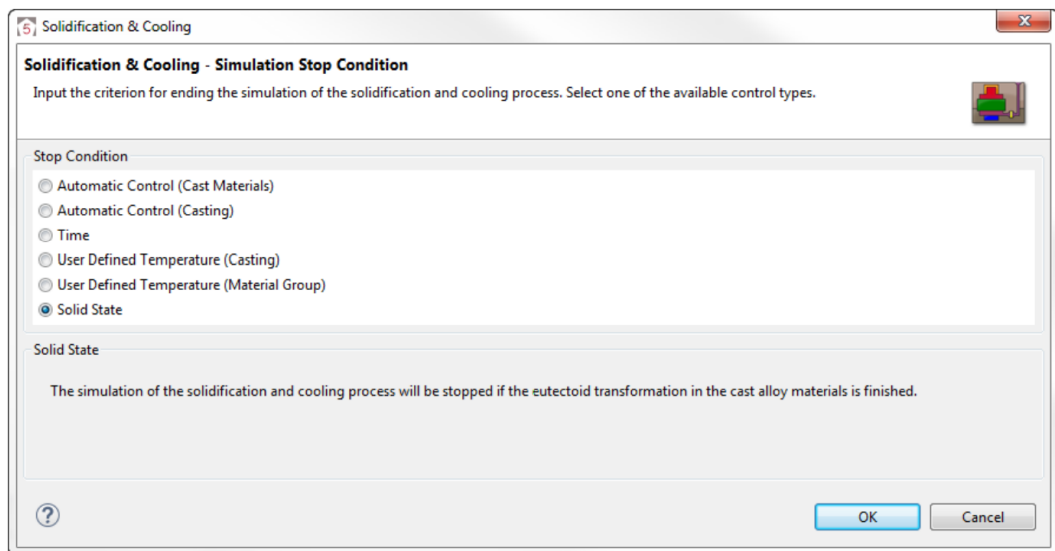


Obrázek – Definování plnicího procesu pomocí proměnné Pressure Curve

Definice tuhnutí a ochlazování

Zde je možné určit, kdy bude ukončena simulace tuhnutí a chladnutí („Solidification and Cooling“).

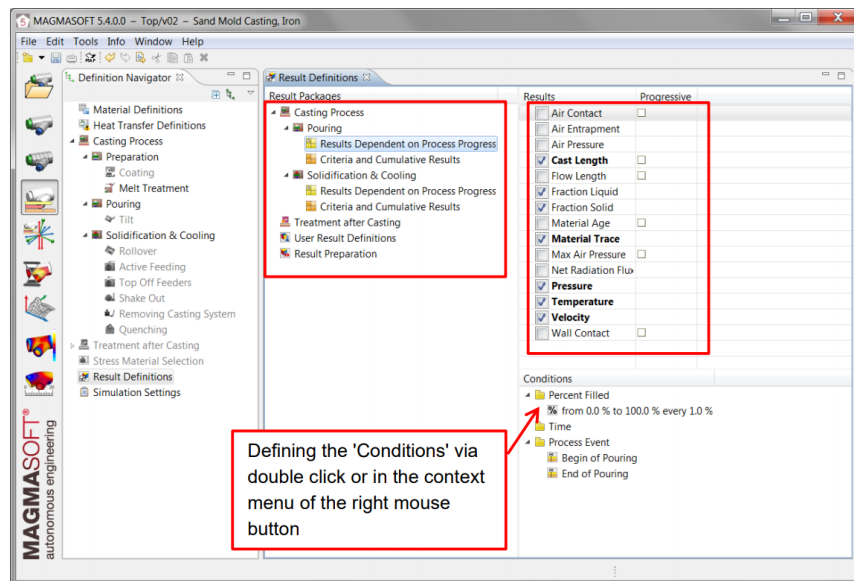
- „**Automatic Control (Cast Materials)**“: Simulace se zastaví, jakmile teplota ve všech materiálech zaplněných tekutým kovem klesne pod teplotu solidu.
- „**Automatic Control (Casting)**“: Simulace se zastaví, jakmile teplota v odlitku klesne pod teplotu solidu.
- „**Time**“: Simulace se zastaví, jakmile je dosažen definovaný čas.
- „**User Defined Temperature (Casting)**“: Simulace se zastaví, jakmile teplota v odlitku klesne pod teplotu, kterou si zvolil uživatel. Zde si můžete vybrat teplotu pro kompletní odlitek, nebo teplotu v určitém bodě. Za tímto účelem musíte v tomto bodě definovat termočlánek v geometrické perspektivě.
- „**User Defined Temperature (Material Group)**“: Simulace se zastaví, jakmile teplota v definované skupině materiálů klesne pod vámi definovanou teplotu.
- „**Solid State**“: Simulace se zastaví, jakmile proběhnou všechny eutektoidní transformace.



Obrázek – Podmínka ukončení simulace tuhnutí a chladnutí

Definice výsledků

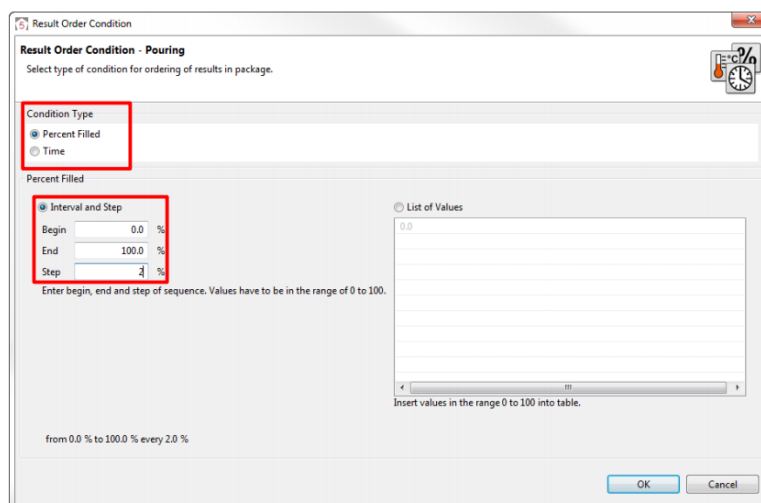
V MAGMASOFT® můžete výsledky definovat velmi individuálně. Za tímto účelem přejděte do *Definition navigator* > *Result Definition* v *Definition Perspective*.



Obrázek – Definice výsledků pro lití do pískových forem

Ve výchozím nastavení jsou důležité výsledky dodávány automaticky. Kromě těchto výsledků můžete také definovat další výsledky. V MAGMASOFT® jsou tyto definice výsledků strukturovány podle následujících kroků procesu: „Pouring“ (lití), „Solidification and Cooling“ (tuhnutí a chladnutí).

Ve skupině „Result Dependent on Process Progress“ (výsledky v závislosti na fázi procesu) najdete ty výsledky, které se zapisují v různých časových okamžicích. Vy určujete, kdy přesně budou výsledky zapsány specifikací parametru „Condition“. Typickým výsledkem pro takovou výslednou sekvenci je například teplota taveniny v průběhu plnění. Je na vás, abyste se rozhodli, zda chcete získat výsledek ve specifikovaném čase nebo v určité hodnotě procentuálního zaplnění dutiny formy.



Obrázek – Podmínky pro zápis výsledků

Upozornění:

Pokud v definicích výsledků zmenšíte velikost kroku, zaberou výsledky více paměti na disku. Navíc to může také vést k minoritnímu prodloužení doby výpočtu.

Výsledky, které program vždy poskytuje, jsou zobrazeny tučně. Nezapomeňte zaškrtnout políčka těch výsledků, které chcete dodatečně vypočítat.

Kritéria jako „Flow Length“ nebo „Porosity“ mohou být volitelně zapsána na konci simulačního výpočtu jako jediný výsledek nebo jako výsledková sekvence během výpočtu. Za tímto účelem zaškrtněte políčko u daného kritéria („Progressive“).

