

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Licí forma
Casting mold

Student:

Antonín Durna

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Zdeněk Noga, CSc.

Ostrava 2014

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Zadání bakalářské práce

Student: **Antonín Durna**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2302R010 Konstrukce strojů a zařízení
Specializace: 21 Konstrukce výrobních strojů a zařízení
Téma: **Licí forma**
Casting Mold

Zásady pro vypracování:

Pro potřebu laboratoří RMTVC navrhnete grafitovou formu pro odlévání neželezných slitin. Maximální velikost odlitku volte dle potřeby laboratoře.
Provedte :

1. Technickou zprávu s popisem funkce navrženého zařízení a nezbytnými výpočty ve členění – seznam požadavků, funkční struktura, morfologická matice, orgánová a hrubá stavební struktura.

2. 3D model konstrukčního návrhu licí formy.

3. Výrobní výkresovou dokumentaci licí formy.

Rozsah výtahu z rešerše z Bakalářského projektu v textové části práce cca 5str., rozsah výkresové části min. 1A0

Seznam doporučené odborné literatury:

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.

ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

HUBKA, V. *Konstrukční nauka*. Zürich: Heurista, 1995. 105s. ISBN 80-90 1135-0-8

Zásady pro vypracování diplomové (bakalářské) práce. FS_SME_05_003 verze: G

LITERÁRNÍ REŠERŠE – zpracovaná v rámci Bakalářského projektu

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Noga, CSc.**

Datum zadání: 17.02.2014

Datum odevzdání: 19.05.2014

doc. Dr.Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu

V Ostravě
16. 5. 2014

.....
Ševcova

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo
- beru na vědomí, že Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucí bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 16.5.2014

Durna

.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Antonín Durna

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Ostrožská, 300

Veselí nad Moravou, 69801

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

DURNA, Antonín. *Licí forma: bakalářské práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2014, 46 s. Vedoucí práce: Noga, Z.

Tato bakalářská práce se zabývá licí formou z grafitu pro lití titanových slitin. Součástí je teoretický úvod, rešerše materiálů a použité technologie, pomocí které je materiál odléván. V práci je řešen tepelný prostup formou, pevnostní analýza a dimenzování formy, spolu s jejím konstrukčním řešením. Byl vytvořen model 3D a provedeny simulace pomocí MKP analýzy.

ANOTATION OF BACHELOR THESIS

DURNA, Antonín. *Casting mold : Bachelor Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical university of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Production Machines and Design, 2014, 46 p. Thesis head: Noga, Z.

Bachelors thesis deals with casting mold of graphite for casting titanium alloys. As a part of this bachelors thesis is a theory part, which deals with research materials and used technology, by which the material is casting. The bachelors thesis will deal with in the thermal transmittance of form, stress analysis and design of forms, along with her design solution. 3D model was created and performed simulations using FEM analysis.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů.....	8
1. Úvod.....	9
2. Rešerše	10
2.1 Technologie lití	10
2.2 Materiály	13
2.2.1 Uhlík.....	13
2.2.2 Titan	13
2.3 Použitý stroj	14
3. Odlitek.....	16
4. Grafitová forma.....	17
5. Výpočet leplotních bilancí	19
6. Konstrukce formy	22
6.1 Uzavírání formy	26
6.2 Tepelná analýza MKP	27
6.3 Pevnostní analýza MKP	36
7. Závěr	43
8. Seznam použité literatury.....	44
9. Seznam příloh	46

Seznam použitých značek a symbolů

$c_{p(\text{Ti})}$	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita titanu
$c_{p(\text{grafit})}$	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita grafitu
E	$[\text{MPa}]$	Modul pružnosti
l_t	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$	Měrné skupenské teplo titanu
m_{Ti}	$[\text{kg}]$	Hmotnost odlitku
m_{F}	$[\text{kg}]$	Hmotnost formy
Q_1	$[\text{J}]$	Teplo potřebné k dosažení teploty tavení
Q_2	$[\text{J}]$	Teplo potřebné k přestupu z pevné na kapalnou fázi
Q_3	$[\text{J}]$	Teplo potřebné k dosažení teploty lití
Q_{C}	$[\text{J}]$	Celkové množství tepla potřebné k dosažení teploty lití
Q_{F}	$[\text{J}]$	Teplo které pojme forma
Q_{O}	$[\text{J}]$	Teplo které je zapotřebí odvést
Q_{Z}	$[\text{J}]$	Zbytkové teplo odlitku
R_{S}	$[-]$	Parametr tepelného šoku
t_{k}	$[\text{°C}]$	Konečná teplota
t_{l}	$[\text{°C}]$	Teplota lití
t_{t}	$[\text{°C}]$	Teplota tavení titanu
t_{o}	$[\text{°C}]$	Teplota okolí
α	$[\text{K}^{-1}]$	Koeficient tepelné roztažnosti
λ	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	Součinitel tepelné vodivosti
σ_{F}	$[\text{MPa}]$	Pevnost v ohybu

1. Úvod

Kořeny slévárenství sahají daleko do minulosti, ale zásadně zasáhlo do rozvoje společnosti teprve v minulém století. Tento obor nás obklopuje v každodenním životě, aniž by to někdo tušil.

Odlévání a rozvoj této technologie se začal rozvíjet nejen díky hospodárnosti materiálu, ale také díky možnosti výroby složitých součástí, které by se jen těžko daly vyrobit obráběcími stroji. Vznikly ohromné velkovýroby ve, kterých se vyrábí velké tělesa turbín, nebo součástky tak malé že se vejdou do dlaně.

Tato technologie se používá především u dílů, kde cena výroby litím je oproti jiné technologii výhodnější a při velkovýrobě se pokryjí náklady zařízení na odlévání.

V mé práci se zabývám návrhem grafitové formy pro lití titanu. Formy se vyrábí zhuňňováním grafitové směsi. Používají se, pro lití vysoce reaktivních materiálů.

Forma je navrhováno pro laboratoře RMTVC (Regionální materiálově technologické výzkumné centrum). Při návrhu byl vytvořen 3D model a výkresová dokumentace odlitku a formy. Byly použity analýzy MKP pro pevnostní simulaci a prostup tepla.

2. Rešerše

2.1. Technologie lití

Induction Skull Melting, Cold crucible melting

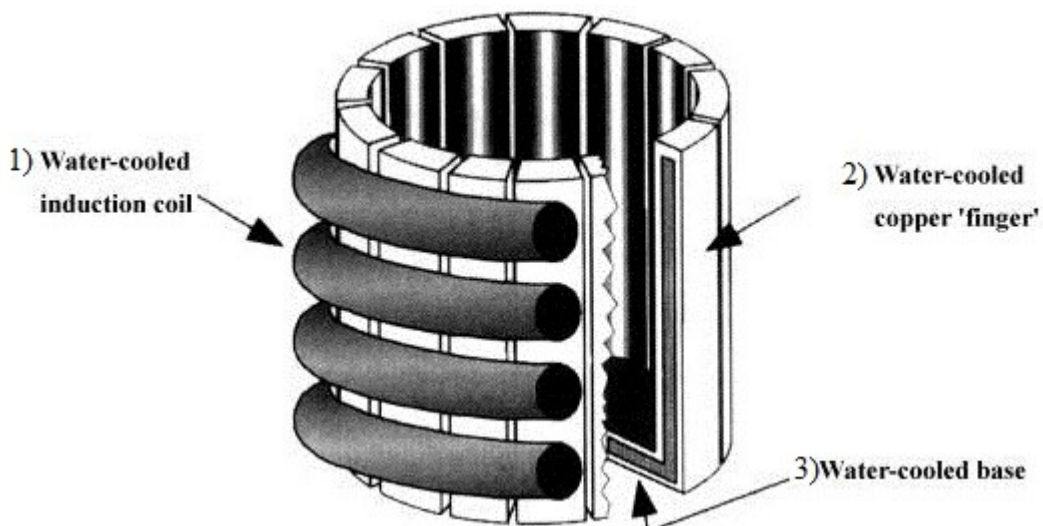
Technologie známá také jako "studený kelímek". Studený kelímek je zařízení pro vysokofrekvenční indukční ohřev zaměřené na tavení různých materiálů. Kelímek se skládá z trubkovitých, převážně měděných dílů, kolem kterých jsou umístěny závity induktoru generující elektromagnetické pole. Elektromagnetické pole svými vířivými proudy ohřívá materiál umístěný uvnitř kelímku. Princip kelímku spočívá v tom, že zdroj tepla je soustředěn přímo v ohřívaném materiálu a vlastní tavicí nádoba (studený kelímek) je vnitřně chlazený vodou. Od toho plyne i název zařízení. Studený kelímek si na všech svých částech udržuje stálou pracovní teplotu přibližně 50 °C, přestože materiál uvnitř kelímku dosahuje teploty až 3000 °C.

Indukční ohřev má oproti konvenčnímu ohřevu některé nesporné výhody. Jelikož teplo nevstupuje do ohřívaného materiálu jeho povrchem, ale vzniká přímo v materiálu, je samotný proces ohřevu velmi rychlý. Další výhodou je skutečnost, že volbou kmitočtu generátoru můžeme volit rozložení tepla v ohřívaném materiálu – vsázce. Třetí výhodou studeného kelímku je jeho bez vyzdívková konstrukce, což znamená, že roztavený materiál se přímo nedotýká stěn kelímku ani jiného materiálu, který by se vlivem extrémní teploty mísil s taveninou, která proto dosahuje vysoké čistoty ve všech fázích tavby. Na rozhraní roztaveného materiálu a kelímku se vlivem intenzivního ochlazování vytvoří slabá asi milimetrová křusta (anglicky Skull) z vlastního taveného materiálu, která prakticky nahrazuje nádobu pro roztavený materiál. [1]

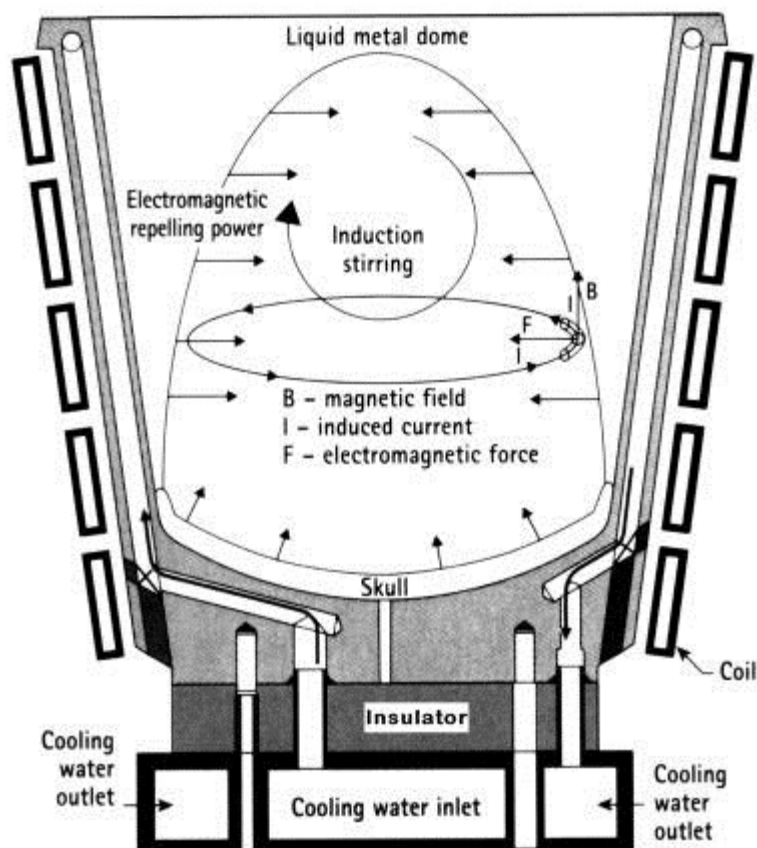
V tavenině probíhá silné promíchání díky působení indukovaných elektromagnetických sil tzv. Lorentzovi síly. Celý tento proces probíhá v inertní atmosféře. [2]

Když jsou reaktivní materiály skladovány, jako je titan, zirkonium, supravodiče, slitiny s tvarovou pamětí, magnety, intermetalické slitiny a vysokoteplotní materiály, které mají být zpracovány s přísnými požadavky vůči čistotě, technologie studeného kelímku je řešením k překonání hlavních problémů způsobených indukčním tavením s keramickými kelímky. [3]

Studený kelímek má potenciál produkovat vysokou čistotu tavenin z řady obtížně rozpustitelných materiálů, včetně Ti - Al a Ti6Al4V slitiny pro letectví. Titan, tantal a další biokompatibilní materiály pro chirurgické implantáty, křemík pro fotovoltaické a elektronické aplikace. [2]



Obr. 1 Schéma chlazení studeného kelímku. Elektromagnetické míchání zajišťuje rovnoměrné teploty a složení kovu. Vodou chlazená – 1) indukční cívka, 2) stěna kelímku, 3) podstava kelímku. [4]



Obr. 2 Schéma studeného kelímku. Montáž vodou chlazených stěn, které jsou elektricky izolovány od sebe navzájem, aby se zabránilo ohřevu v kelímku elektromagnetickým polem vyvolaným cívkou. [4]

Liquid metal dome – roztavený kov

Elektromagnetic repelling power – elektromagnetické odpudivé síly

Induction stirring – indukční míchání

B – magnetické pole

I – vyvolaný proud

F – elektromagnetická síla

Skull – tenká vrstva ztuhlého kovu

Coil – cívka pro indukční ohřev

Insulator – izolace

Cooling water inlet – vstup vody pro chlazení

Cooling water outlet – výstup vody pro chlazení

2.2 Materiály

2.2.1. Uhlík (grafit)

Grafit je v přírodě hodně rozšířen, ale jen malé množství lze ekonomicky získat. Velké krystaly nebo šupiny grafitu se vyskytují v metamorfovaných sedimentovaných silikátových horninách, jako je křemen, slídové krystalické břidlice a rula.

