

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**ZÁVĚREČNÁ
PRÁCE**

2016

**BC. JAROSLAV
JIRUTKA**

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k práci.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů.

V dne

.....

podpis

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jirutka** Jméno: **Jaroslav** Osobní číslo: **409592**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Racionalizace odlitku lože obráběcího stroje z LLG

Název diplomové práce anglicky:

The rationalization machine bad casting from grey iron

Pokyny pro vypracování:

- 1., Úvod
2. Klasifikace vad odlitků z LLG
3. Typy a vlastnosti LLG
4. Počítačové simulace slévárenských procesů
5. Analýza odlitku lože
6. Návrh a optimalizace technologie pomocí simulace
7. Zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího, WoS, Scopus atd...

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Aleš Herman Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **21.04.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **10.08.2017**

Platnost zadání diplomové práce: **10.08.2017**



Podpis vedoucí(ho) práce



Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



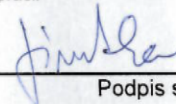
Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

3.5.2017

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

ANOTACE

Tato diplomová práce se zabývá v úvodní části nejčastějšími vadami v litině s lupínkovým grafitem. V další kapitole se věnuje rozdělení litin s lupínkovým grafitem, vliv prvků na slitinu a její mechanické vlastnosti. Dále podává přehled o nejpoužívanějších simulačních softwarech v současné době v oblasti slévárenství. V praktické části se podrobně zabývá racionalizací odlitku lože obráběcího stroje z litiny s lupínkovým grafitem. Na odlitku se vyskytly vady neslučitelné s předávkou zákazníkovi. Cílem této práce je provést počáteční analýzu pomocí numerické simulace, navrhnout optimální technologickou variantu a ověřit ji opět pomocí numerické simulace.

ANNOTATION

This thesis deals with the most frequent defects in cast iron with flake graphite. In the next chapter is focused on the casting of cast iron with flake graphite, the influence of the elements on the alloy and its mechanical properties. It also provides an overview of the most used simulation software currently in the field of foundry. The practical part deals with the rationalization of the casting of the casting machine of cast iron with flake graphite. There were defects incompatible with the overdose on the customer. The aim of this work is to perform an initial analysis using numerical simulation, to design an optimal technological variant and to verify it again using numerical simulation.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce panu Ing. Alešovi Hermanovi, PhD., dále panu doc. Ing. Antonínovi Moresovi, CSc. za veškeré poskytnuté odborné konzultace během práce a panu Janovi Bredlovi za poskytnuté informace a podklady k této práci ze strany Metalurgie Rumburk. V neposlední řadě bych rád poděkoval svým rodičům za jejich psychickou a finanční podporu při studiu.

Obsah

1	ÚVOD A CÍLE PRÁCE	1
2	PŘEHLED A KLASIFIKACE VAD ODLITKŮ	2
2.1	ROZTŘÍDĚNÍ VAD ODLITKŮ PODLE SKUPIN A DRUHŮ	3
2.2	PŘEHLED NEJČASTĚJŠÍCH VAD V LLG.....	4
2.2.1	VODÍKOVÉ BUBLINY	4
2.2.2	DUSÍKOVÉ BUBLINY	5
2.2.3	BUBLINY OXIDU UHELNATÉHO	7
2.2.4	STAŽENINY	7
2.2.5	MEZIKRYSTALICKÉ KARBIDY	8
2.2.6	GRAFITICKÉ SÍŤOVÍ	9
2.2.7	STEADIT	10
2.2.8	ZALITÍ STRUSKY	11
2.2.9	PŘIPEČENINY FORMOVACÍ SMĚSI	11
2.2.10	SHRNUTÍ.....	12
3	TYPY A VLASTNOSTI LLG	13
3.1	VLIV PRVKŮ NA STRUKTURU A MECHANICKÉ VLASTNOSTI LLG	15
3.2	VLIV OCHLAZOVÁNÍ, OČKOVÁNÍ A TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ NA LLG	19
4	PŘEHLED SIMULAČNÍCH PROGRAMŮ	22
4.1	PROCAST	24
4.2	MAGMASOFT	25
4.3	NOVA FLOW&SOLID	26
4.4	CAPCAST	27
4.5	SOLIDCAST	28
5	ANALÝZA ODLITKU	30
6	SIMULACE TECHNOLOGICKÝCH VARIANT ODLITKU	33
6.1	SIMULACE Č.: 1.....	34
6.2	SIMULACE Č.: 2.....	40
6.3	SIMULACE Č.: 3.....	48