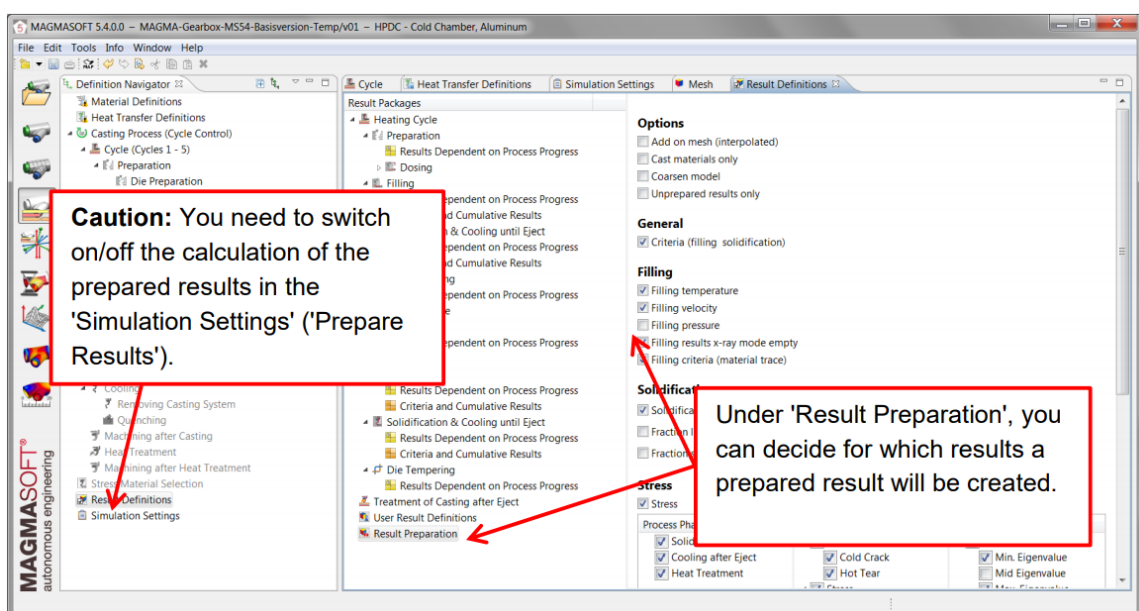
Pokud definujete speciální výsledky, jako je například „Shake Out“ při lití do pískové formy, software automaticky vytvoří odpovídající definice výsledků na základě vašich nastavení.

V rámci skupiny „Criteria and Cumulative Results“ jsou shrnuty výsledky, pro které nelze stanovit další podmínky. Tyto výsledky jsou nezávislé na čase a jsou zapsány na konci výpočtu.

Result Preparation (příprava výsledků)

Aby bylo při vyhodnocování výsledků simulace možné pracovat rychleji, je vhodné nechat výsledky připravit na konci simulačního výpočtu pro jejich vizuální kontrolu v **Result Perspective**. Za tímto účelem jsou všechny výsledky automaticky převedeny, odpovídajícím způsobem připraveny a uloženy jako další výsledky do složky mezipaměti odpovídající verze na pevném disku. Tyto připravené výsledky jsou již zpracovány pro jejich zobrazení v mnohem menší velikosti než původní výsledky, což vám umožní rychle otevřít a odpovídajícím způsobem je zobrazit. Tento programový krok doporučujeme také aktivovat, pokud si přejete pracovat s animovanými sekvencemi obrázků později v **Result Perspective**.

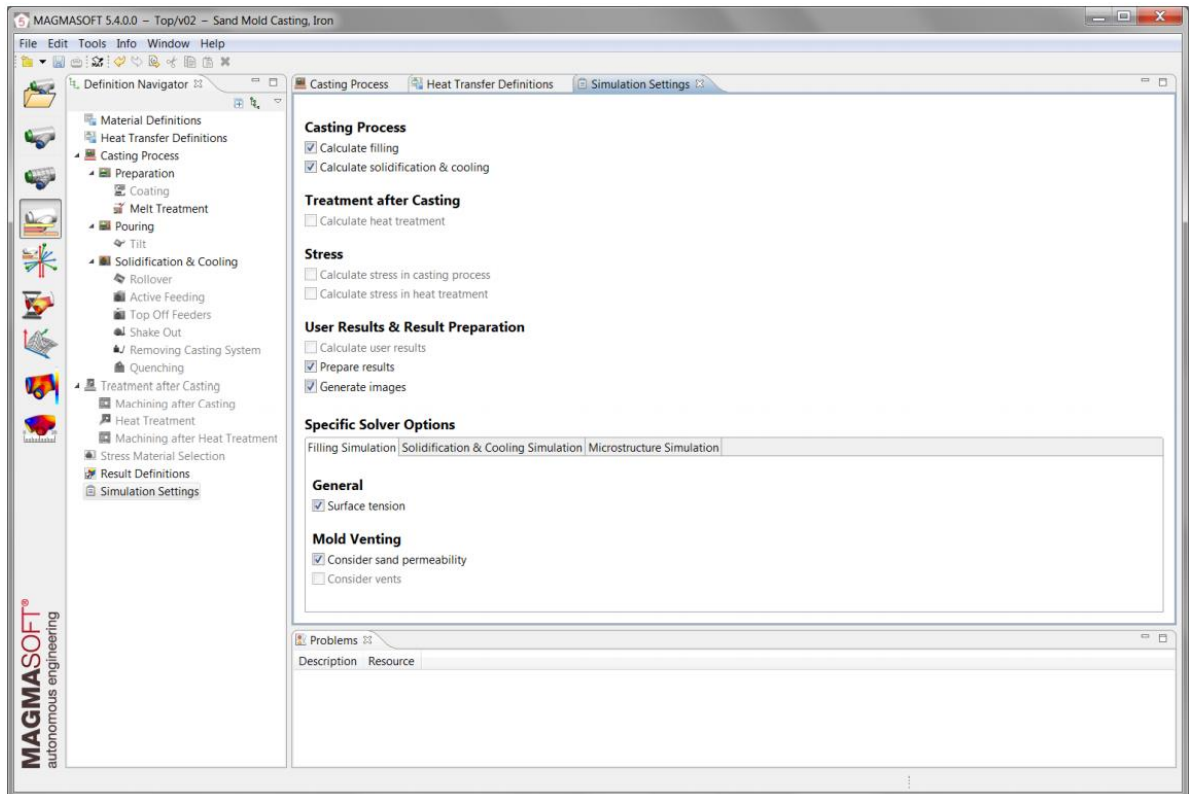
V *Definition navigator* > *Result Definitions* > *Result Preparation* můžete vybrat typy výsledků, které chcete připravit.



Obrázek – Určení připravených výsledků

Simulation Settings (nastavení simulace)

Zkontrolujte, zda jsou všechna nastavení simulace nastavena podle plánu. V případě, že jednotlivé procesní kroky nejsou aktivovány, může to být způsobeno tím, že parametry nebyly přiřazeny vůbec nebo pouze nesprávně. V tomto okamžiku můžete také zpětně deaktivovat jednotlivé kroky procesu. Možnosti výběru se liší pro lití do písku a trvalých forem.



Obrázek – Nastavení simulace pro lití do pískových forem

10.5 Kontrolní otázky

1. Jaké operace probíhají v Definition Perspective?
2. Co popisují koeficienty přestupu tepla (HTC)?
3. V jakých rozmezích se zhruba pohybují koeficienty přestupu tepla mezi litinovým odlitkem a pískovou formou?
4. Za jakých podmínek je možné použít funkci Automatic Filling Control?
5. Lze ukončení simulace tuhnutí materiálu definovat automaticky na základě teploty solidu?
6. K čemu slouží Result Preparation?

10.6 Doporučená studijní literatura

Problematiku k dané kapitole naleznete na stránkách uvedených za publikací.

- Basic Training: MAGMASOFT 5.4.1. Aachen: MAGMA GmbH, 2020, 150 s.

11 Kapitola: Spuštění simulace

11.1 Klíčová slova

MAGMASOFT[®], processing, spuštění simulace

11.2 Cíle kapitoly

Tato kapitola poskytuje návod ke spuštění výpočtu v SW MAGMASOFT[®].

11.3 Úvod do kapitoly

V perspektivě simulace, vám MAGMASOFT[®] nabízí možnost zobrazení, kontroly a také ovlivnění všech důležitých informací ohledně vašeho výpočtu. Mimo jiné zde můžete začít simulaci a optimalizaci, stanovit počet výpočetních jader procesoru, začít výpočet více simulací najednou, nebo zobrazit a zkontrolovat průběh výpočtů. V následujícím textu jsou popsány jednotlivé funkce do detailu.