Přírodní grafit má velké technické použití. Z celkové světové produkce se nejvíce spotřebuje při výrobě oceli (33%), ve slévárnách (18%), jako žáruvzdorný materiál (17%). Také na kelímky, retorty, trysky atd. (8%), jako mazivo (5,8%), na brzdové obložení (2,8%), tužky (1,6%) a na různé výrobky (13,8%).

Vlastnosti

Grafit je černý, polokovový, má velkou optickou odrazivost. Dobře vede elektrický proud, jeho měrný odpor je přibližně $10^{-4}\Omega\text{cm}$ podél jeho vrstev. Ve směru příčném k vrstvám, ale vzroste asi 5 000 krát. Má dobrou tepelnou vodivost.[5]

Hustota	2270 kg/m ³
Tepelná vodivost	119-165 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Skupenské teplo tání	117 KJ/mol
Měrná tepelná kapacita	8,517 Jmol ⁻¹ ·K ⁻¹

2.2.2. Titan

V současnosti se v průmyslové výrobě titanu využívá především tzv. Krollova metoda. Zahříváním ilmenitu nebo rutilu s uhlíkem v proudu chloru vzniká chlorid titaničitý TiCl₄. Ten se odděluje frakční destilací od FeCl₃ a ostatních nečistot. Poté se redukuje rozžhaveným hořčíkem v inertní atmosféře za teploty kolem 800 °C. Reakcí vzniká tuhá pórovitá látka, která se po odstranění chloridu hořečnatého a nezreagovaného hořčíku dále čistí. [6]

Je kovatelný a tažný, je možné ho dobře válcovat i na tenké fólie, dráty je velice odolný proti korozi, proto se používá ve strojírenství. Používají se především jeho slitiny s vanadem a hliníkem. Slitiny s hořčíkem a hliníkem odolávají teplotě až do 600 stupňům na

krátký čas i 800 stupňů, titan odolává i nízkým teplotám. Používá se na ochranné pancíře v astronautice, v leteckém průmyslu pro namáhané součásti. Především pro vojenská letadla, ale dnes i pro komerční dopravní letouny. [7]

Titanové slitiny se vyznačují nízkou měrnou hmotností a velmi dobrými hodnotami měrných pevností. Jejich nevýhodou je celkem vysoká cena. Nejsou to sice žádné „zázračné“ kovy, ale díky jejich vlastnostem si vydobily své technicky zdůvodněné místo mezi důležitými konstrukčními materiály. [8]

Vlastnosti

Titan je lehký ocelově šedý kov. Má podobné mechanické vlastnosti jako oceli, jeho hustota je však podstatně menší. Titan je kov nemagnetický. Jeho pevnost rychle klesá se vzrůstající teplotou. Naproti tomu je velmi odolný proti korozi. Odolává všem anorganickým i organickým kyselinám a zředěným alkalickým roztokům. Je-li zahříván, reaguje přímo s většinou nekovů, zvláště s kyslíkem a vodíkem. Také se slučuje s dusíkem, ve kterém dokonce hoří. Pozvolna se rozpouští v horké HCl. Kyselina dusičná jeho povrch pasivuje. Jemně práškové kovy jsou samozápalné, proto se musí dbát na pozornost při obrábění, aby neodpadaly jemné hobliny. [9]

Hustota	4,506 g/cm ³
Tepelná vodivost	21,9 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Skupenské teplo tání	14,15 KJ/mol
Měrná tepelná kapacita	523 Jkg ⁻¹ ·K ⁻¹
Teplota tání	1667,85 °C (1941 K)
Teplota varu	3286,85 °C (3560 K)

2.3 Použitý stroj

SECO/WARWICK VIM 2 – 125

Parametry:

Maximální teplota: 2000°C

Zdánlivý výkon: 200 kVA

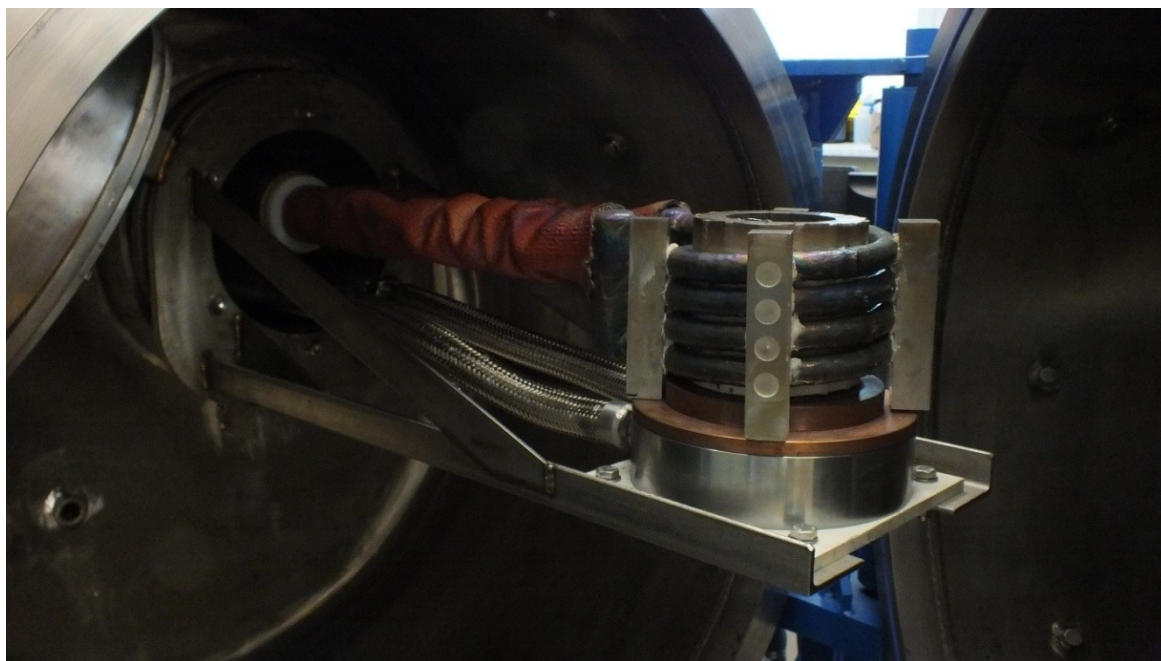
Maximální objem součásti: 0,7 dm³

Největší podtlak : 0,1 Pa

Zařízení pro přípravu odlitků speciálních titanových a niklových slitin, intermetalických sloučenin a dalších reaktivních materiálů. Zařízení umožňuje tavení kovů a jejich slitin ve vakuu nebo ochranné atmosféře. „Studený“ kelímek zabraňuje kontaminaci taveného materiálu kelímkem a zajišťuje dosažení vysoké mikročistoty tavených slitin.



Obr. 5 SECO/WARWICK VIM 2 – 125

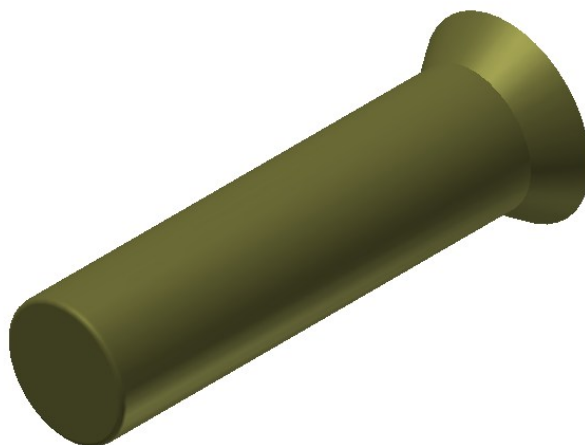


Obr. 6 Otevřená tavící komora s ramenem pro indukční ohřev chlazené vodou

3. Odlitek

Používané typy titanu na odlitky pro účely laboratoře nesou označení TiGr1 a TiGr2, Ti-6Al-4V (TiGr5). Jako vsázka se používají bloky tyče, špony.

Odlitek může sloužit pro laboratorní účely, také může sloužit pro externí subjekty. Odlitek se rotačně překove do formy kulatin o menších průměrech. Jo možno rovněž vyválnčovát požadovaný profil.



Obr. 3 3D model odlitku s vtokovou soustavou.

Rozměry odlitku jsou ve výkresové dokumentaci v příloze práce. Jeho celková hmotnost je 1,746 kg při objemu 387,038 cm³.

Ti-6Al-4V (TiGr5)

Použití: lopatky a disky kompresorů, kroužky, draky letadel, spojovací materiál, komponenty kryogenních nádob (pouzdra, rozbočovače), komponenty pro astronautiku, výkovky, biomedicínské implantáty.

Výborná biokompatibilita, především pokud je vyžadován přímý kontakt s tkání nebo kostí. Ti 6AL-4V má horší pevnost ve smyku je to žádoucí pro kostní šrouby a desky. To také má špatné vlastnosti, opotřebení povrchu a má tendenci se chytit, když v kluzném kontaktu se sebou samým a dalších kovů. Používají se povrchové úpravy nitridace, pro zlepšení vlastnosti opotřebení povrchu. [10]

4. Grafitová forma

Grafit se používá pro výrobu forem už více než 50 let. Pokrok v dostupnosti materiálů vytvořil možnosti, které dovolily grafit používat v různých aplikacích. Grafitové formy jsou běžně používány pro lití ingotů z hliníku, zlata a stříbra. Výhody grafitových kokil jsou realizovány kombinováním nízkých nákladů spojených s možností snadného obrábění a vysoké pevnosti. Další výhody, které tento materiál poskytuje je malá smáčivost, vysokou tepelná vodivost, díky které se lépe odvádí z formy teplo. Nízký koeficient tepelné roztažnosti umožňuje vyrábět odlitky v malých tolerancích. Forma může být vyrobena obráběním grafitu, nebo může být vyrobena z lisovaného grafitu izostaticky. [11]

Uvolněné teplo během ochlazování a tuhnutí odlévaného kovu by mělo být odvedeno z formy. Tepelná vodivost materiálu formy by měla být dostatečně vysoká, aby bylo dosaženo rychlého odvodu tepla. Lící forma se zahřívá roztaveným kovem a ochlazuje se z vnější strany teplotou okolí nebo. Výsledné rozložení teploty v celé formě je velmi nerovnoměrné. Nízká tepelná roztažnost materiálu formy pomáhá předcházet zkreslení tvaru formy. Odolnost na termický šok materiálu lze odhadnout podle vzorce:

$$R_s = \frac{\lambda \cdot \sigma_F}{\alpha \cdot E} \quad (4.1)$$

Grafit má vynikající odolnost proti teplotním šokům v důsledku příznivé kombinace vysoké tepelné vodivosti s nízkým koeficientem tepelné roztažnosti. Modul pružnosti má (10,3 GPa) a poměrně vysokou pevnost v ohybu (24 MPa). Má dobrou mechanickou pevnost. Na rozdíl od jiných materiálů, mechanická pevnost grafitu (pevnost v tahu, pevnost v tlaku, pevnost v ohybu) se zvyšuje s nárůstem teploty.

Grafit se dá snadno obrábět. Formy složitých tvarů s malými tolerancemi lze získat frézováním, soustružením, řezáním, broušením. Jemný povrch na vnitřní straně formy se brousí nebo leští, to z důvodů pro snížení smáčivosti materiálu. Velký teplotní interval mezi křivkami liquidu a solidu zvyšuje dobu kontaktu mezi formou a tuhnoucím kovem, zvyšuje smáčivost. Aby se dosáhla delší životnost forem, a zlepšení kvality povrchu se používá grafit s nízkou hustotou pórovitosti. Rychlé ochlazení snižuje dobu kontaktu mezi formou a tuhnoucím kovem a zvyšující smáčění. [12]

Patentová rešerše

Grafit jako takový se používá pro mnohé aplikace. Jeho zpracování a výroba polotovarů nebo přímo výrobků má přesné postupy. Patent US780297 A se zabývá zpracováním a separací rud a grafitu. Patentově zabezpečená je výroba formy lisováním grafitu např. patent: US4235859 A, US3978177 A, US4235859 A. Tento typ výroby je nákladnější než obrábění a používá se především v sériové výrobě nebo tam kde se náklady na výrobu forem pro lisování grafitu vyplatí. Oproti obráběné formě se už nemusí nijak povrch upravovat. Dále se používá grafitových forem pro kontinuální lití mědi, hliníku a jejich slitin. Patent US3459255 A, US4044817 A, US 3076241 A.

Patentové ochrany se zabývají výrobou grafitu, použitím a přímo jeho aplikací na speciální formy např. pro výrobu železničních kol nebo pro výrobu forem pro přesné lití kovů US2886869 A, US3266106 A.

Grafit se vyrábí v polotovarech, které se dají dále obrábět do požadovaných tvarů a dají se použít pro různé aplikace.

Někteří dodavatelé grafitových polotovarů

www.karbotechnik.cz

www.interspark.cz

www.grafit.cz

www.uhlikove-kartace.com



Obr. 4 Polotovary firmy Interspark Praha

6. Výpočet teplotních bilancí

Pomocí MKP simulace je možné zjistit za jakou dobu se tavenina a forma ochladí na požadovanou hodnotu. Díky komplexnosti této práce, by takový výpočet byl příliš náročný. Čím se MKP simulace nezabývá, je množství tepla, které je zapotřebí dodat materiálu k jeho roztavení a jaké množství je zapotřebí odvést.