6.4	SIMULACE Č.: 4.....	56
6.5	SIMULACE Č.: 5.....	62
6.6	SIMULACE Č.: 6.....	70
7	ZÁVĚR.....	79
8	ZDROJE.....	82
9	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	84
10	SEZNAM TABULEK.....	88
11	SEZNAM POUŽITÉHO SOFTWARE.....	89

1 ÚVOD A CÍLE PRÁCE

Tato práce si v řešeršní části klade za cíl seznámit čtenáře s problematikou litiny s lupínkovým grafitem (dále jen „LLG“). V první části se věnuje třídění vad dle skupin a druhů v odlitcích a výskytem nejčastějších vad v LLG. V další kapitole je rozebráno chování LLG jako takové, vliv prvků a dalšího technologického zpracování na mechanické vlastnosti. V poslední části rešerše jsou shrnuty nejpoužívanější simulační programy v oblasti slévárenství.

V praktické části se práce zaměřuje na racionalizaci odlitku lože soustruhu z LLG. Odlitek byl vyroben firmou Metalurgie Rumburk. Nicméně při dokončovacích operacích byly zjištěny vady neslučitelné s předávkou pro zákazníka. Cílem této práce je tak analýza odlitku pomocí numerické simulace a zjištění možných příčin vad, návrh možných technologických variant a jejich ověření k dosažení výroby bezproblémového odlitku.

Dohromady bylo vytvořeno 5 technologických variant. Je důležité zmínit, že nebyly měněny žádné procesní parametry (licí teplota, čas lití, složení tavby), ale pouze formovací technologie (chladítka, pomocné vtoky, rozdělené vtokové soustavy).

2 PŘEHLED A KLASIFIKACE VAD ODLITKŮ

Vadou odlitku se rozumí každá odchylka rozměrů, váhy, vzhledu, makrostruktury nebo vlastností, zjištěných laboratorními zkouškami od příslušných norem nebo sjednaných technických podmínek.

Vady odlitku mohou být:

- zjevné
- skryté

Zjevná vada odlitku je vada, kterou je možno zjistit při prohlídce neobrobeného odlitku prostým okem nebo jednoduchými pomocnými měřidly.

Skrytá vada odlitku je vada, kterou je možno zjistit až po obrobení odlitku nebo prorýsováním nebo pomocí vhodných přístrojů či laboratorními zkouškami.

Výraz vada odlitku má význam podmíněný. Podle ustanovení příslušných norem nebo sjednaných technických podmínek může být táž odchylka někdy přípustnou vadou, jindy vadou nepřipustnou, opravitelnou nebo odstranitelnou. [1]

Vysvětlení pojmů:

Nepřipustná vada je taková odchylka od příslušných norem nebo sjednaných technických podmínek, kterou nelze odstranit opravou nebo jejíž oprava je podle příslušných norem nebo sjednaných technických podmínek nepřipustná.

Připustná vada je taková vada, kterou příslušné normy nebo technické dodací podmínky připouštějí, aniž by požadovaly její odstranění u výrobce odlitku, pokud není zvláštními podmínkami výslovně zakázána.

Opravitelná vada je taková odchylka od příslušných norem nebo sjednaných technických podmínek, jejíž oprava vhodným způsobem (zavařením, vyrovnáním, vyžiháním apod.) je těmito normami nebo technickými podmínkami dovolena nebo není výslovně zakázána.

Odstranitelná vada je taková odchylka od příslušných norem nebo technických sjednaných podmínek, kterou je možno odstranit po dohodě se spotřebitelem odlitku jen zvláštními úpravami, nepředpokládaným výrobním postupem, např. vypouzdřením, nepředepsaným tepelným zpracováním apod. [1]

2.1 ROZTRÍDĚNÍ VAD ODLITKŮ PODLE SKUPIN A DRUHŮ

Jednotlivé vady se označují dvoumístným číslem. První číslice vyjadřuje skupinu vad, druhá číslice vyjadřuje druh vady v rámci příslušné skupiny.