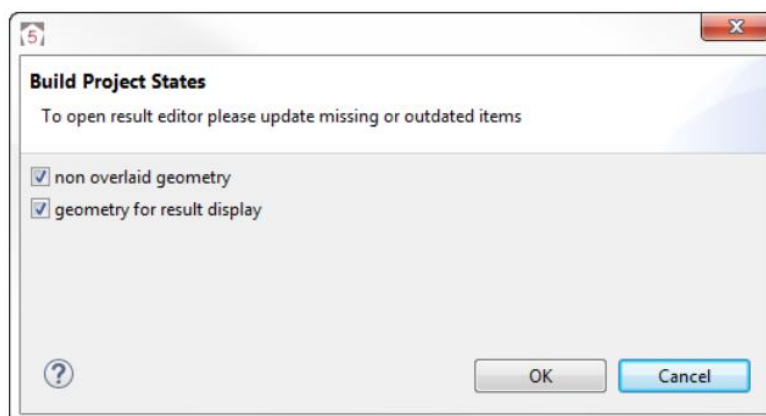
11.4 Výklad

Simulation Perspective

Při prvním otevření perspektivy simulace ve verzi se zobrazí dialogové okno. Zde se zobrazí dotaz, zda mají být předem provedeny další operace:

- „non overlaid geometry“: Aktualizuje Booleovské operace pro simulační model (odpovídající Aktualizaci Booleovských objektů perspektivě Geometrie)
- „geometry for results display“: Vytvoří geometrický model, který je nutný pro zobrazení výsledků.

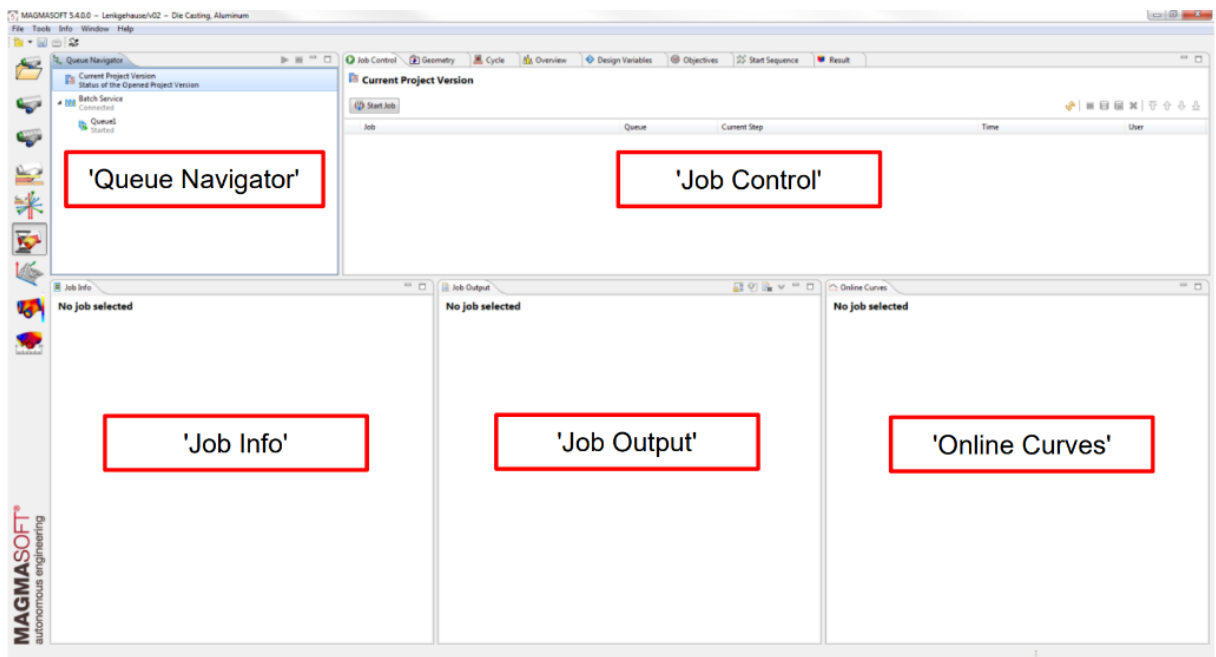
Chcete-li zajistit, aby 3D výsledky byly správně zobrazeny na simulačním modelu, měli byste vždy zaškrtnout provedení výše uvedených operací.



Obrázek – Dialogové okno předtím, než se otevře simulační perspektiva

Na obrázku je zobrazené uživatelské rozhraní pro simulační perspektivu. Zde je pět oddělených pracovních oken.

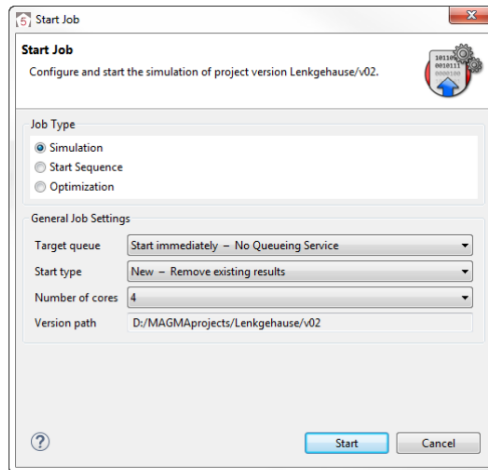
- „Queue Navigator“: Zde můžete spouštět a řídit frontu úloh pro výpočet několika simulací.
- „Job Control“: Zde najdete tlačítka a nabídky pro spuštění a ovládání simulace.
- „Job Info“: Zde najdete obecné informace o vaší simulaci, například čas zahájení, trvání a stav a pro optimalizaci tabulky designů.
- „Job Output“: Zde máte přístup ke komplexnímu protokolu výpočtu simulace.
- „Online Curves“: Zde si můžete zobrazit spuštěnou simulaci pomocí diagramu. Ukazuje teplotní grafy simulace jako funkce času a ukazatele průběhu simulace.



Obrázek – Uživatelské rozhraní pro Simulační perspektivu

Start Simulace

Chcete-li spustit simulaci, vytvořte novou úlohu („job“) výpočtu pomocí funkce „Start Job“. Nejprve určete, jaký typ úlohy chcete spustit, v dialogu „Start Job“ pod „Job Type“. Chcete-li okamžitě zahájit simulaci, nejprve vyberte jako typ úlohy „Simulation“. „Target Queue“ vám umožňuje zvolit, zda má být výpočet spuštěn okamžitě nebo zda má být místo toho přidán do fronty. Chcete-li zahájit výpočet najednou, vyberte možnost „Start Immediately – No Queueing Service“. V části „Number of Cores“ uveďte počet jader procesoru, která se mají použít pro výpočet. Počet použitelných jader závisí na vaší licenci MAGMASOFT® a dostupném hardwaru. Pokud můžete použít několik procesorů, proveďte správný výběr zde. Kliknutím na „Start“ zahájíte výpočet simulace okamžitě.

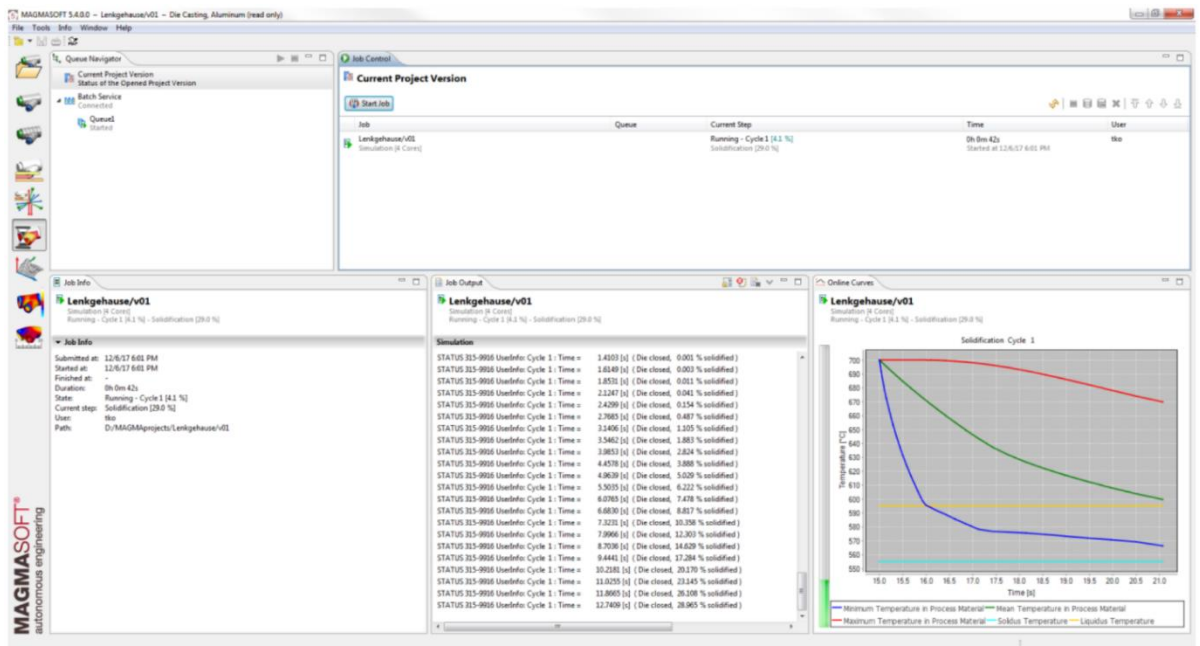


Obrázek – Dialogové okno "Start Job"

Výpočet simulace se spustí po odeslání úlohy do fronty. Pokud vyberete svou aktuální úlohu v nabídce „Job Control“ dvojitým kliknutím, uvidíte všechny relevantní informace o vaší simulaci a můžete ji revidovat.