Výpočet tepla potřebného k dosažení 1700°C

Uvedené vzorce dle [13]

kde: $t_o = 20 \text{ °C}$

$$t_t = 1667,85 \text{ °C}$$

$$t_l = 1700 \text{ °C}$$

$$t_k = 300 \text{ °C}$$

$$m_{Ti} = 1,746 \text{ kg}$$

$$c_{p(Ti)} = 523 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$l_{t(Ti)} = 370 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$Q_1 = m \cdot c \cdot (t_t - t_o) \quad (6.1)$$

$$Q_1 = 1,746 \cdot 523 \cdot (1667,85 - 20)$$
$$Q_1 = 1\,504\,747,4103 \text{ J}$$

$$Q_2 = m \cdot l_t \quad (6.2)$$

$$Q_2 = 1,746 \cdot 370$$
$$Q_2 = 646\,020 \text{ J}$$

$$Q_3 = m \cdot c \cdot (t_l - t_o)$$

$$Q_3 = 1,746 \cdot 523 \cdot (1700 - 1667,85)$$
$$Q_3 = 29\,358,0297 \text{ J}$$

$$Q_c = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (6.3)$$

$$Q_C = 1\,504\,747,4103 + 646\,020 + 29\,358,0297$$

$$Q_C = 2\,180\,125,44\text{ J}$$

Celkové množství tepla, které se musí dodat materiálu, aby dosáhlo z 20°C na 1700°C je 2 180,125 kJ.

Odvedené teplo

Požadovaná konečná teplota odlitku a formy je 300°C, proto musíme odečíst teplo které je zapotřebí k ohřátí do 300°C.

$$Q_Z = m \cdot c \cdot (t_k - t_o)$$

$$Q_Z = 1,746 \cdot 523 \cdot (300 - 20)$$

$$Q_Z = 255\,684,24\text{ J}$$

$$Q_V = Q_C - Q_Z$$

$$Q_V = 2\,180\,125,44 - 255\,684,24$$

$$Q_V = 1\,924\,441,2\text{ J}$$

Dále uvažujeme, že forma se také prohřeje z 20°C na požadovaných 300°C, proto musíme vypočítat teplo, které pojme.

kde: $m_F = 10,235\text{ kg}$

$$c_{p(\text{grafit})} = 709,75\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$Q_F = m_F \cdot c_{p(\text{grafit})} \cdot (t_k - t_o)$$

$$Q_F = 10,235 \cdot 709,75 \cdot (300 - 20)$$

$$Q_F = 2\,034\,001,55\text{ J}$$

$$Q_O = Q_V - Q_F$$

$$Q_O = 2\,180\,125,44 - 2\,034\,001,55$$

$$Q_O = 146\,123,89 \text{ J}$$

Množství tepla Q_O je zapotřebí odvést aby teplota klesla na požadovaných 300°C . Teplo je odváděno zářením z povrchu formy a taveniny na stěny pracovního prostoru stroje.

6. Konstrukce formy

Upřesnění zadání

Přesnější popis zadání konstrukčního návrhu je možné lépe zachytit dobře specifikovanými požadavky na systém. Je podstatné doplnit zadání pokud možno co nejlépe to půjde o seznam požadavků a určit jejich závažnost. Závažnost vlastností systému, je udáván ve dvou hladinách, jako podmínka a přání. [14]

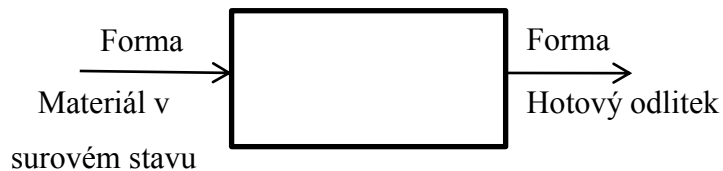
Pro přehlednost a funkčnost je možno systém třídit do tabulky viz. tab.1

Tab. 1 – Seznam požadavků

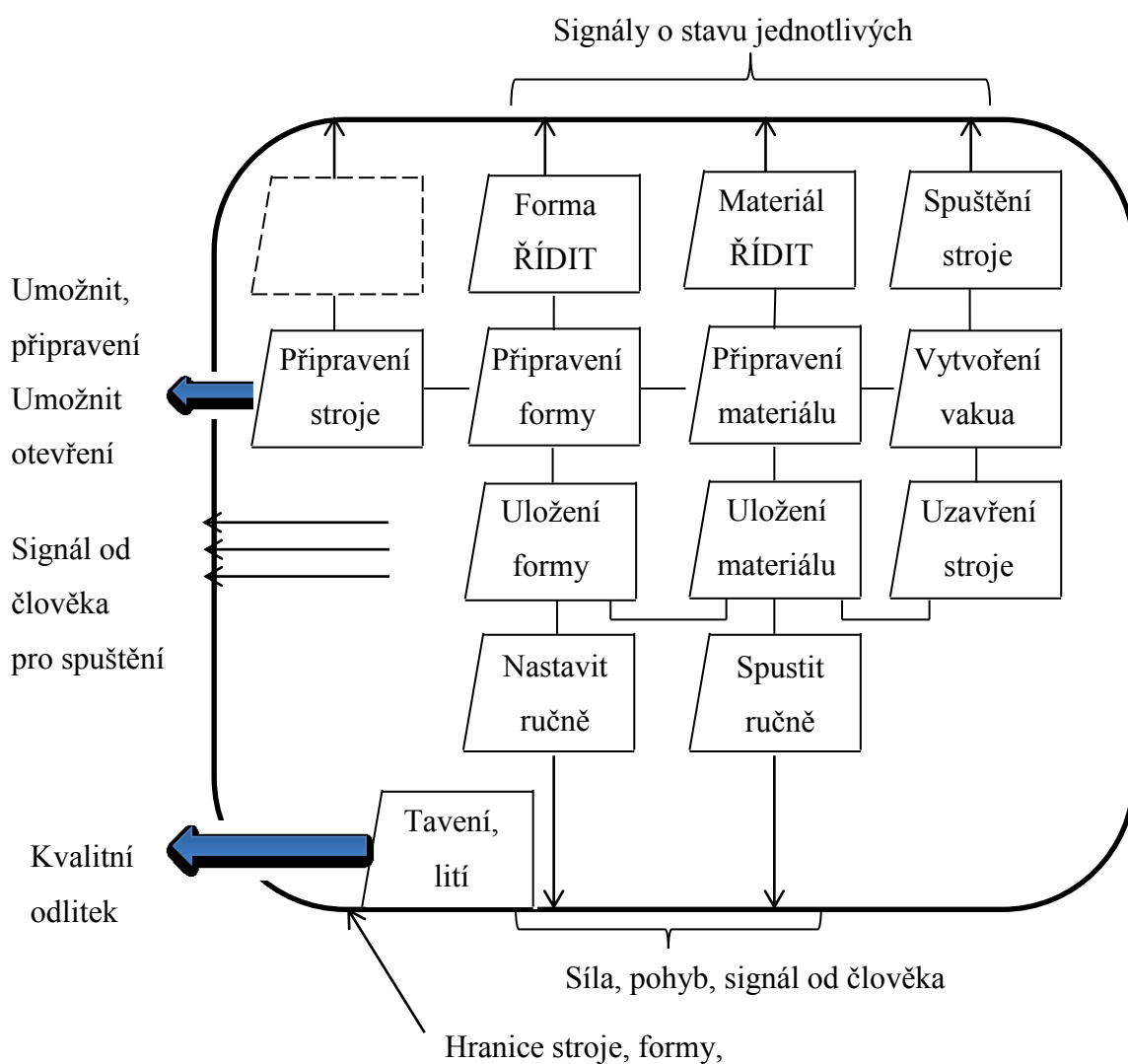
Specifikace požadavku:		podmínka	přání
Forma:			
- možnost demontáže		X	
- snadná manipulace		X	
- minimální přesazení			
- četnost použití:	častá	X	
- údržba:	minimální	X	
-	žádná		X
- dlouhá životnost			X
- jednoduchá instalace		X	
- bez porušení autorských práv		X	
Materiál:			
- schopnost dobře odvádět teplo		X	
- odolnost teplotním rozdílům		X	
- odolnost teplotním rázům		X	
- dostupnost materiálu		X	
- konvenční výroba		X	
- možnost recyklace		X	

Funkční s truktura

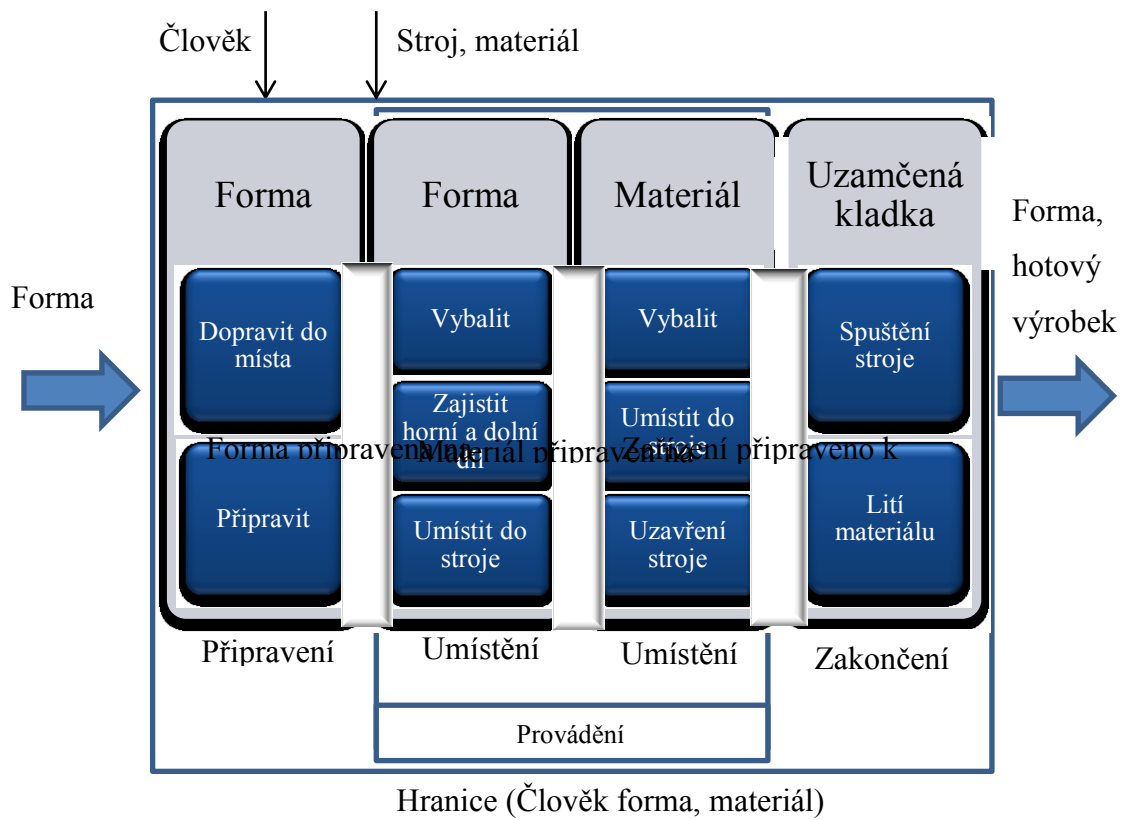
Ve funkční struktuře jsou uvedeny dílčí úkoly (funkce), které musí daný technický systém splnit. Tyto úkoly vyplývají z technického procesu. [14]



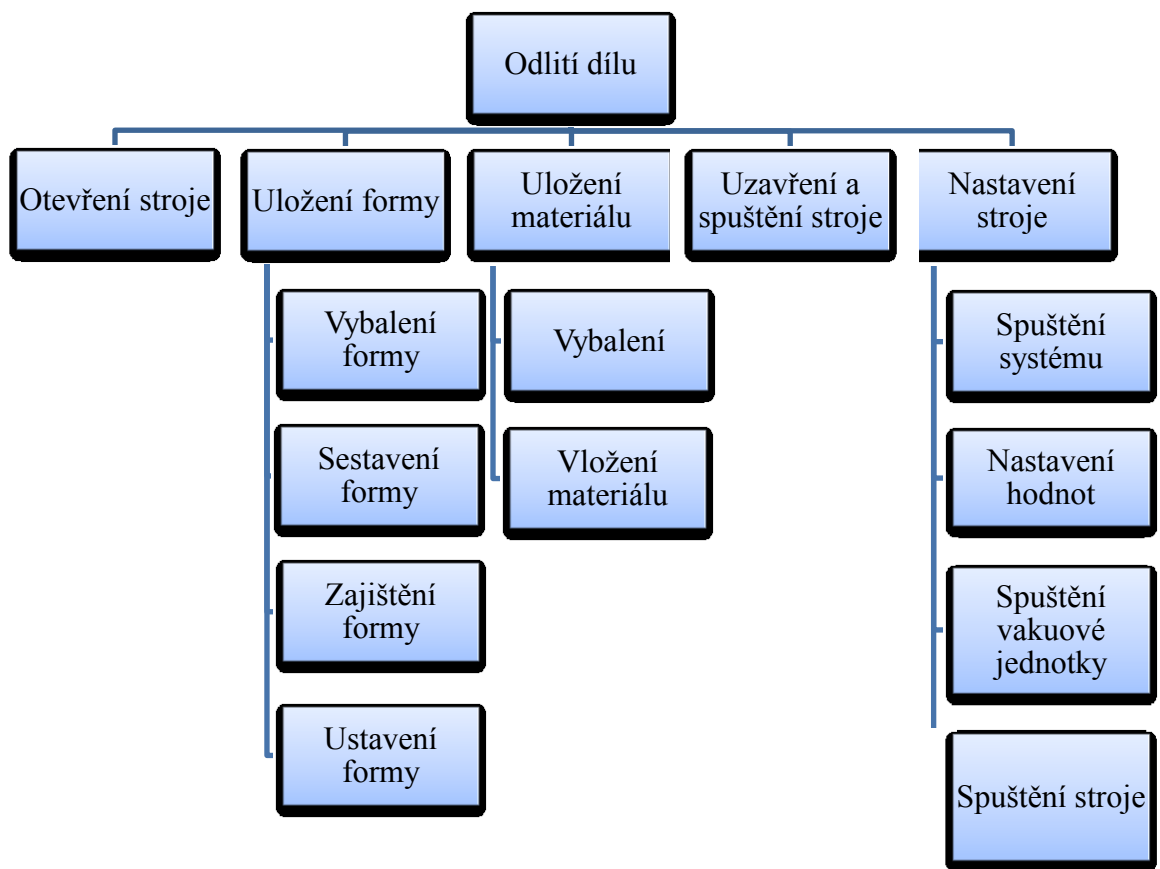
Obr. 7 Technický proces (blokové schéma)



Obr. 8 Blokové schéma funkční struktury



Obr. 9 Technický proces (pouze hlavní tok)



Obr. 10 Funkční struktura (hierarchický funkční strom)

Morfologická matice

Morfologická matice zpřehledňuje a zjednodušuje volbu různých konstrukčních variant. Různou kombinací možností konstrukčního řešení lze lépe dosáhnout požadovaného výsledku. Je možné také uvažovat nad více řešeními daného problému.