Číselné označení vady je stejné pro všechny druhy odlitků ze slitin železa i ze slitin neželezných kovů.

Vady odlitků se třídí podle vnějších znaků do sedmi skupin. V rámci těchto skupin se třídí vady podle druhů. [1]

Tabulka 1: Rozdělení vad odlitků [1]

Číslo skupiny vady	Název skupiny vady	Číselné označení vady	Název druhu vady
1	Vady tvaru, rozměrů a váhy	11	Nezaběhnutí
		12	Přesazení
		13	Zatekliny
		14	Vyboulení
		15	Zborcení
		16	Mechanické poškození
		17	Nedodržení rozměrů
		18	Nedodržení váhy
2	Vady povrchu	21	Přípečeniny
		22	Zavaleniny
		23	Zálupy
		24	Nárosty, strupy
		25	Výronky
		26	Výpotky
		27	Okujení, opálení
		28	Omačkání, otlučení, pohmoždění
3	Přerušení souvislosti	31	Trhliny
		32	Praskliny
4	Dutiny	41	Bubliny
		42	Bodliny
		43	Staženiny
		44	Řediny
		45	Mikrostaženiny
		46	Mikrobubliny

5	Vměstky	51	Struskovitost
		52	Zadrogeniny
		53	Nekovové vměstky
		54	Broky
		55	Kovové vměstky
6	Vady struktury	61	Odmíšení
		62	Nevyhovující lom
		63	Zatvrdlina, zákalka
		64	Obrácená zákalka
		65	Nesprávná struktura
7	Vady chemického složení, nesprávné fyzikální nebo mechanické vlastnosti	71	Nesprávné chemické složení
		72	Nevyhovující mechanické vlastnosti
		73	Nevyhovující fyzikální vlastnosti

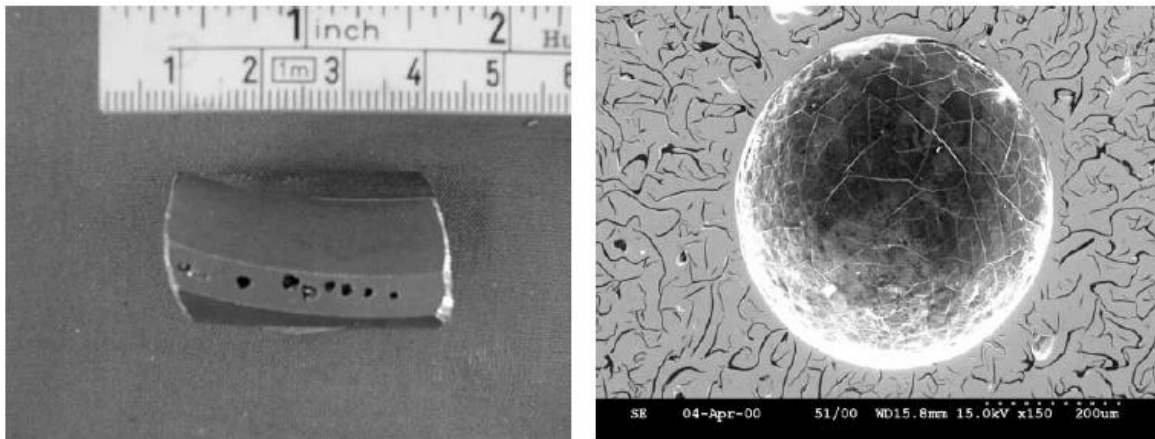
2.2 PŘEHLED NEJČASTĚJŠÍCH VAD V LLG

Vadné odlitky, běžně malá část odlitků slévárny, jsou časově a finančně náročné na zjištění a jejich následnou opravu. Zde jsou uvedeny nejčastější vady LLG založeny na případové studii z výzkumného centra Elkem. Při indikaci jakéhokoli defektu je nezbytné dobré metalografické vybavení k získání správných výsledků a vyvarovat se tak omylům při identifikaci vad, zvláště pokud hovoříme o bublinách jako nepřijatelné vadě. Jiné vady, jako třeba „ostatný grafit“, mohou vyžadovat velké zvětšení k detekci vady. [2]