Tlačítka mají následující funkci:

- **Refresh:** Provádí automaticky jednou za tři sekundy.
- **Continue Job:** Přímo restartuje pozastavené projekty ve frontě.
- **Stop running job:** Zastaví výpočet.
- **Dump running job:** Uloží aktuální stav výpočtu simulace. Simulace se nezastaví a bude pokračovat. Data vašeho aktuálního výpočtu budou uložena až do „dumpingového“ bodu v čase. To může být užitečné, pokud je mezitím simulace přerušena chybou nebo úmyslně zastavena. (toto tlačítko je aktivní pouze pro simulace, ne optimalizaci)
- **Dump and stop running job:** (toto tlačítko je aktivní pouze pro simulace ne optimalizaci): Tuto funkci můžete použít k uložení simulačních dat jako u „Dump running job“ a navíc simulaci správně zastavit.
- **Kill running job:** Výpočet bude přerušen. Dosud vypočítané výsledky nebudou uloženy (ve vyrovnávací paměti) a výpočet nelze obnovit.
- **Enable/Disable the Scroll Lock:** Nepřetržité záznamy zapsané během výpočtu pod „Job Output“ jsou zastaveny nebo obnoveny. Položky si můžete prohlédnout postupně.
- **Show only Errors and Warnings** Položky „Job Output“ jsou filtrovány pouze na chyby a upozornění.
- **Clear the message area:** Všechny „Job Output“ vstupy jsou smazány.
- **Select the logfile for an optimization:** Pro optimalizace nebo začátek sekvence, můžete přepnout mezi vstupy nebo jednotlivými návrhy.



Obrázek – Perspektiva simulace během simulace

11.5 Kontrolní otázky

1. K čemu slouží Simulation Perspective?
2. Jaké informace je možné získat v Simulation Perspective?
3. Je možné v MAGMASOFT® řadit výpočty do fronty?
4. Je možné volit na kolika jádrech procesoru bude výpočet probíhat?
5. Lze přerušenu simulaci restartovat z tzv. dumpingového bodu?

11.6 Doporučená studijní literatura

Problematiku k dané kapitole naleznete na stránkách uvedených za publikací.

- Basic Training: MAGMASOFT 5.4.1. Aachen: MAGMA GmbH, 2020, 150 s.

12 Kapitola: Hodnocení výsledků simulace

12.1 Klíčová slova

MAGMASOFT[®], postprocessing, výsledky plnění, výsledky tuhnutí

12.2 Cíle kapitoly

Cílem kapitoly je poskytnout přehled o dostupných výsledcích a vysvětlit základy vizualizace a hodnocení výsledků v programu MAGMASOFT[®].

12.3 Úvod do kapitoly

V následující kapitole jsou popsány základní funkce *Result Perspective* (perspektiva výsledků). Zde je kladen větší důraz na popis výsledků než na vyhodnocování. I když výpočet simulace stále běží, můžete kdykoli otevřít perspektivu výsledků a zobrazit dosud vytvořené výsledky.

12.4 Výklad

Result Perspective

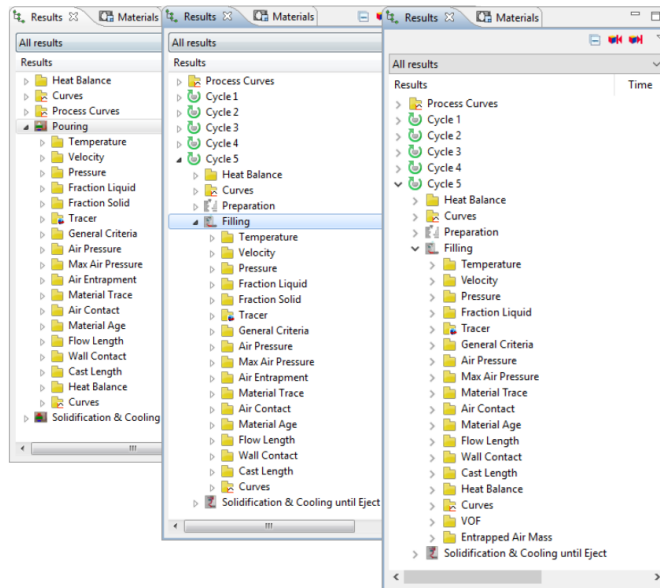
Po otevření perspektivy výsledků se všechny dostupné výsledky zobrazí na kartě „Results“. V seznamu výsledků jsou výsledky rozděleny do následujících hlavních skupin:

- „Heat Balance“ (tepelná rovnováha),
- „Process Curves“ (procesní křivky),
- „Preparation“ (příprava formy; nedostupná při lití do pískových forem),
- „Pouring/Filling“ (výsledky plnění),
- „Solidification and Cooling“ (výsledky tuhnutí).

Způsob uspořádání výsledků závisí na zvoleném procesu. V procesech lití do trvalé formy jsou výsledky přiřazeny odpovídajícím cyklům. Výsledky přípravy formy jsou navíc zobrazeny v samostatné složce. Při lití do pískové formy se rozlišuje mezi výsledky plnění a tuhnutí.

Výsledky plnění

Počet zobrazených složek výsledků závisí na zvolených výsledcích, které jste provedli v *Definition Perspective*. Výsledkem plnění jsou „**Temperature**“ (teplota), „**Velocity**“ (rychlost), „**Pressure**“ (metalostatický tlak) a „**Tracer**“ (trasovací částice v tavenině).



Obrázek – Seznam výsledků plnění: lití do pískové formy (vlevo), lití do trvalé formy (uprostřed), vysokotlaké lití(vpravo)

Kromě těchto výsledků existují i kritéria plnění. Ta budou vypočítána až po dokončení simulace plnění. Najdete je shrnuté ve skupině „**General Criteria**“. Těmito kritérii jsou například „**Filling time**“ (čas plnění), „**Mold Erosion**“ (eroze formy) a „**Sand Inclusion Area Fraction**“ (rozložení pískových vměstků).

Mezi další výsledky a kritéria, které můžete definovat, patří například: „**Air Pressure**“ (tlak vzduchu), „**Material Trace**“ (plnění přes jednotliví zářezy), „**Air contact**“ (kontakt taveniny se vzduchem), „**Material age**“ (stáří materiálu), „**Flow Length**“ (délka toku ze vstupu), „**Wall Contact**“ (Kontakt taveniny se stěnou formy), „**Cast Length**“ (délka lití od zářezu) a „**Max. Air Pressure**“ (maximální tlak vzduchu). Nakonec výsledky také obsahují křivky („**Curves**“).

V následující části jsou stručně popsány jednotlivé výsledky:

- „**Temperature**“ (**teplotní pole**): Tento výsledek ukazuje rozdělení teploty ve vybrané skupině materiálů během odlévání/plnění v určitém čase. Teploty jsou uvedeny v °C v barevné škále.
- „**Velocity**“ (**rychlostní pole**): Tento výsledek ukazuje rychlosti, které existují v určitém čase v tavenině. Rychlosti jsou zobrazeny v m/s v barevné škále.
- „**Pressure**“ (**Metalostatický tlak**): Tento výsledek ukazuje rozdělení tlaku v tavenině během plnění v určitém čase. Rozložení tlaku je znázorněno v mbar (bar při vysokotlakém lití do formy) v barevné škále.
- „**Fraction Liquid**“ (**podíl tekuté fáze**): Tento výsledek ukazuje místní procento tekuté taveniny v určitém časovém okamžiku během plnění. Tento výsledek ukáže něco, pouze pokud teplota taveniny během procesu plnění klesne pod teplotu likvidu. Díky tomuto výsledku můžete identifikovat předem ztuhlé oblasti. Frakce je uvedena v %.
- „**Fraction Solid**“ (**podíl tuhé fáze**): Tento výsledek ukazuje místní procento ztuhlé taveniny v určitém časovém okamžiku během plnění. Tento výsledek ukáže něco, pouze pokud teplota

taveniny během procesu plnění klesne pod teplotu likvidu. Díky tomuto výsledku můžete identifikovat předem zpevněné oblasti. Frakce je uvedena v%.