Morfologická matice je jiný druh technického systému, který dostaneme při pohledu z funkčního hlediska. Jednotlivé účinkové řetězce jsou tvořeny z “funkčních jednotek“ orgánů. Orgány je možné ještě dělit na nižší funkční jednotky (suborgány). [14]

Zvolil jsem různé konstrukční varianty a uvedl do morfologické.

Dílčí funkce		Orgány nositelé funkcí		
		1	2	3
1.	Uzavření formy	Polokoule	Nos	
2.	Zajištění polovin forem	Šroubem	Stahovací páskou	
3.	Úprava formy	Slabší stěna	Slabší stěna i dno	Slabší stěna silnější dno
4.	Rychlost vychlazení	Pomalé	Rychlé	Střední

Tab.2 – Morfologická matice

Tab.3 – Vybraná řešení

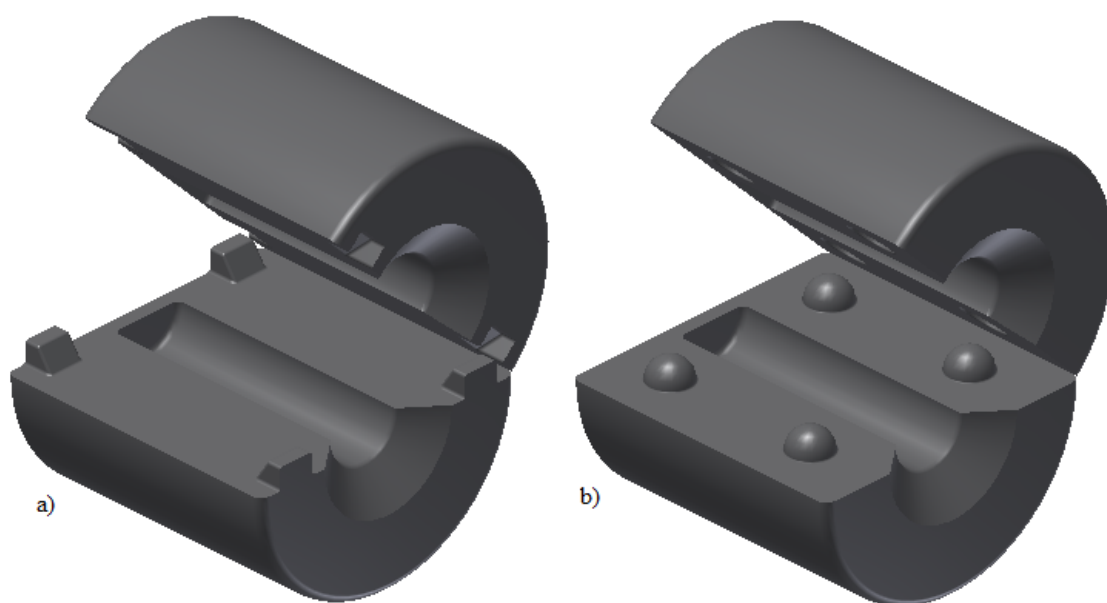
-		Řešení A	Řešení B
1	Uzavření formy	Polokoule	Nos
2	Zajištění polovin forem	Stahovací páskou	Stahovací páskou
3	Úprava formy	Slabší stěna i dno	Slabší stěna silnější dno
4	Rychlost vychlazení	Pomalé	Střední

Volím, konstrukční řešení za A, protože šetří použitý materiál. Čas vychlazení této varianty je delší, ale pokud pracujeme v laboratoři, můžeme si to dovolit.

6.1 Uzavírání formy

Pro přesný odlitek je zapotřebí, aby vícedílná forma měla minimální přesazení v dělicí rovině. Navrhovaná forma se skládá ze dvou částí. Způsobu zajištění polovin formy je více je možné vložit např. nějaký prvek, který bude tvarovým stykem udržovat vzájemnou polohu. Tohle řešení, ale není příliš vyhovující. Pokud by daný prvek byl z jiného materiálu, vzájemné chování součástí za vyšších teplot by mohlo vést k porušení formy třeba tepelnou roztažností. Proto je více vyhovující tvarový styk přímo vytvořit formou. Nejjednodušší řešení je vytvořit prvek, který zamezí vzájemnému pohybu a zároveň by byl součástí formy. Může to být například nějaký “nos“(osazení) nebo “polokoule“.

Takto vytvořený prvek nesmí komplikovat výrobu formy, nesmí být náchylný k poškození a musí být odolný pro časté používání.

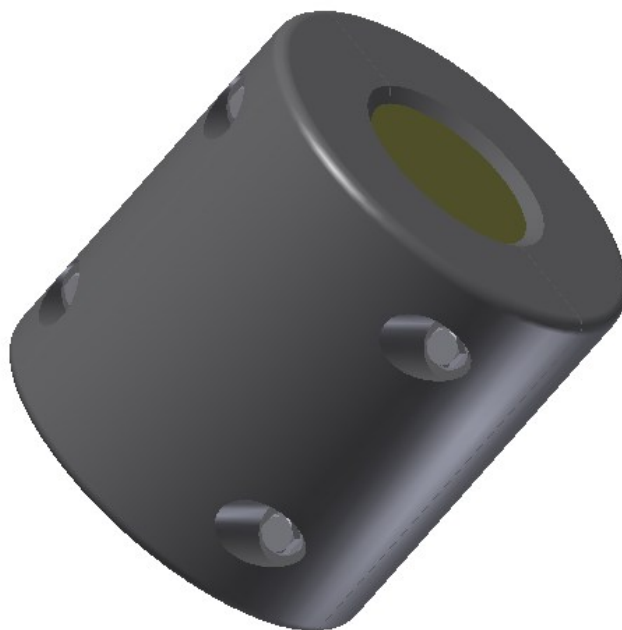


Obr. 11 Možné tvarové zajištění formy – a) s nose, b) polokoule

Varianta s nose je náchylná na poškození a to i v případě že má zaoblené hrany. Jejich umístění může bránit úpravám vtokové soustavy nebo by mohlo také omezovat dimenzování tloušťky stěny formy. Výhodou je jednodušší výroba, není zapotřebí stroje, který pracuje ve více osách. Jako tvarový prvek je výhodnější použít polokouli. Nebrání dimenzování vtokové soustavy a jen omezeně tloušťce stěny. Na delší součást je možné umístit více polokoulí za sebou a snadněji se demontuje.

Upevnění částí formy

Dále je zapotřebí aby, části formy při průběhu lití drželi při sobě. Je možné navrhnout formu, která bude spojena šrouby, ale taková forma bude zeslabená otvory, které by mohly narušit celkovou pevnost formy. Proto je vhodnější použít kovové stahovací pásy, které formu zajistí rovnoměrně po obvodu a udrží části při sobě. Navíc se snadno a rychle demontují. Počet pásek volíme dle nutnosti bez dalších úprav formy.



Obr. 12 Forma spojena šroubovým spojem

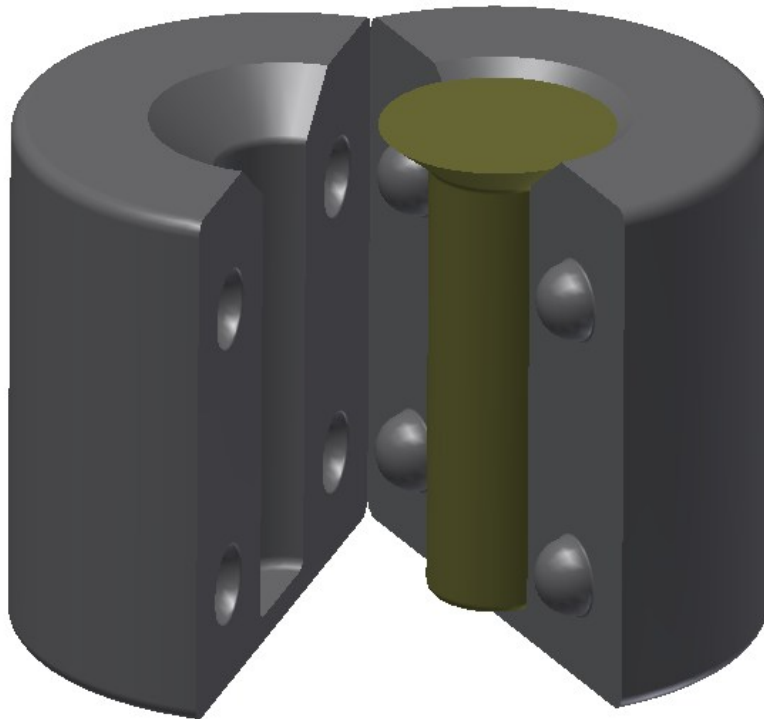


Obr. 13 Kovové stahovací pásy

7.2 Tepelná analýza MKP

Úvod

Model grafitové formy a titanový odlitek jsem vytvořil v programu Autodesk Inventor 2011.



Obr. 14 Model grafitové formy a titanového odlitku

Simulace tepelného prostupu

Pro simulaci prostupu tepla byl použit program Autodesk Simulation Multiphysics 2012

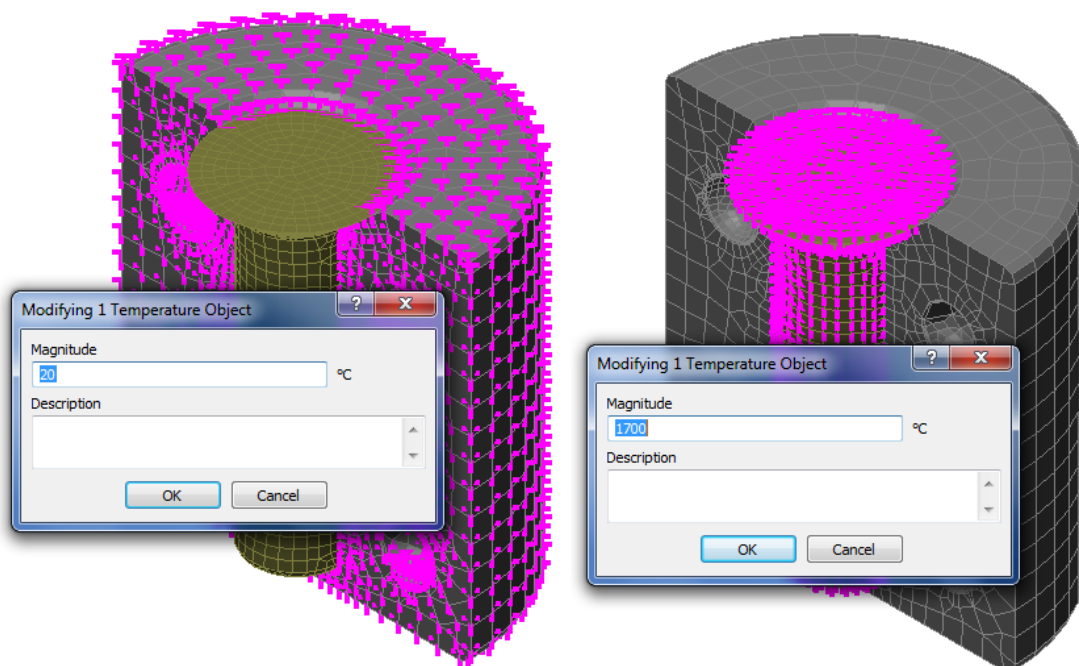
Celý proces lití titanu probíhá v uzavřeném stroji při vakuu 0,1 Pa, nebo v inertní atmosféře. Nedochozí tudíž k žádné konvekci, ale jen k volné radiaci z formy a odlitku na stěny pracovní komory stroje.