2.2.1 VODÍKOVÉ BUBLINY

Tato vada může být považována za jednu z finančně nejnáročnějších, jelikož k její indikaci dochází až při následném obrábění odlitku. Vodíkové bubliny se vyskytují jak v šedé tak tvárné litině a mají tendenci malých sférických dutin pod povrchem odlitku. Vnitřní povrch dutiny má spojitě grafitické linie a proto se zdají být černé a lesklé. Tato precipitace grafitu na povrch dutiny je způsobena oduhličením v bezprostředním okolí dutiny. [2]

Vodíkové bubliny mohou být způsobeny několika faktory, a to jak samostatně tak v kombinaci. Nejčastější z příčin je vysoký obsah hliníku nebo titanu v základní vsázce, což způsobí reakci s vlhkostí z formovací směsi nebo mokrého nářadí. Ostatní zdroje vlhkosti mohou být mokré nebo olejem nasáklé materiály (včetně koroze), nadměrný výskyt mrtvého jílu ve formovací směsi, který má tendenci zadržovat vlhkost, použití starých jader, která nasákla vlhkost z okolní atmosféry. [2]



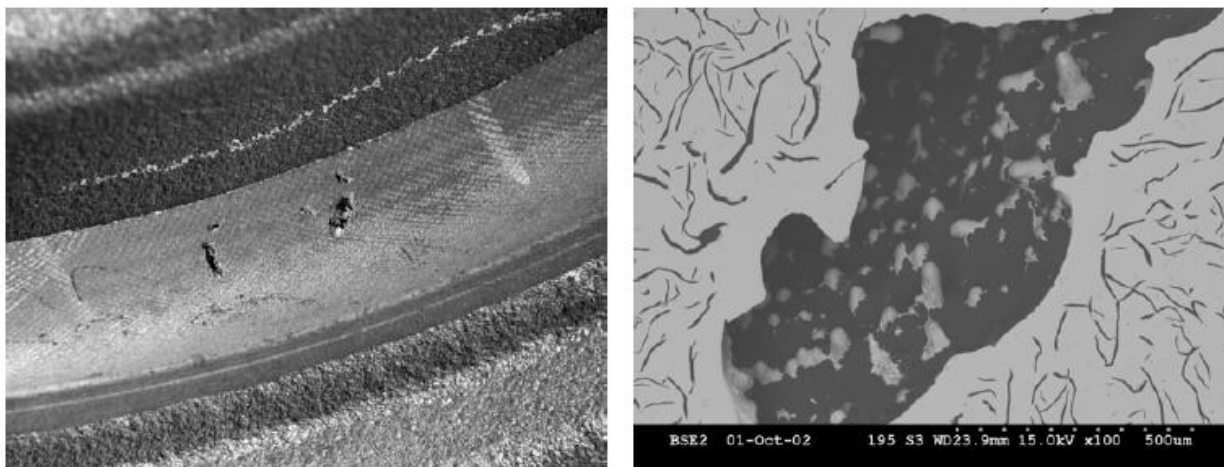
Obrázek 2.1 – vada 41, detekce vady při obrábění (vlevo), analýza vady a její zvětšení (vpravo) [2]

Prevence vodíkových bublin nebo snížení jejich výskytu může být docíleno dodržením obsahu hliníku v železné vsázce pod 200 ppm a minimalizací obsahu titanu. Důsledná kontrola železného šrotu, vyvarování se přetavování vermikulární litiny a eliminace smaltovaného šrotu v tomto případě pomůže. Některé housky mohou také obsahovat titan. Péče by měla být věnována také řádnému vysušení žáruvzdorných záplat a povlakovaným nástrojům před jejich použitím a dostatečné doplnění nové formovací směsi k prevenci vzniku mrtvého jílu. Vlhkost soustavy by neměla přesáhnout 3%. Jádra a povlaky na vodní bázi by měly být plně vytvrzeny a vysušeny před nalitím kovu do formy. Zvýšení lící teploty a uhlíkového ekvivalentu též vedou ke snížení výskytu této vady. [2]