- **„Tracer“ (trasovací částice):** Výsledky částicových tras se načítají jako animace. Tato funkce umožňuje sledovat pohyb částic v tavenině. Standardní stopovací částice nemají žádnou hmotu, a tak indikují pohyb toku taveniny. Částicím však můžete také přiřadit hustotu a průměr, abyste jim umožnili pohybovat se v toku taveniny v závislosti na jejich hmotnosti. To vám umožní vizualizovat nejen částice taveniny, ale také částice vzduchu nebo písku v proudu kovu. Kromě toho si můžete vybrat z různých možností zobrazení, jako je „Age“ (věk částice), „Path Length“ (dráha částic) nebo „Pressure“ (tlak) atd. (**Poznámka:** Možnosti zobrazení se liší v závislosti na zvoleném procesu). Stopové částice musí být definovány předem v *Geometry Perspective*.
- **„Air Pressure“ (přetlak vzduchu):** Výsledek „Air pressure“ označuje tlak vzduchu v dosud nezalitých oblastech. V závislosti na počtu definovaných výsledků, s tímto výsledkem můžete jasně vidět, jak se vzduch vytlačuje taveninou a jak tlak zahlceného vzduchu neustále roste. Tlak vzduchu je udáván v barech.
- **„Max. Air Pressure“ (maximální tlak vzduchu):** Tento výsledek označuje maximální tlak vzduchu (viz výsledek „Air Pressure“), který se vyskytuje v průběhu celého plnění pro všechny oblasti dutiny formy.
- **Lití do pískové/trvalé formy: „Air Entrapment“ (koncentrace uzavřeného vzduchu):** Výsledek „Air Entrapment“ ukazuje procento zachyceného vzduchu v tavenině. Vypočítá se od okamžiku „naplněný kontrolní objem“ a ukazuje, kde a do jaké míry je zachycený vzduch distribuován v proudu taveniny. Pro kvantitativní vyhodnocení tohoto výsledku musíte zvážit, zda v daném okamžiku převládal v dané oblasti vysoký nebo nízký tlak vzduchu. Koncentrace zahlceného vzduchu je uvedena v %.
- **„Material Trace“ (plnění přes jednotlivé zářezy):** Tento výsledek ukazuje, ze kterého zářezu jsou vyplněny dané oblasti odlitku. To znamená, že tavenina protékající zářezem 1 je například zobrazena červeně, zatímco tavenina protékající zářezem 2 je například zobrazena bíle. Na základě výsledného míchání barev v odlitku můžete vidět, ze kterého vtoku byla tavenina primárně přiváděna. Oblasti s velmi podobnými barvami označují menší míchání taveniny, zatímco oblasti s výrazně odlišnými barvami v přechodové zóně naznačují silné promíchání taveniny. Chcete-li získat tento výsledek, musíte předem přiřadit různá materiálová ID k zářezům v perspektivě geometrie.
- **„Air Contact“ (kontakt se vzduchem):** Tento výsledek ukazuje, průměrnou dobu, kdy byl povrch taveniny během plnění v přímém kontaktu se vzduchem. Prvky s vysokými hodnotami představují největší nebezpečí tvorby oxidů. Výsledek je zobrazen v sekundách.
- **„Material Age“ (stáří kovu):** Tento výsledek ukazuje „stáří“ taveniny v každém naplněném elementu. Materiál přicházející z „Inletu“ vždy začíná s „věkem“ materiálu nula. „Stáří“ taveniny v odlitku je uvedeno v sekundách.
- **„Flow Length“ (dráha lití od licí jamky):** Tento výsledek ukazuje délku toku taveniny od licí jamky. Délka toku je uvedena v mm.

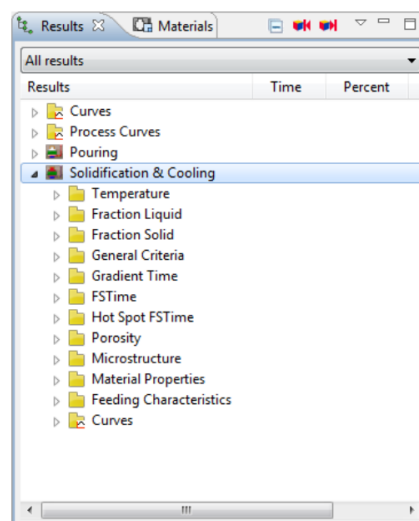
- „**Cast Length**“ (délka lití od vstupu): Tento výsledek ukazuje délku toku taveniny od vstupu. Délka průtoku je uvedena v mm.
- „**Filling Temperature**“ (teplota čela taveniny): Tento výsledek ukazuje, při které teplotě je buňka poprvé naplněna. Teplota plnění je zobrazena v °C.
- „**Filling Time**“ (čas plnění): Tento výsledek ukazuje, po jaké době je buňka poprvé naplněna. Doba plnění je zobrazena v sekundách.
- „**Filling Velocity**“ (rychlost taveniny): Tento výsledek ukazuje, při jaké rychlosti je buňka naplněna poprvé. Rychlost plnění je zobrazena v m/s.
- „**Mold Erosion**“ (eroze formy): Tento výsledek ukazuje erozi na povrchu formy způsobenou příliš vysokou rychlostí taveniny. Tento výsledek je zobrazován pouze na materiálu formy.
- „**Sand Inclusion Area Fraction**“ (Rozložení pískových vměstků – pouze pro lití do pískových forem): Tento výsledek je zobrazen na povrchu, a ukazuje, kde všude můžete očekávat povrchové vady způsobené pískovými vměstkami.

Výsledky tuhnutí

Počet zobrazených výsledků závisí na tom, jak si uživatel daný projekt zadefinoval. Neboli jaké výsledky a kritéria předem určil v *Definition Perspective*, že chce spočítat a zobrazit. Výsledky tuhnutí jsou „**Temperature**“ (teplotní pole), „**Fraction Liquid**“ (podíl tekuté fáze) a „**Fraction Solid**“ (podíl tuhé fáze).

Jednotlivá kritéria pro simulaci tuhnutí se nachází ve složce „**General Criteria**“. Tato skupina obsahuje různé výsledky. V následujícím textu jsou zmíněny pouze některé z nich: „**Soundness**“ (vnitřní zdravotnost odlitku), „**Niyama Criterion**“ (Niyamovo kritérium pro staženiny v teplotních osách odlitku), „**Feedmod**“ (teplotní modul), „**Solidification Time**“ (doba tuhnutí), „**Hot Spot**“ (teplotní uzly) a „**Gradient**“ (teplotní gradient).

Mezi další výsledky patří například „**Gradient Time**“ (teplotní gradient v čase), „**FSTime**“ (kritická hodnota tuhnutí), „**Hot Spot FSTime**“ (teplotní uzly + kritická hodnota tuhnutí) a „**Porosity**“ (porezita). Výsledky obsahují také „**Curves**“ (Křivky).