Simulaci jsem rozdělil na dvě části. V první část, počátečních 5s a druhou celkový čas 5400s (1,5h).

Okrajové podmínky

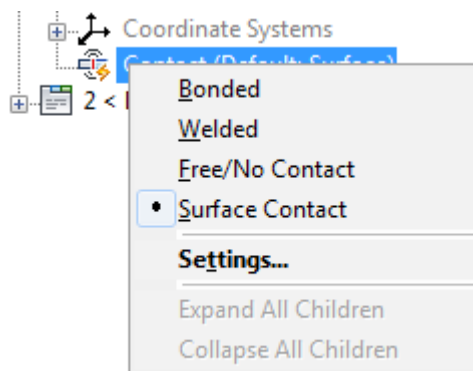
Jako teplota okolí je zvolena 20°C a teplota taveniny 1700°C. Celkový čas chladnutí podle poznatků z praxe je 1,5 – 2 hodiny. Teplota formy po tomto čase má být okolo 300 °C.

Jako materiál odlitku byl zvolen titan Ti6Al4V a grafit jako materiál formy. Podrobnější údaje jsou uvedeny v materiálových listech.



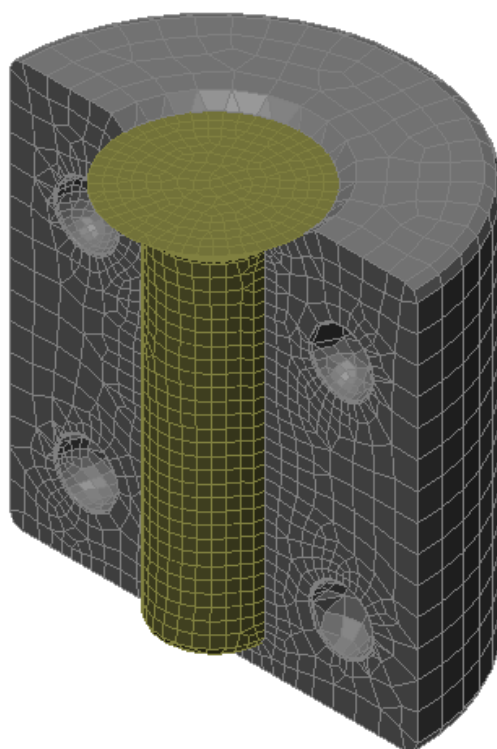
Obr. 15 Nastavení teplot součástí

Jako dotyky mezi formou a odlitkem jsem nastavil na přímý povrchový kontakt.



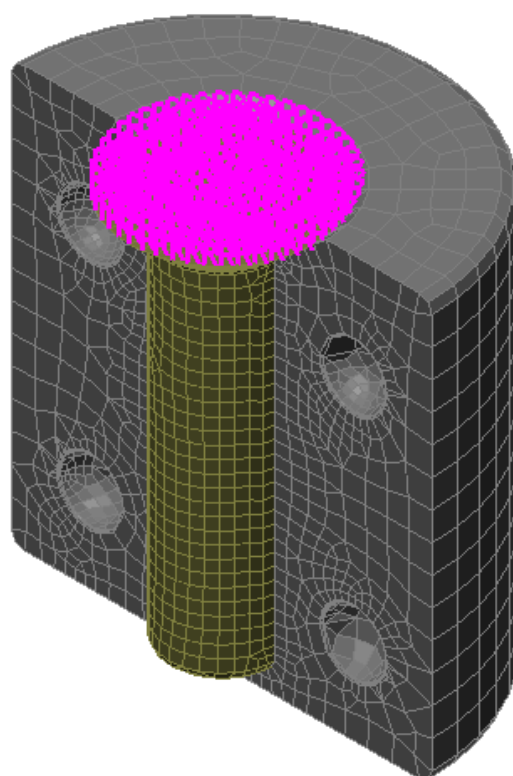
Obr. 16 Nastavení dotyků

Síť na modelu jsem vygeneroval tak, aby na otevřené části odlitku byla hustější, protože tam probíhá radiace už od počátku. Také v dělicí rovině formy jsem nastavil hustější síť pro lepší vizualizaci.

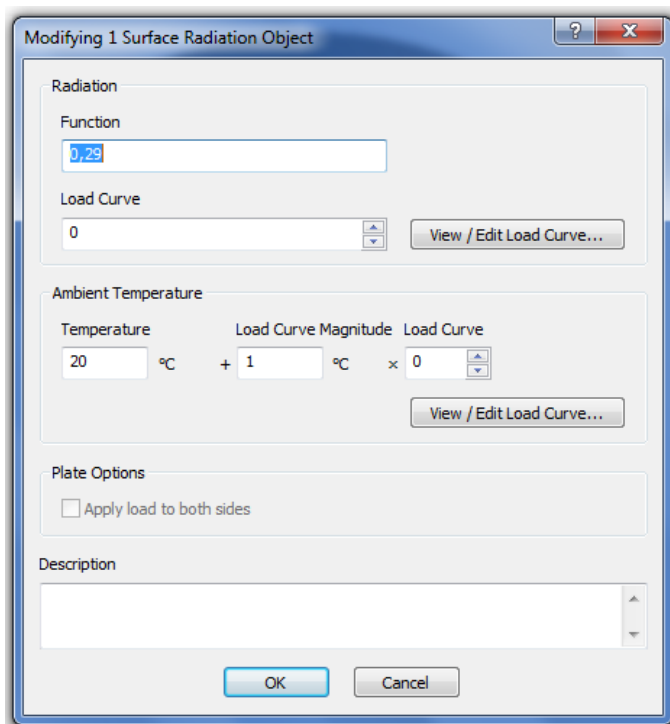


Obr. 17 Nastavení sítě

Po nalití materiálu do formy a vyplnění jejího objemu, začíná se teplo šířit radiací první horní otevřenou částí formy. Kde je tavenina přímo ve styku s pracovním prostorem stroje.



Obr. 18 Nastavení radiace otevřeného konce

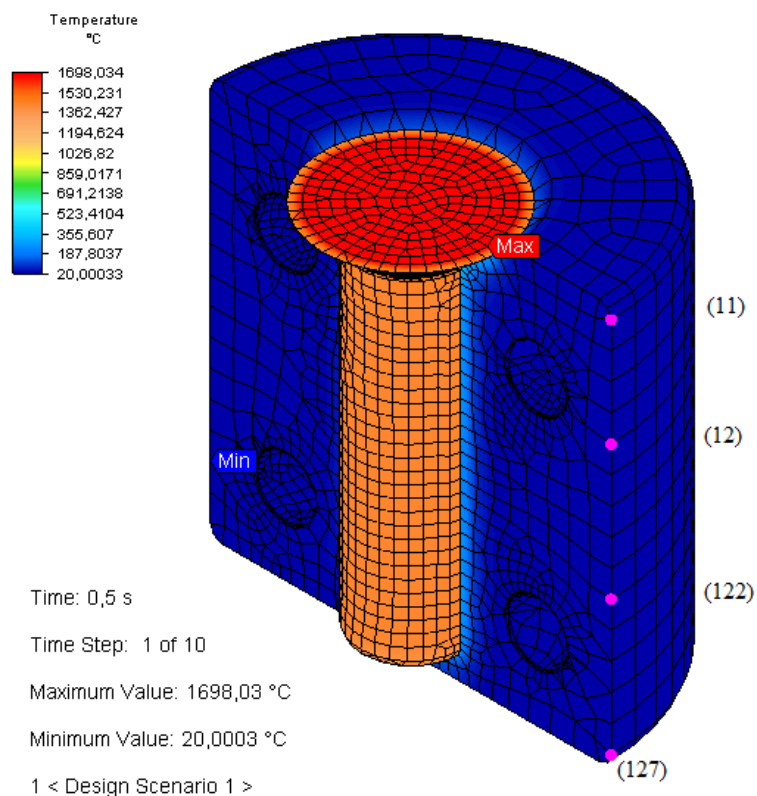


Obr. 19 Dialogové okno radiace otevřeného konce

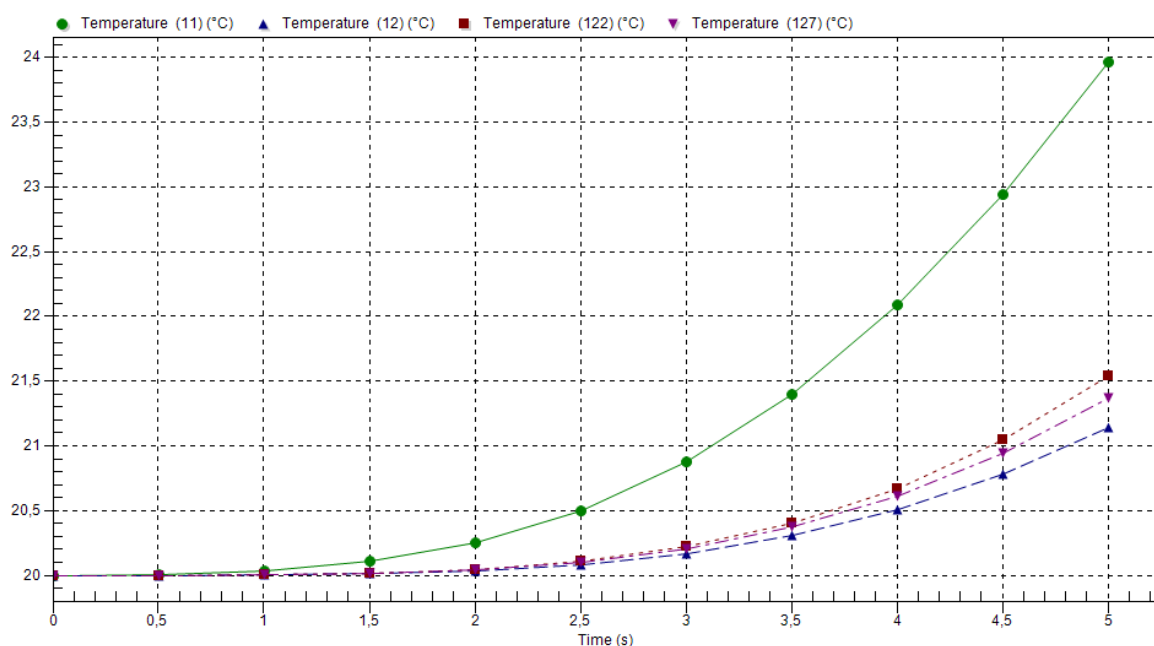
Jakmile stoupne teplota na vnějších stěnách formy, začne forma vyzařovat teplo do pracovního prostoru stroje. Forma se ale neprohřívá rovnoměrně, proto je zapotřebí rozdělit vnější povrch na několik částí, které začnou předávat teplo radiací s rozdílným počátečním časem.

Proto jsem vybral několik uzlů na povrchu formy a zjistil jejich průběh teplot. Všechny údaje jsem nechal vypsát do grafu, kde uzel (11) je první bod od shora formy a uzel (127) je poslední uzel.

Jak je vidět na grafu uzel (11) dosahuje dříve vyšších teplot než ostatní uzly. To znamená, že horní část formy se ohřívá dříve a poté se postupně zvedá teplota na zbytku povrchu.

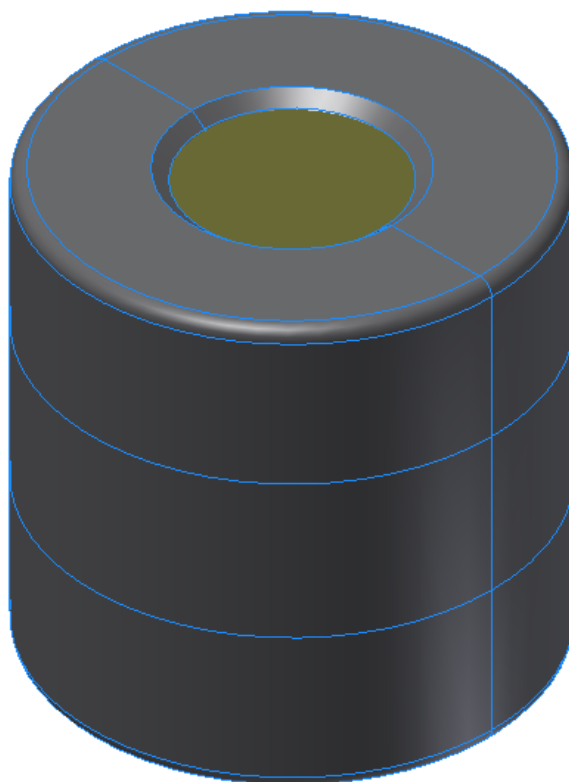


Obr. 20 Prvních 0,5s simulace a měřené uzly



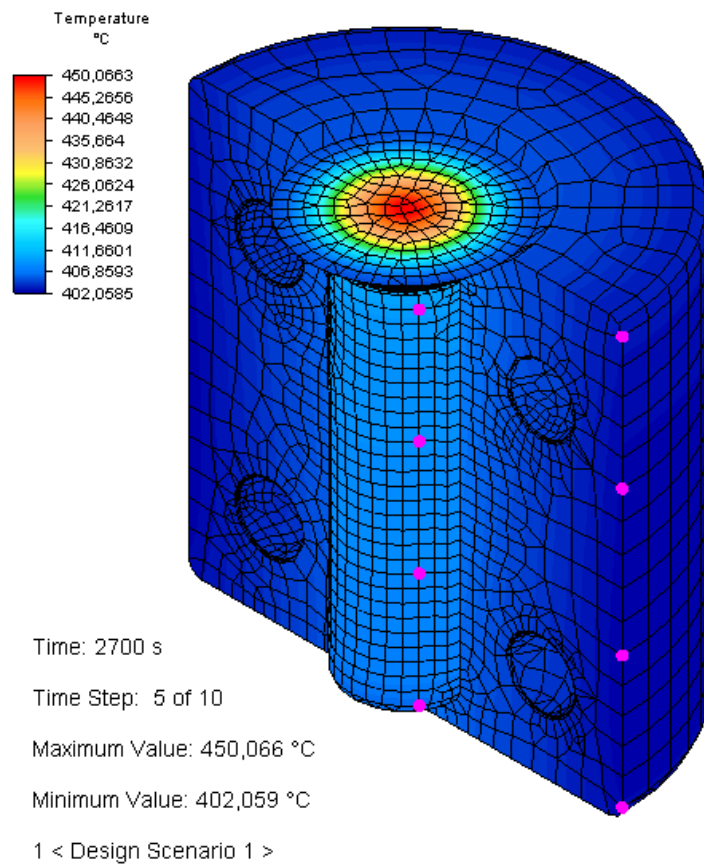
Obr. 21 Graf průběhu teplot v měřených uzlech

Vnější povrch formy jsem rozdělil na tři části a nastavil simulaci tak aby první povrch začal vyzařovat 3,1s po začátku simulace, tedy při dosažení teploty 20,5°C. Další po čase 3,7s a 3,9s.