2.2.2 DUSÍKOVÉ BUBLINY

Dusíkové bubliny mohou být povrchového nebo podpovrchového charakteru. Příklad zobrazený na obrázku 2.2 byl objeven při obrábění, tedy v nejdražší technologické dokončovací operaci. Dutiny se objevují nejvíce od středně do nejvíce masivních částí odlitku (tloušťka stěny) a jsou často přilehlé k pryskyřici vázaným jádrům nebo formovací směsi. Dutiny nebo praskliny jsou nepravidelného tvaru (na rozdíl od vodíkových bublin) a jsou orientovány kolmo k povrchu odlitku a pronikají v řádech jednotek milimetrů směrem do odlitku. Vnitřní povrch dutiny má kontinuální nebo

dis-kontinuální grafitové obložení spojené s oduhličením v bezprostředním okolí dutiny. Tento jev můžeme pozorovat na obrázku 2.2. Dále můžeme vidět dendrity vyrůstající směrem do dutiny. V případech kdy jsou grafitové vločky vidět, se zkrátí a jsou silnější, což je typickým znakem dusíkových bublin. [2]



Obrázek 2.2 – vada 41, detekce vady při obrábění (vlevo), analýza vady a její zvětšení (vpravo) [2]

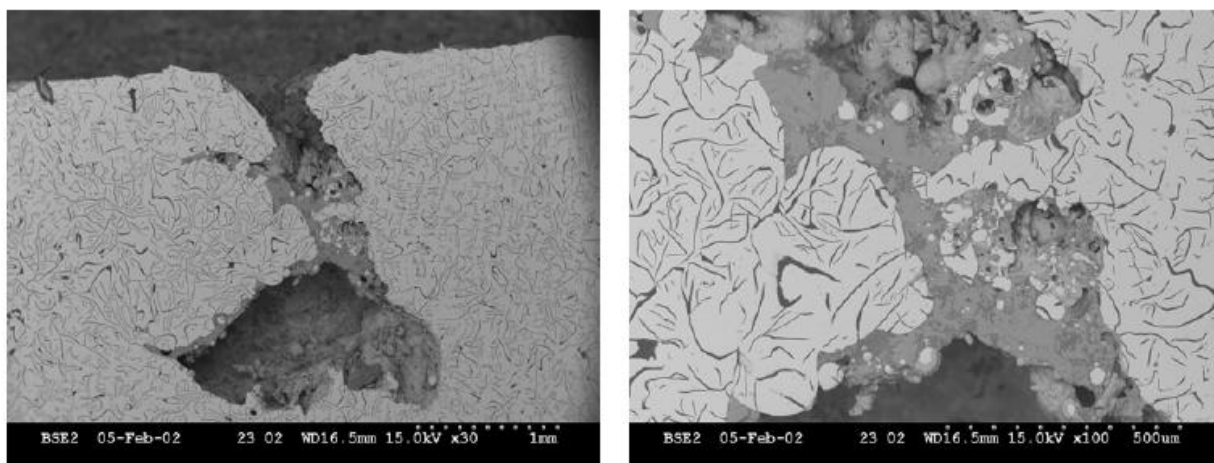
Dusíkové bubliny jsou způsobeny jednoduše nadbytkem dusíku v systému. V kuplovných tavící šedou litinu tento jev přichází s velkým množstvím přetavovaného šrotu ve vsázce, což vyžaduje vyšší množství koksů. Zatímco u indukčních pecí je příčinou nízká kvalita a vysoký obsah dusíku v karburizéru. Použití některých pryskyřic při výrobě jader nebo formy mohou také vést k lokálnímu zvýšení obsahu dusíku v potencionálních tepelných uzlech odlitku.

Omezením rozpuštěného dusíku do 80 ppm ve středních až masivních částech a 120 ppm v tenkých částech nebo částech bez jader běžně předchází vzniku dusíkových bublin. Kromě toho pečlivý výběr surového materiálu také vede ke snížení výskytu této vady. Titan a zirkon jsou používány k neutralizaci toho efektu produkováním nitridů uhlíku, nicméně pozornost by měla být věnována použití titanu v přítomnosti hliníku a vlhkosti, což může vést opět ke vzniku vodíkových bublin. Zvýšení licí teploty a uhlíkového ekvivalentu též vedou ke snížení výskytu této vady.