Obrázek – Seznam výsledků tuhnutí dostupných při simulaci lití do pískové formy

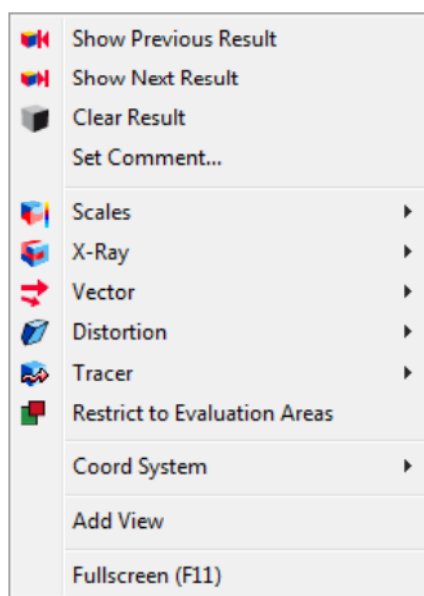
V následujícím textu, jsou jednotlivá kritéria stručně popsána:

- **„Temperature“ (teplotní pole):** Teplota tuhnutí ukazuje rozložení teplotních polí ve zvolených skupinách materiálů během tuhnutí v určitém čase. Teploty jsou uvedeny v ° C v barevné škále.
- **„Fraction Liquid“ (tekutá fáze):** Tento výsledek ukazuje místní podíl tekuté taveniny v určitém časovém okamžiku během tuhnutí. Podíl je uveden v % v barevné škále.
- **„Fraction Solid“ (tuhá fáze):** Tento výsledek ukazuje místní podíl tuhé fáze v určitém časovém okamžiku během tuhnutí. Podíl je uveden v % v barevné škále.
- **„Gradient Time“ (teplotní gradient v čase):** Jednotlivé výsledky ukazují lokální teplotní gradienty v odlitku v určitém čase. Jednotka této veličiny v pracovním prostoru je ° C/mm.
- **„FSTime“ (kritická hodnota tuhnutí):** Toto kritérium indikuje čas, který odlitek potřebuje pro dosažení kritického poměru tuhé fáze, aby bylo objemové dosazování zastaveno. Jinými slovy, v tento daný moment přestává odlitek dosazovat objemově a pokračuje v dosazování pouze mezi dendrity tuhé fáze. Důležitým parametrem pro tuto predikci je dosazovací schopnost dané slitiny, **“Feeding Effectivity”**. Tato hodnota v % je závislá na typu slitiny a její morfologii a vyjadřuje schopnost odlitku objemově dosazovat pouze do dosažení určitého % tuhé fáze. Potom odlitek již není schopen dobře dosazovat a v izolovaných “ostrůvcích” zbytkové taveniny se začnou tvořit staženiny.
- **„Hot Spot FSTime“ (teplotní uzly + kritická hodnota tuhnutí):** Na rozdíl od výsledku **„Hot Spot“** označuje výsledek **„Hot Spot FSTime“** teplotní uzly při dosažení kritického podílu tuhé fáze. Jednotky této veličiny jsou sekundy.
- **„Porosity“ (objemové staženiny):** Toto kritérium zobrazuje objemové staženiny uvnitř odlitku po ukončení tuhnutí. Na barevné stupnici je toto kritérium v %. 0 % = naprosto zdravý odlitek, 100 % = zcela porézní odlitek (prázdne místo).
- **„Soundness“ (zdravost odlitku):** Toto kritérium je obrácenou hodnotou Porosity (,Porosity“ 10 % = 90 % „Soundness“). Tento výsledek označuje množství chybějící taveniny v dané oblasti. 0 % = zcela porézní odlitek, 100 % = naprosto zdravý odlitek.
- **„Niyama Criterion“ (jenom pro lití do pískových forem):** Toto kritérium slouží pro posouzení vzniku a přítomnosti ředin a staženin v teplotních osách **ocelových** odlitků. Je založeno na vztahu mezi teplotním gradientem a rychlostí tuhnutí. Za pomoci tohoto kritéria lze predikovat řediny a staženiny, které vznikají neusměrněným charakterem tuhnutí a nízkým teplotním gradientem v tepelných osách odlitků.
- **„Feedmod“ (teplotní modul; pouze pro lití do pískových forem):** Tepelný modul vám pomůže pochopit teplotní podmínky v odlitku a vhodně umístit a dimenzovat nálitky. Zároveň díky tomuto kritériu lze ověřit míru usměrněného tuhnutí v odlitku.
- **„Solidification Time“ (doba tuhnutí):** Kritérium „Solidification Time“ ukazuje čas od začátku procesu plnění do okamžiku, kdy teplota klesne pod teplotu solidu. Toto kritérium se uvádí v sekundách.

- **„Hot Spots“ (teplotní uzly):** Toto kritérium predikuje oblasti, jejichž časy tuhnutí jsou značně odlišné od jejich okolí. Jinými slovy s pomocí teplotních uzlů jsou odhaleny oblasti, kde je zbytková tavenina plně obklopena chladnějším materiálem. V těchto místech pak hrozí vznik objemových staženin díky nedostatečnému dosazení tekutým kovem.
- **„Gradient“ (teplotní gradient):** Výsledek „Gradient“ můžete použít k zobrazení teplotního gradientu naznačující rychlost odvodu tepla. Jednotka měřítka v pracovním prostoru je °C/mm. Všechny výsledky, které zde nejsou uvedeny, jsou podrobněji vysvětleny v odpovídajících materiálech pro procesní školení a v příručkách.
- **„Pore Free Zone“ (pouze pro vysokotlaké lití):** Díky výsledku „Pore Free Zone“ poskytuje MAGMASOFT® kritérium, které vám umožní vyhodnotit, zda je zóna bez pórů dostatečně silná v oblastech odlévání, které mají být obrobena. Tento výsledek je uveden v mm.

Obecné funkce vyhodnocení

Result Perspective nabízí mnoho možností zobrazení a zpracování odpovídajících výsledků. V následující kapitole jsou vysvětleny některé typické funkce a postupy. Prostřednictvím kontextové nabídky (pravé tlačítko myši v pracovním prostoru) můžete vybrat širokou škálu možností nastavení, která se vztahují k určitým výsledkům.



Obrázek – Kontextové menu v pracovním okně

Pro správnou interpretaci jednotlivých výsledků simulace je důležité sladit dohromady nastavení barevné stupnice a funkce rentgenu. Následující návrhy jsou ověřeny praxí a praktickým používáním ve slévárnách, a nejen že usnadní danou analýzu výsledků, ale také zabrání mylné interpretaci a pochopení výsledků.

Vyhodnocení výsledků plnění

„X-Ray“ mód nazvaný „Filled“ umožňuje pohled do nezaplňených oblastí dutiny formy. Díky tomu bude volný povrch taveniny viditelný, což vám umožní prozkoumat odlitek pro případné zachycení vzduchových bublin a turbulence. Nebezpečí studených spojů je v místech, kde je dosaženo teploty likvidu a kde se stýkají proudy postupující taveniny. Při doporučeném nastavení

jsou tyto oblasti zobrazeny ve světle modré barvě. V následující tabulce jsou uvedena doporučení pro úpravu nastavení „X-Ray“ a odpovídající rozsahy stupnic pro různé výsledky:

Kritérium	Stupnice (Scale)	Rentgen (X-ray)
Temperature [°C]	Liquidus – Initial	Activate Automatic
Velocity [m/s]	Podívejte se na výsledky a podívejte se na nejnižší a nejvyšší hodnotu. Podle toho si upravte rozmezí stupnice. User defined range... Barva – Continuous	Activate Automatic
Pressure [mbar]	Podívejte se na výsledky a podívejte se na nejnižší a nejvyšší hodnotu. Podle toho si upravte rozmezí stupnice. User defined range... Barva – Continuous	Activate Automatic
Mold Erosion	-/-	1-100 %
Air Pressure [mbar]	Vyhodnocujte toto kritérium při 100% zaplnění. Rozsah stupnice - Min. - Max. (Shown materials) Barva – Continuous	Off
Air Entrapment	Upravte si rozsah stupnice a rengenu, aby sobě odpovídaly. Rozsah stupnice – User defined range... 1-50% Barva – Continuous	Activate „Automatic“ nebo „Filled“

Vyhodnocení výsledků fáze tuhnutí

Níže uvedené tabulky uvádějí doporučení pro stanovení měřítka a „X-Ray“ pro vyhodnocení výsledků tuhnutí.