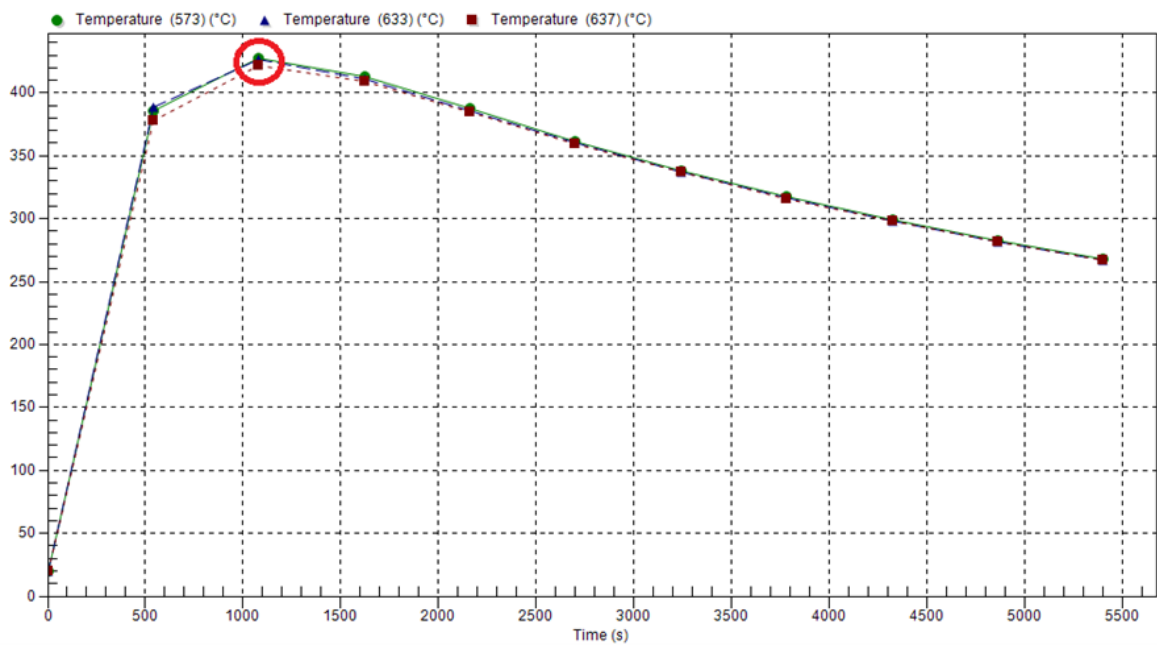


Obr. 22 Forma s rozděleným vnějším povrchem

Poté jsem nastavil simulaci na celkový čas 5400s a změřil jsem jak uzlové body na vnější části tak i na odlitku. Se stoupající teplotou stoupá i záření formy, dokud teplota formy nestoupne na nejvyšší bod, poté záření klesá. Proto jsem vykreslil graf a nastavil záření podle něj.

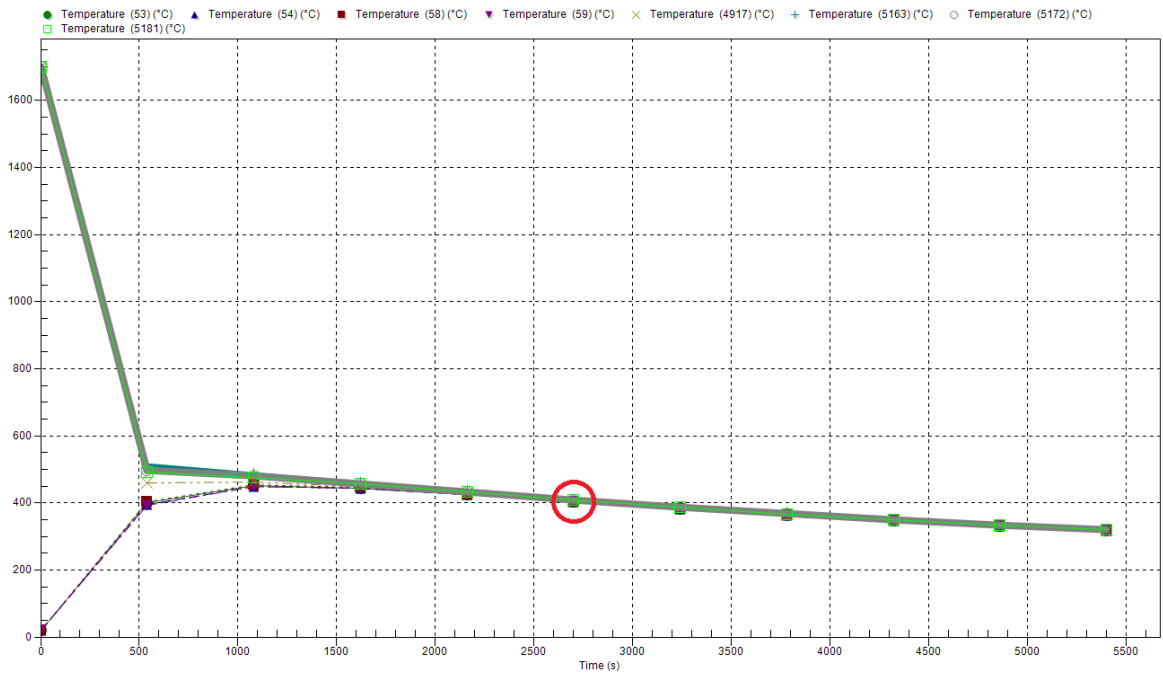


Obr. 23 Měření uzlových bodu odlitku a formy



Obr. 24 Graf s vyznačenou nejvyšší teplotou formy

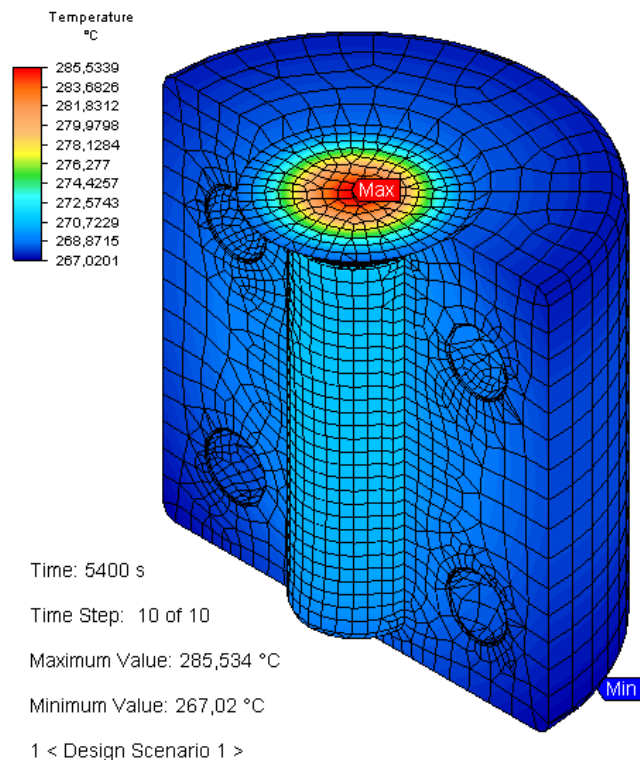
V čase 1620s dosahuje forma nevyšší teploty, do této doby záření stoupá.



Obr. 25 Graf s vyznačeným rovnovážným bodem

Dále jsem nechal vykreslit graf, kde jsou měřeny uzly na odlitku i formě. V čase 2700s se teplota odlitku a formy vyrovná na přibližně 408°C.

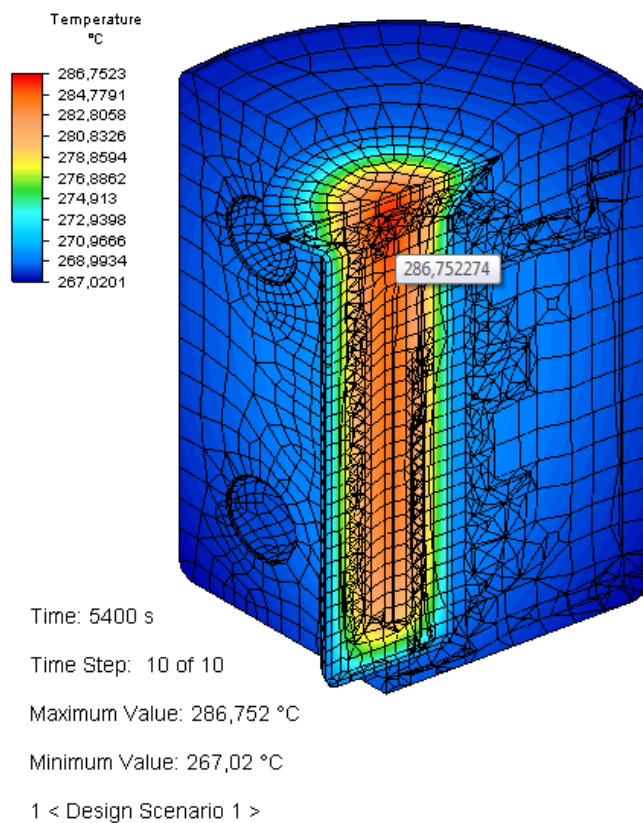
Obdobně jsem postupoval i u horního čela formy. Dno formy může být izolováno nebo může volně zářit, pokud bude posazeno na roštu.



Obr. 26 Simulace po 1,5 hodině

Závěr simulace přestupu tepla

Jak je vidět na obr. 26 tak teplota odlitku i formy se po 1,5 hodině se pohybuje okolo 285°C. Tedy hodnoty, které byly získány pomocí simulace MKP, jsou srovnatelné s praxí. Teplota uvnitř odlitku se stále pohybuje okolo 286°C obr. 27.

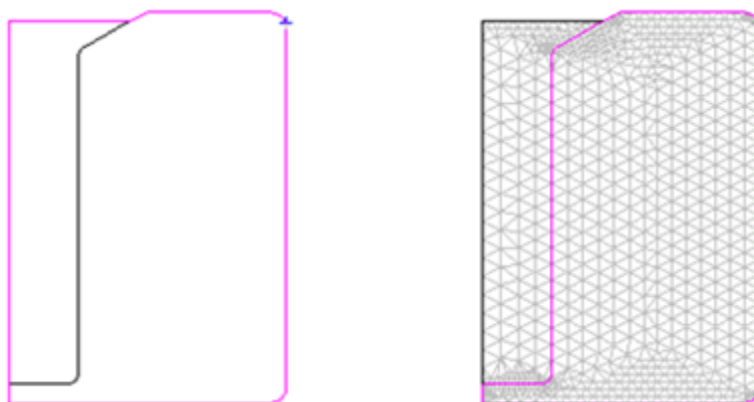


Obr. 27 Řez formou s odlitkem

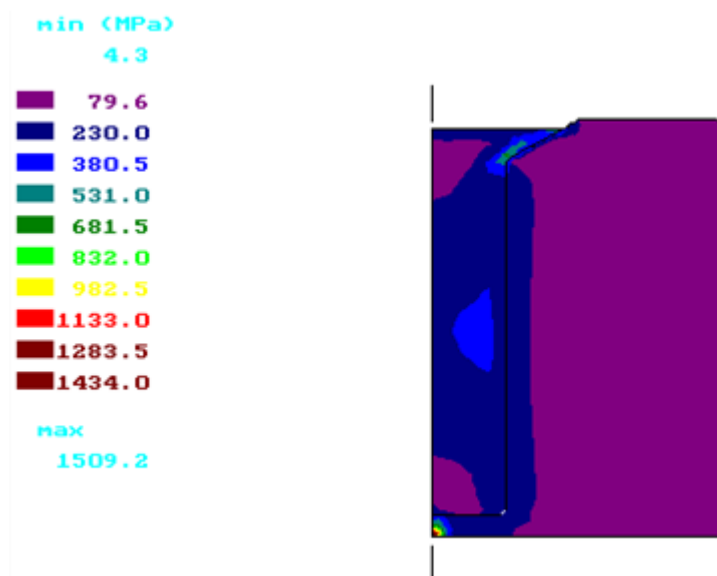
6.3 Pevnostní analýza MKP

Pevnostní analýzu jsem provedl v programu APEG. Nejprve jsem provedl simulaci zadané formy a poté jsem použil další tři konstrukční řešení a porovnal výsledky. Údaje o teplotách prostupu tepla jsem použil z předešlé simulace.