Kritérium	Stupnice (Scale)	Rentgen (X-Ray)
Soundness [%]	„Continuous“ User: 80–95 %	Activate Range: 0-95 %
Porosity [%]	„Continuous“ User: 2,5-20 % nebo 5–20 %	Rozsah Range: 2,5;5-100 %

Pro **litiny**:

Kritérium	Stupnice (Scale)	Rentgen (X-Ray)
Fraction Liquid [%]	Použij rozsah 10 % - 90 %, kvůli měnícím se místním teplotám T_{solidus} a T_{liquidus} .	Activate Range: 10–100 %
Fraction Solid [%]	“User defined range” 0–90 % “Continuous”	Activate Range: 0–90 %
Hot Spot [s]	-/-	-/-

Pro **oceli**:



Kritérium	Stupnice (Scale)	Rentgen (X-Ray)
Temperature [°C]	solidus – likvidu (continuous) Auto solidus – liquidus (wide spread) Auto	Range $T_{\text{sol}} - T_{\text{casting}}$
Niyama [-]	Niyama/Gradient User: Critical value e.g. 0.7 (from the range 0.3–1.3)	Off
Hot Spot FSTime	-/-	-/-

Pro **slitiny hliníku**:

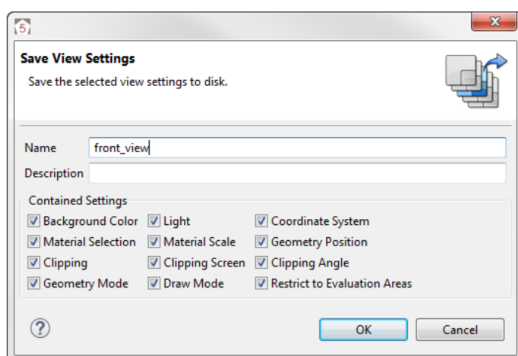
Kritérium	Stupnice (Scale)	Rentgen (X-Ray)
Temperature [°C]	Eutektická teplota - liquidus temperature (continuous) Eutektická teplota je taková teplota při které je dosaženo hodnoty ‘feeding effectivity’ na křivce ‘Fraction Solid’ (viz MAGMAdata). Tímto je dosaženo správně reprezentace dosazovacích cest.	Rozsah $T_{\text{eutectic}} - T_{\text{casting}}$
Hot Spot FSTime	-/-	-/-

Uložení nastavení

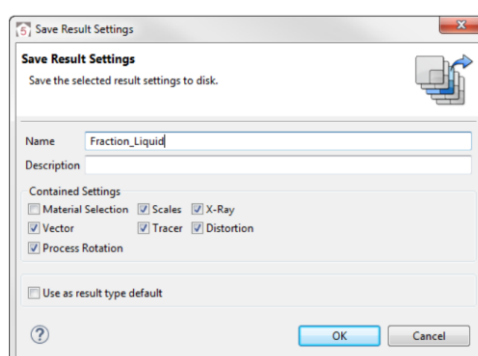
Různá nastavení, která jste definovali pro prezentaci různých výsledků, lze uložit pro jejich další použití později nebo v nové verzi stávajícího projektu. V MAGMASOFT® se v tomto kontextu rozlišuje mezi nastaveními souvisejícími se zobrazením („View settings“) a nastaveními souvisejícími s výsledky („Result settings“).

„Save View Settings“ () obsahuje všechny funkce, které určují pohled na geometrii, jako je poloha, výběr materiálu nebo rovina řezu („Clipping“). V nastavení „Save Result Settings“ () jsou uložena všechna nastavení, která souvisejí s konkrétním výsledkem, jako je nastavení rentgenové barevné stupnice nebo zda se mají zobrazovat vektory.

Při definování nastavení pohledu nezapomeňte nejprve tomuto pohledu přiřadit odpovídající název, například „front_view“. V případě potřeby můžete také přidat popis. Nakonec můžete specificky vybrat různé parametry, které chcete uložit. Pro „Result Settings“ postupujte podobně, jak je popsáno výše.





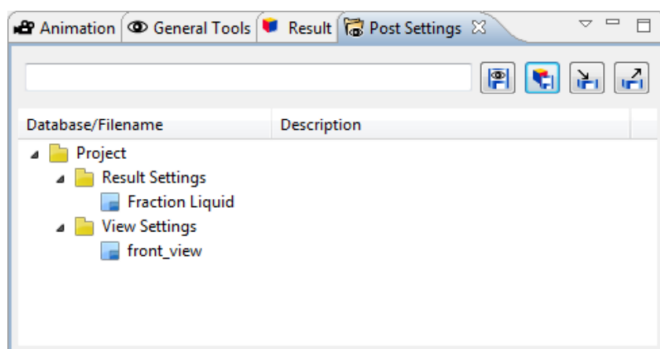
Obrázek – Uložení nastavení pohledu



Obrázek – Uložení nastavení výsledků

V dialogovém okně „Save Result Settings“ můžete pomocí funkce „Use as result type default“ zajistit, aby se dříve uložená nastavení výsledků automaticky použila při otevírání výsledku stejného typu. Tímto způsobem můžete zaručit, že v rámci projektu budou vždy odpovídající výsledky prezentovány se stejným nastavením.

Všechna uložena nastavení zobrazení a výsledků jsou zobrazena na kartě „Post Settings“. Zde můžete upravit a odstranit svá nastavení. Kromě toho můžete také exportovat nastavení (). To vám umožní přímo importovat tato nastavení do nového projektu (), aniž byste museli předefinovat nastavení. Kromě nastavení zobrazení a export výsledků zahrnuje také vaše uložené definice animací. V novém projektu vám tedy vaše animace budou také k dispozici.



Obrázek – „Post Settings“

12.5 Kontrolní otázky

1. K čemu slouží Result Perspective?
2. Je možné v MAGMASOFT® zobrazit dílčí výsledky v průběhu výpočtu?
3. Do jakých kategorií jsou členěny výsledky v případě simulace odlévání odlitek do pískových forem?
4. Uveďte příklady výsledků plnění.
5. Uveďte příklady výsledků tuhnutí.
6. Lze v MAGMASOFT® uložit nastavení zobrazení výsledků?

12.6 Doporučená studijní literatura

Problematiku k dané kapitole naleznete na stránkách uvedených za publikací.

- Basic Training: MAGMASOFT 5.4.1. Aachen: MAGMA GmbH, 2020, 150 s.

13 Kapitola: Vytváření obrázků, animací a videí

13.1 Klíčová slova

MAGMASOFT[®], postprocessing, vizualizace výsledků, animace

13.2 Cíle kapitoly

Cílem této kapitoly je vysvětlení možností grafického zpracování výsledků simulace.

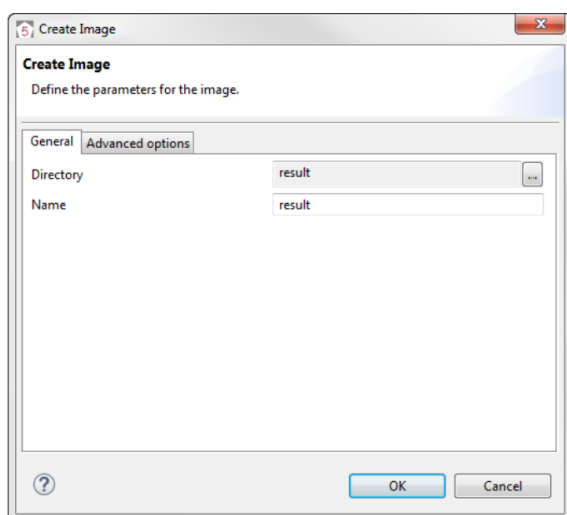
13.3 Úvod do kapitoly

Kapitola popisuje základní i pokročilejší funkce zpracování simulovaných výsledků, mezi které patří ukládání obrázků, tvorba animací a videí.

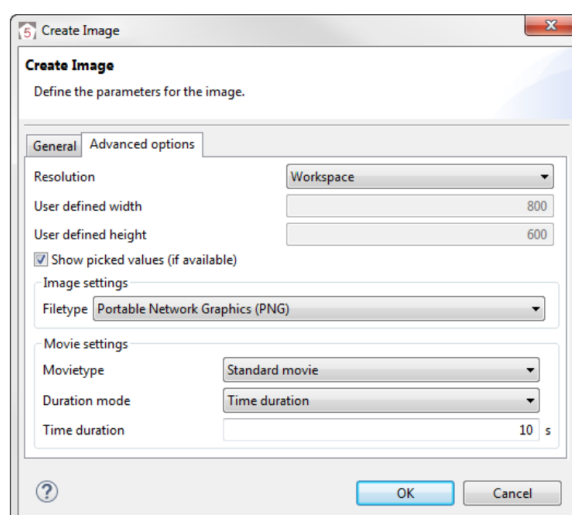
13.4 Výklad

Vytváření obrázků, animací a videí

Nejjednodušší způsob vytvoření obrázku je použití klávesy F7. Pomocí této klávesy se vytvoří jednoduchý snímek pracovního okna se zvoleným nastávním. Objeví se dialogové okno „Create Image“. V záložce „General“ můžete změnit umístění a název obrázku. Ve výchozím nastavení jsou všechny obrázky ukládány do odpovídající složky obrázků ve verzi. Tuto složku najdete v projektu v části "...\[project name]\images\v01\result". Protože je možné vytvářet obrázky ve všech perspektivách, vytvoří se v složce „Images“ také jednotlivé složky pro každou perspektivu.