Program pracuje v 2D prostředí. Pro řešení této práce jsem využil funkce simulace rotačně symetrické součásti. To umožnilo vytvořit model v polovičním řezu. Vytvořil jsem geometrii těles a vygeneroval síť skládající se ze 786 uzlů a 1449 prvků. Dále jsem nastavil dotyk dna formy. Uzel, který se nachází v ose formy je zajištěn v obou osách. Uzel u zaoblení je zajištěn jen osovou složkou. Vykreslené napětí je redukované.

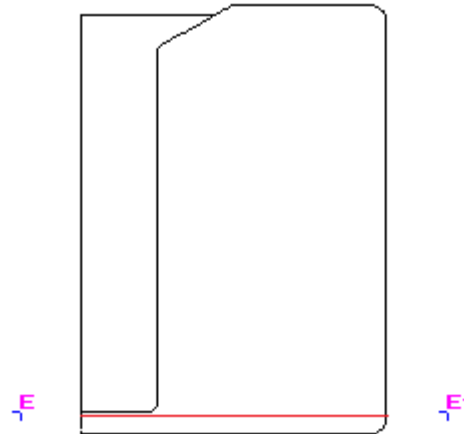


Obr. 28 Vykreslená geometrie a vygenerovaná síť

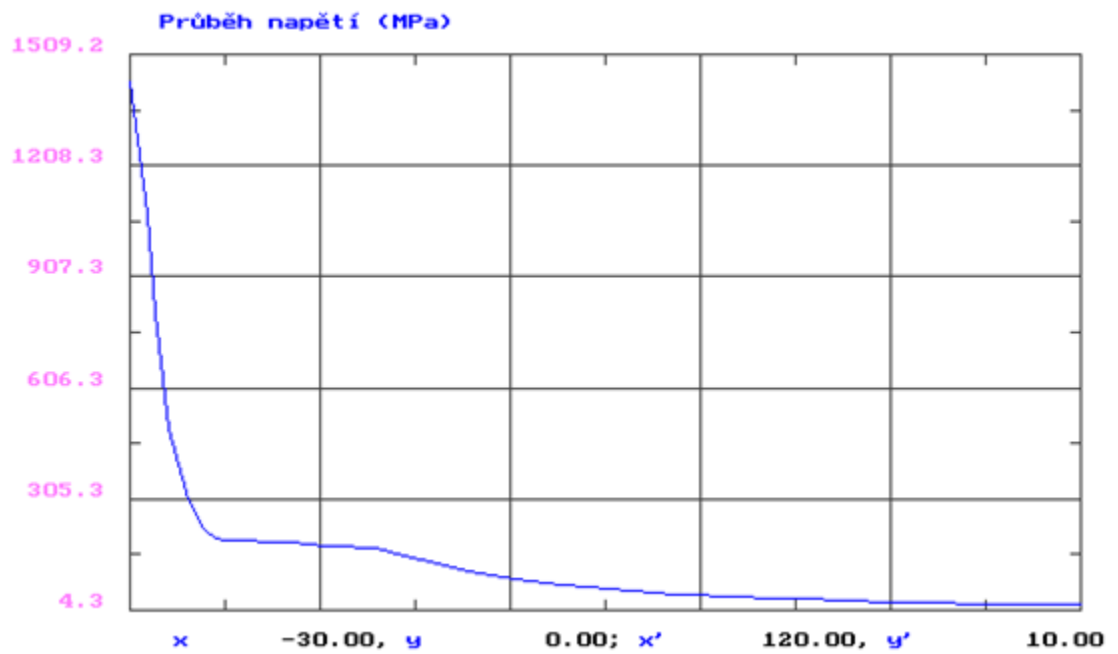


Obr. 29 Průběh napětí v zadané formě

Provedl jsem řez dnem formy a nechal vykreslit graf průběhu napětí.



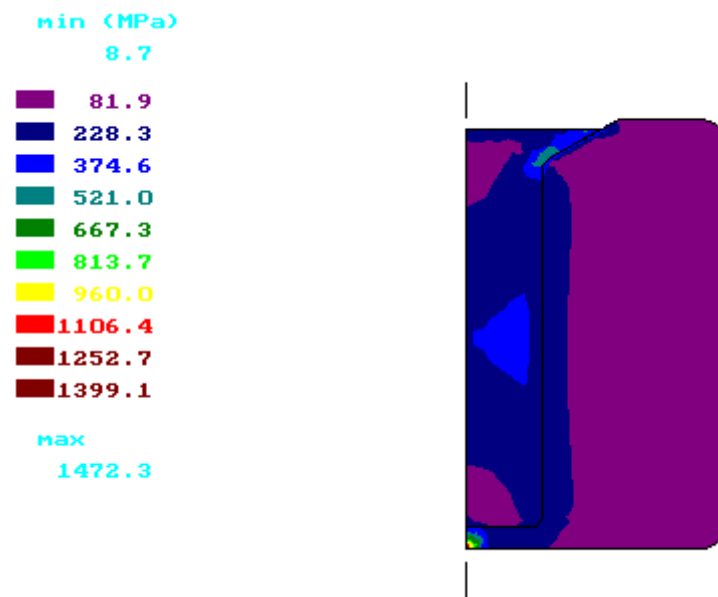
Obr. 30 řez dnem formy



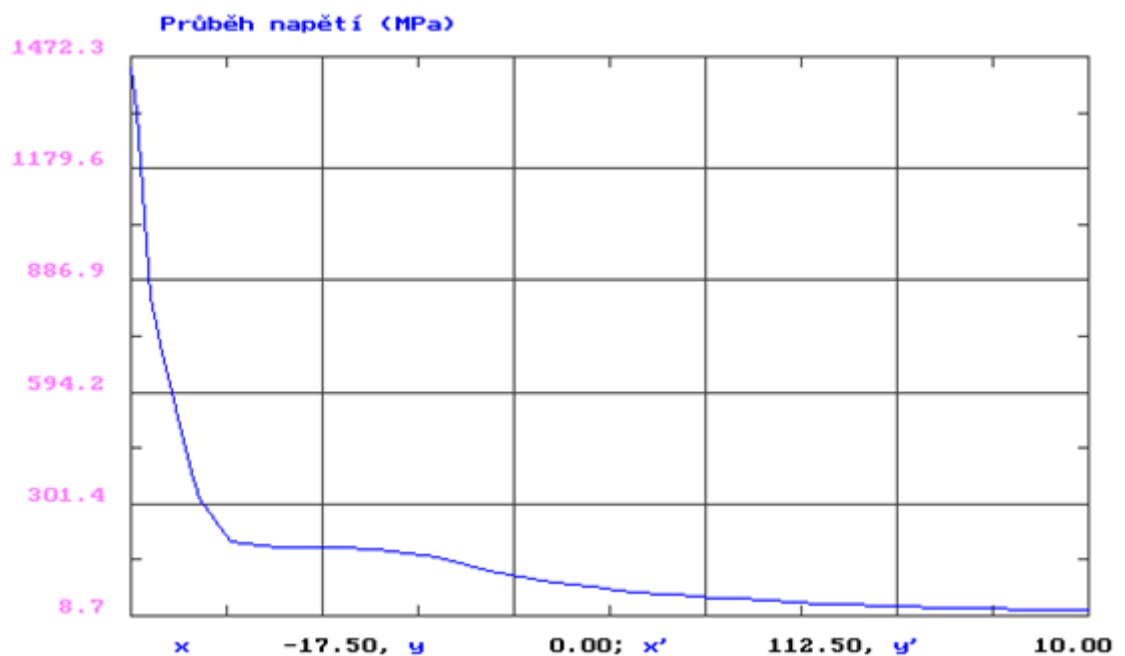
Obr. 31 Graf řezu zadané formy

V simulaci jsem nastavil několik časových úseků a vybral jen ten kdy je napětí největší a to v okamžiku nalití materiálu do formy.

První konstrukční úpravu jsem provedl tak že jsem zeslabil stěnu formy. Také jsem zvětšil zaoblené. Postupoval jsem obdobně jako u předešlé simulace. Vykreslil průběh napětí, provedl řez dnem a nechal vykreslit graf.

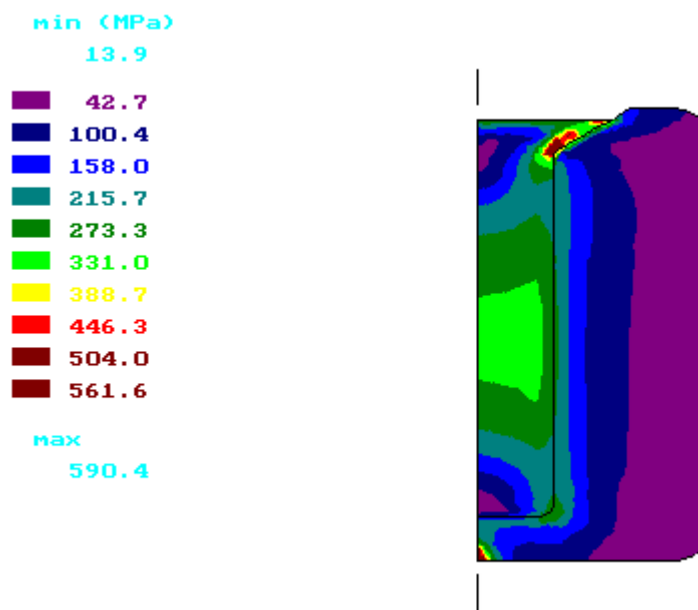


Obr. 32 Průběh napětí u zeslabené stěny

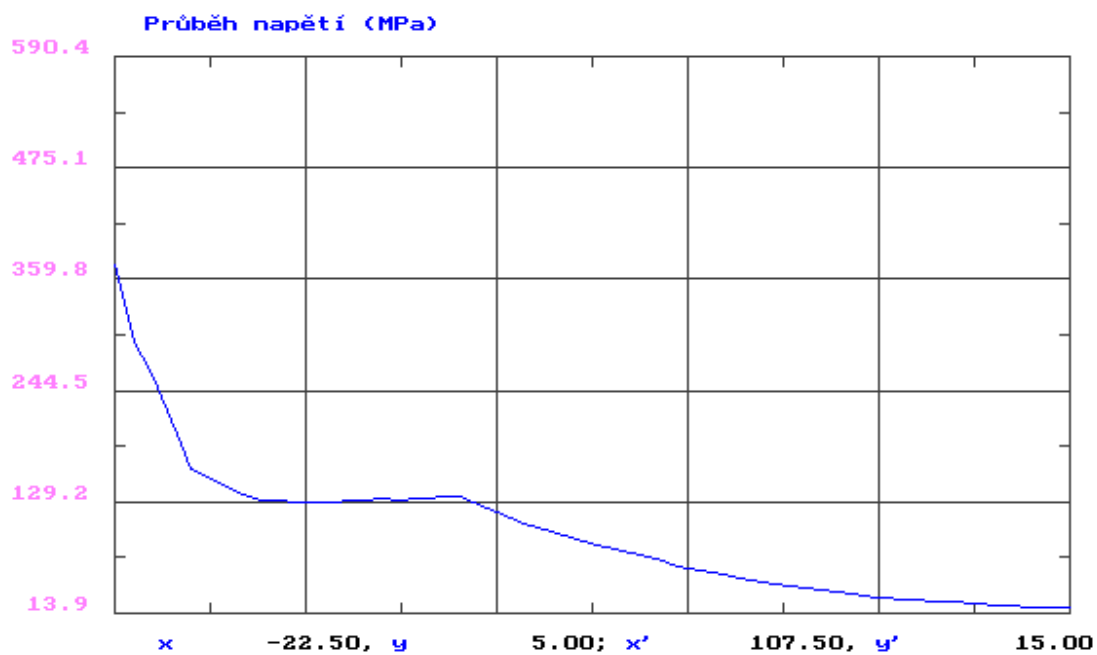


Obr. 33 Graf řezu formy se zeslabenou stěnou

Dále jsem použil zeslabenou stěnu a zesílil dno formy.

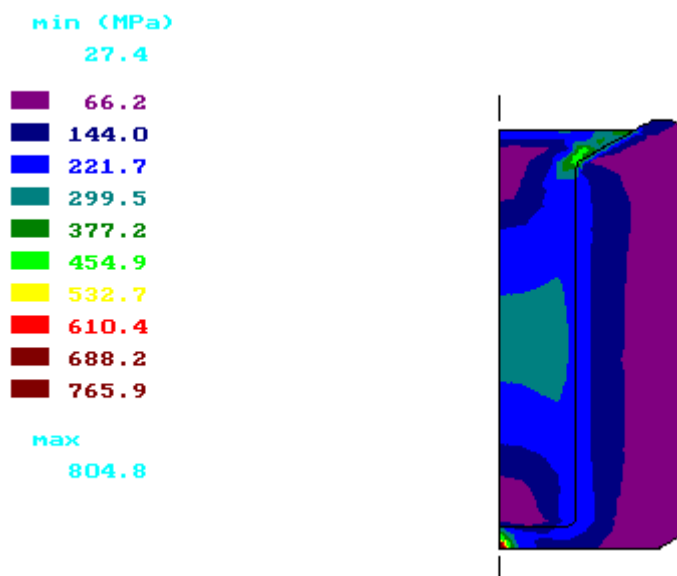


Obr. 34 Průběh napětí na formě se silnějším dnem a zeslabenou stěnou

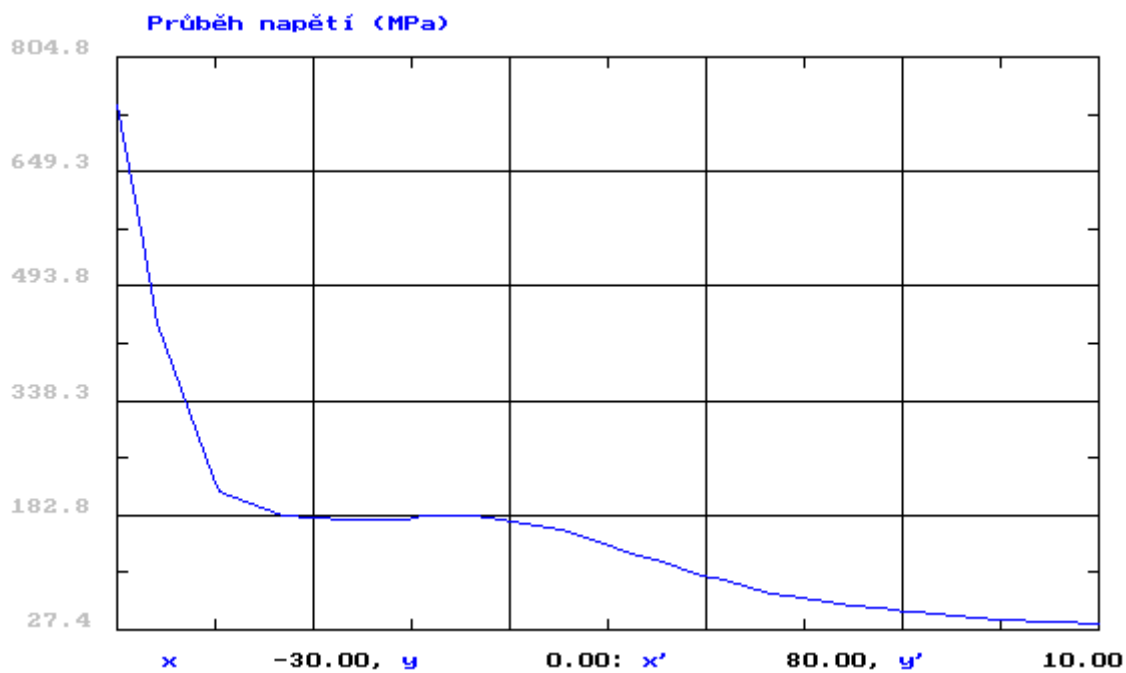


Obr. 35 Graf řezu formy se zeslabenou stěnou

V posledním řešení jsem ponechal původní tloušťku dna a zeslabil stěnu ještě více.



Obr. 36 Průběh napětí na formě s největším zeslabením



Obr. 37 Graf řezu formy s největším zeslabením

Závěr pevnostní simulace

Simulací konečných prvků jsem dospěl k výsledkům, ve kterém místě je forma nejvíce namáhaná a to je její dno. Jak je vidět z průběhů napětí všech konstrukčních variant formy žádné napětí nepřesáhlo maximální dovolené napětí 10,3 GPa, které dokáže daný materiál vydržet. Pouze v prvních dvou uvedených případech přesáhlo napětí 1 GPa. Je to způsobeno silnou stěnou, která je oproti tloušťce dna velká. Silná stěna přenáší napětí do dna formy, kde se hromadí. Z toho důvodu bylo zapotřebí zesílit dno, nebo zeslabit stěnu aby napětí pokleslo.

7. Závěr

Na formě, která byla zadaná laboratoří RMTVC byly provedeny simulace jak pevnostní tak i teplotní. Výsledky chladnutí formy se shodovaly s poznatky z praxe. Pevnostní analýzy byly pak srovnávány s navrhovanými konstrukčními řešeními, kde se kladly nároky hlavně na pevnostní únosnost formy a také na úsporu materiálu. Výsledkem je forma, která šetří až 7,044 kg grafitu. Její chladnutí je časově více náročnější. Pokud by šlo o hromadnou produkci, nebyla by to ta správná volba, ovšem pro potřeby laboratoře je vyhovující. Ukázalo se, že zeslabení stěny formy limituje její zajištění proti osazení v dělicí rovině. Použití tvarového styku polokoulí, vyžaduje určitou tloušťku stěny. To zabránilo zeslabení formy na minimální možnou mez z pevnostního hlediska. Vtoková soustava byla ponechána ze zadané formy, aby vyhovovala možnostem stroje a bylo možné bezpečně materiál z kelímku stroje nalít do formy.

8. Seznam použité literatury

- [1] SUSEN. *Laboratoř studených kelímků* [online]. 2014 [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: <http://susen2020.cz/vyzkumne-programy/program-jpc/laborator-studenych-kelimku/>
- [2] Experimental and numerical study of the cold crucible melting process. Science Direct [online]. 2006 [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X06000254#>
- [3] Vacuum Investment Casting (VIM-IC). ALD-VT[online]. 2013 [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: <http://web.ald-vt.de/cms/vakuum-technologie/anlagen/cold-crucible-vim/>
- [4] Castings Technology International[online]. 2007 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.castingstechnology.com/ismtialloys.asp>
- [5] GREENWOOD, N a Alan EARNSHAW. *Chemie prvků I*. 1. vyd. Praha: Informatorium, 1993, s. 1-793. ISBN 80-854-2738-9.
- [6] GREENWOOD, N a Alan EARNSHAW. *Chemie prvků II*. 1. vyd. Praha: Informatorium, 1993, s. 1-793. ISBN 80-854-2738-9.
- [7] NĚMČEK, Michal. Prvky B.skupin [online]. 2000 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://web.quick.cz/nemecek/bskup.html>
- [8] SEDLÁČEK, Vladimír. *Neželezné kovy a slitiny*. Vyd. 1. Praha: SNTL - nakladatelství technické literatury, 1979, 398 s. Řada hutnické literatury.
- [9] SUPŠ Turnov. Technologie [online]. 2005 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://konstrukce.webz.cz/sups/3too1.html>
- [10] ASM Aerospace Specification Metals, Inc. [online]. Pompano Beach, Florida 33069, 2014 [cit. 2014-05-06]. Dostupné z: <http://www.titaniumdistributor.com/titanium-technical-data.html>

- [11] Foundry: Management & Technology. <http://foundrymag.com/> [online]. 2014 [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: <http://foundrymag.com/feature/graphite-mold-casting-better-solution-all-around>
- [12] SubsTech. In: <http://www.substech.com/>[online]. 2013 [cit. 2014-05-07]. Dostupné z:
http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=graphite_molds_for_continuous_casting
- [13] Fyzika - energie. Kapalnění [online]. 2012 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z:
<http://uralyx.webz.cz/Skola/fyzika3.html>
- [14] HUBKA, Vladimír. *Konstrukční nauka: Obecný model postupu při konstruování*. Zürich: HEURISTA, Zürich, 1995, 118 s. ISBN 80-90 1135-0-8.

9. Seznam příloh

Materiálové listy:

Příloha č.1. - materiálový list TiGr1

Příloha č.2. - materiálový list TiGr2

Příloha č.3. - materiálový list TiGr5 (Ti-6Al-4V)

Příloha č.4. - materiálový list KTE-38

Výkresová dokumentace:

Výrobní výkres – DUR0038-01 Zadaná forma – levá polovina (výkres formátu A3)

Výrobní výkres - DUR0038-02 Zadaná forma – pravá polovina (výkres formátu A3)

Výrobní výkres - DUR0038-03 Slabší stěna – levá polovina (výkres formátu A3)

Výrobní výkres - DUR0038-04 Slabší stěna – pravá polovina (výkres formátu A3)

Výrobní výkres - DUR0038-05 Silnější dno – levá polovina (výkres formátu A3)

Výrobní výkres - DUR0038-06 Silnější dno – pravá polovina (výkres formátu A3)

Výrobní výkres - DUR0038-07 Více zeslabená stěna – levá polovina (výkres formátu A3)

Výrobní výkres - DUR0038-08 Více zeslabená stěna – pravá polovina (výkres formátu A3)

Výrobní výkres - DUR0038-09 Odlitek (výkres formátu A4)

Výkres sestavení - DUR0038-10 Forma (výkres formátu A3)

CD-ROM

Příloha č. 1.

Materiálový list

Titanium Grade 1 (TiGr1)

Složení: C max. 0,6%, Fe max. 0,2%, H max. 0,015%, N max. 0,03%, O max 0,18%, Ti 99,5%, hmotnostního podílu.

Fyzikální vlastnosti	Hodnoty
Hustota	4.51 g/cm ³
Mechanické vlastnosti	
Tvrdość, Brinell	120
Tvrdość, Knoop	132
Tvrdość, Rockwell C	70
Tvrdość, Vickers	122
Pevnosť v tahu, Ultimate	240 MPa
Prodloužení při přetržení	24 %
Youngův modul pružnosti	105 GPa
Poissonovo číslo	0.37
Modul pružnosti ve smyku	45 GPa
Tepelné vlastnosti	
Koeficient tepelné roztažnosti, lineární 20°C	8.6 μm/m ⁻¹ °C ⁻¹
Koeficient tepelné roztažnosti, lineární 250°C	9.2 μm/m ⁻¹ °C ⁻¹
Koeficient tepelné roztažnosti, lineární 500°C	9.7 μm/m ⁻¹ °C ⁻¹
Měrná tepelná kapacita	0.52 J/g ⁻¹ °C ⁻¹
Tepelná vodivost	16 W/m ⁻¹ K ⁻¹
Teplota tavení	Max. 1670 °C
Liquidus	1670 °C

Uvedené hodnoty dle [10].

Příloha č. 2.

Materiálový list

Titanium Grade 2 (TiGr2)

Složení: C max. 0,1%, Fe max. 0,3%, H max. 0,015%, N max. 0,03%, O max 0,25%, Ti 99,2%, hmotnostního podílu.

Fyzikální vlastnosti	Hodnoty
Hustota	4.51 g/cm ³
Mechanické vlastnosti	
Tvrdość, Knoop	170
Tvrdość, Rockwell C	80
Tvrdość, Vickers	145
Pevnosť v tahu	344 MPa
Prodloužení při přetržení	20 %
Youngův modul pružnosti	105 GPa
Poissonovo číslo	0.37
Modul pružnosti ve smyku	45 GPa
Tepelné vlastnosti	
Skupenské teplo tání	325 J/kg
Koeficient tepelné roztažnosti, lineární 20°C	8.6 μm/m ⁻¹ °C ⁻¹
Koeficient tepelné roztažnosti, lineární 250°C	9.2 μm/m ⁻¹ °C ⁻¹
Koeficient tepelné roztažnosti, lineární 500°C	9.7 μm/m ⁻¹ °C ⁻¹
Měrná tepelná kapacita	0.523 J/g ⁻¹ °C ⁻¹
Tepelná vodivost	16.4 W/m ⁻¹ K ⁻¹
Teplota tavení	Max. 1665 °C
Liquidus	1665 °C

Uvedené hodnoty dle [10].

Příloha č. 3.

Materiálový list

Titanium Grade 5 (Ti-6Al-4V)

Složení: Al 6%, Fe max. 0,25%, O max 0,2%, Ti 90%, V 4% hmotnostního podílu.

Fyzikální vlastnosti	Hodnoty
Hustota	4.43 g/cm ³
Mechanické vlastnosti	
Tvrdość, Brinell	334
Tvrdość, Knoop	363
Tvrdość, Rockwell C	36
Tvrdość, Vickers	349
Pevnosť v tahu	950 MPa
Prodloužení při přetržení	14 %
Youngův modul pružnosti	113.8 GPa
Poissonovo číslo	0.342
Modul pružnosti ve smyku	44 MPa
Tepelné vlastnosti	
Koeficient tepelné roztažnosti, lineární 20°C	8.6 μm/m ⁻¹ °C ⁻¹
Koeficient tepelné roztažnosti, lineární 250°C	9.2 μm/m ⁻¹ °C ⁻¹
Koeficient tepelné roztažnosti, lineární 500°C	9.7 μm/m ⁻¹ °C ⁻¹
Měrná tepelná kapacita	0.5263 J/g ⁻¹ °C ⁻¹
Tepelná vodivost	6.7 W/m ⁻¹ K ⁻¹
Teplota tavení	1604 - 1660 °C
Solidus	1604 °C
Liquidus	1660 °C

Uvedené hodnoty dle [10].

Příloha č. 4.

Materiálový list

KTE-38

Měrná hustota	1,75	g/cm ³
Porozita	17-20	%
Spec. el. odpor	8	Ω.mm ² /m
Pevnost v tlaku	48-50	N/mm ²
Pevnost v ohybu	24,5	N/mm ²
Obsah popele	-	%
Koef. Teplotní roztažnosti	3,3	10 ⁻⁶ /m.K
Tepelná vodivost	174	W/m.K
Max. zrnitost	0,8	mm
Tvrdość Brinell	-	(10/100)
Tvrdość Rockwell	-	(10/60)
Tvrdość Shore	35	(°S)
Modul pružnosti	10,3	GPa

Všechny hodnoty jsou průměrné (příznačné hodnoty).

KARBOTECHNIK spol. s . r. o.
Staniční 10, 312 00 Plzeň
Czech Republic

Tel./ Fax: +420 377 262176
E-mail: mail@karbotechnik.cz
URL: <http://www.karbotechnik.cz>