Obrázek – Dialogové okno pro vytvoření obrázku




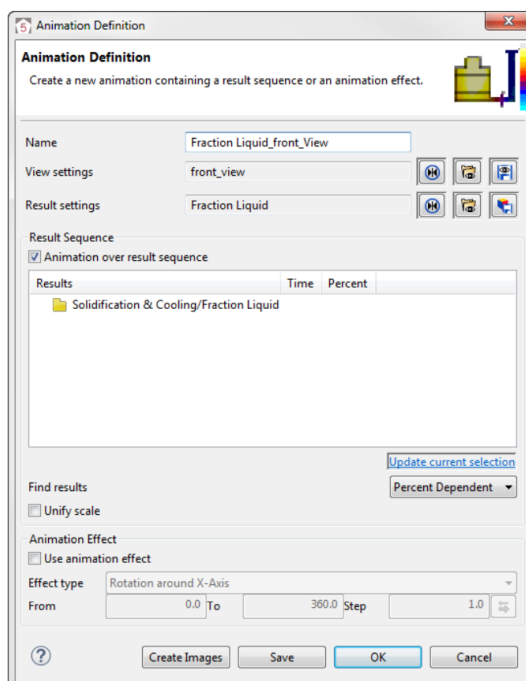
Obrázek – Dialogové okno pro vytvoření obrázku: Pokročilá nastavení

Pokud přejdete na kartu „Advanced options“, máte k dispozici další funkce pro vytváření obrázků. Například můžete určit rozlišení obrázku. Doporučujeme však ponechat rozlišení nastaveno na nastavení „Workspace“. Tím zajistíte, že budete přesně zobrazovat právě používané pracovní




okno. V nastavení obrázku můžete změnit typ obrázkového souboru. Výchozí nastavení je formát PNG. „Movie settings“ není při vytváření individuálního obrázku relevantní.

Animace můžete vytvářet dvěma různými způsoby. Jednou z možností je přesunout celou složku výsledků do pracovního okna „Result Perspective“ pomocí přetažení, čímž automaticky zahájíte animaci. Ujistěte se, že jste předem nastavili stupnici na pevný rozsah (nikoli „Min.-Max.“). Jinak bude použita výchozí hodnota a měřítko se může během animace lišit. Poznámka: Tato animace je pouze dočasná. Pokud zavřete MAGMASOFT® a znovu jej otevřete, tato animace již nebude k dispozici.

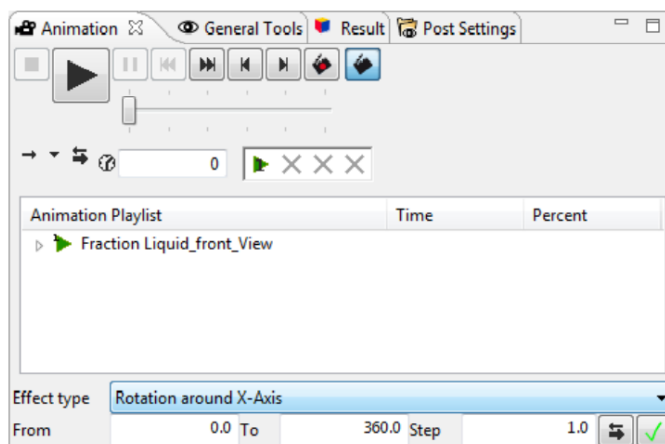
Chcete-li animace trvale uložit, musíte je vytvořit pomocí definic animací. Všechny animace jsou k dispozici v jakékoli verzi stejného projektu, i když jste například definovali animaci pouze v novější verzi. Do dialogu „Animation Definition“ () se dostanete prostřednictvím kontextové nabídky ve stromu výsledků, na panelu nástrojů nebo na panelu nástrojů pod položkou „Tools“.



Obrázek – Dialogové okno pro nastavení animace.

Nejprve nezapomeňte své animaci přiřadit odpovídající jméno. Tento název je také názvem složky, do které se později uloží jednotlivé obrázky animace i video soubor na disku. Výchozí nastavení zobrazení a výsledku („View and result settings“) je aktuálně neuloženo („current settings (unsaved)“). To znamená, že ačkoli aktuálně určujete a ukládáte animaci, vaše nastavení jsou uložena pouze v této animaci. V nové verzi animace máte přístup k těmto nastavením a je také možné je změnit, avšak nelze je použít přímo pro jiné animace. Ve většině situací doporučujeme uložit buď aktuální nastavení ( a ) nebo využít dříve uložená nastavení (). Dále do animace přidáte související výsledky. Můžete přidat celou složku výsledků nebo pouze jednotlivé výsledky. Pokud jste vybrali výsledek před otevřením „Animation Definition“, bude automaticky zahrnut do animace. Výsledky lze snadno vyměnit. Stisknutím klávesy DEL na klávesnici vymažete své výsledky. Funkcí „Update current selection“ můžete aktualizovat výběr v oknech výsledků. Alternativně můžete přidat nové výsledky do definice animace přetažením.

Jakmile animaci uložíte, objeví se v seznamu „Playlist“. Najdete ji na kartě Animace. Na této kartě máte možnost ovládání animace. Můžete například přehrávat animaci ve smyčce nebo změnit rychlost přehrávání animace.

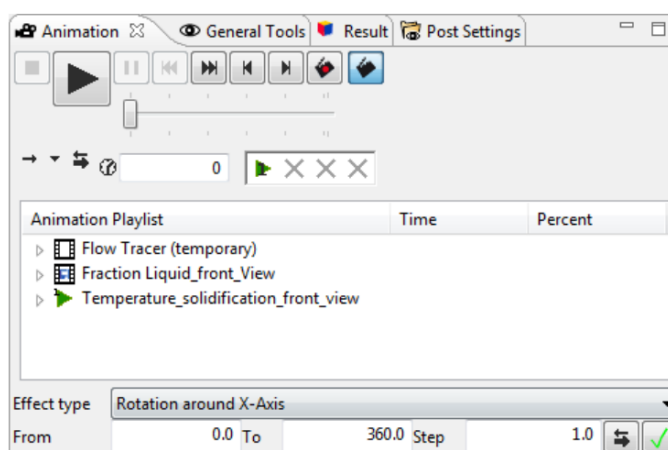


Obrázek – Karta Animace (Animation tab)

Také můžete použít animaci na jediný výsledek k automatickému rozřezání odlitku (pohledu dovnitř odlitku) změnit hodnotu „X-Ray“ nebo provést rotaci. K tomuto účelu použijte animační efekt („Effect type“). Požadované vstupy se mohou lišit podle typu efektu. Efekt animace můžete definovat okamžitě. Nezapomeňte, že tato nastavení nebudou uložena, pokud se vedle aktivní animace (zelený trojúhelník) objeví slovo „temporary“. Pokud tomu tak je, nezapomeňte místo toho použít definici animace.

Použití animací

Všechny definované animace se zobrazí v seznamu „Playlist“. Pokud jste načítali animaci, bude označena zelenou šipkou. Stačí kliknout na tlačítko „Přehrát“ (▶) a animace se spustí. Např. animace „Flow Tracer“ byla vytvořena přetažením a je tedy k dispozici pouze dočasně („temporary“), zatímco ostatní dvě animace jsou uloženy.



Obrázek – Karta animace obsahující několik animací

Animace však mohou být také použity k přehrávání různých výsledných sekvencí jedna za druhou. To vám umožní automaticky vytvořit obraz každého jednotlivého výsledku. S odpovídající možností můžete automaticky vytvářet filmy na základě uložených obrázků na konci takové výsledné sekvence.

13.5 Kontrolní otázky

1. Jakým způsobem je možné nejrychleji pořídit snímek pracovního okna?
2. Lze při ukládání zvolit rozlišení obrázku?
3. Jak lze jednoduše spustit animaci v pracovním okně MAGMASOFT®?
4. Lze při práci v MAGMASOFT® uložit animaci?
5. Je možné měnit rychlost přehrávání animace?

13.6 Doporučená studijní literatura

- Basic Training: MAGMASOFT 5.4.1. Aachen: MAGMA GmbH, 2020, 150 s.