Často je velmi obtížné předejít jak dusíkovým tak vodíkovým bublinám. Analýza vady vzorku může ukázat, že sledované parametry pro obě vady jsou v mezích, nicméně jsou tyto vady stále indikovány. V mnoha případech je to synergický efekt, kde se prvky kombinují při formování bubliny. Vyšetření úplných příčin těchto vad vyžaduje zavedení přísnějších kontrol sledovaných parametrů. [2]

2.2.3 BUBLINY OXIDU UHELNATÉHO

Třetí z nejběžnějších dutinových vad je bublina oxidu uhelnatého. Tato vada se obvykle projeví propadnutím povrchu odlitku. Dutina se může objevit jako díra několik milimetrů napříč, u velkých odlitků může dosahovat velikosti několika centimetrů. Obvykle je tato vada v souvislosti se struskou nebo obsahem siřníku manganu. Můžeme pozorovat dendrity vyrůstající z vnitřního povrchu směrem do dutiny. [2]



Obrázek 2.3 – vada 41, analýza vady a její zvětšení [2]

Nejčastější příčinou této vady je nedostatečné vyprázdnění pánve mezi odpichy. To má za následek snížení celkové teploty kovu a hromadění studeného sulfidu manganu/oxidu ve strusce. Další příčinou může být nadbytek manganu a/nebo síry v systému. To by mělo být v rovnováze dle rovnice:

$$\%Mn = \%S + 0.3 \quad (2.1) [2]$$

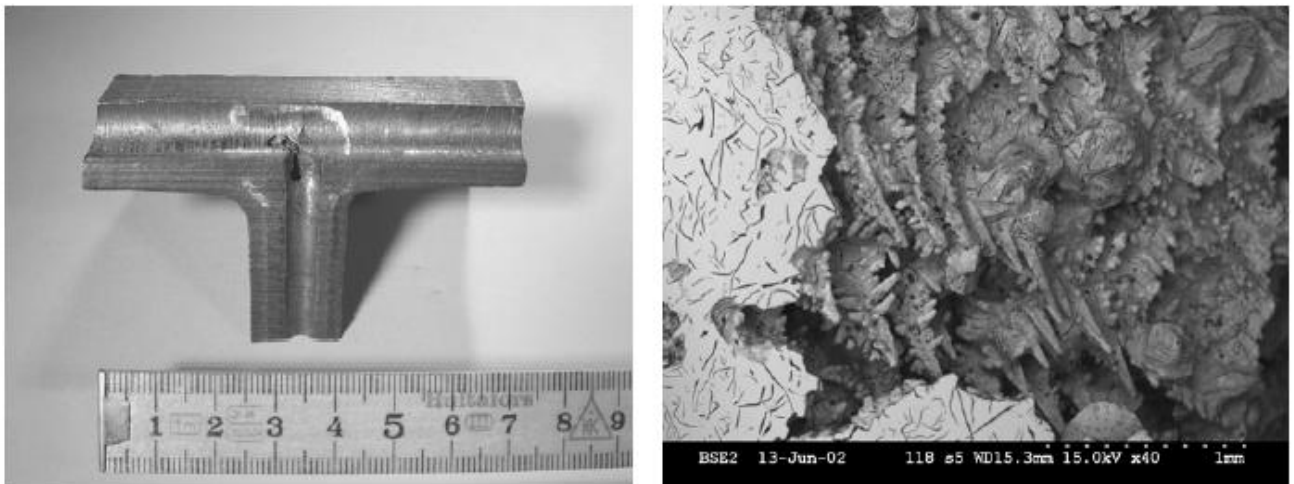
Tato vada je obvykle eliminována zajištěním úplného vyprázdnění pánve mezi odpichy, manipulací s čistými pánvemi a prevencí vzniku strusky. Zvýšení lící teploty též může vést k eliminaci této vady. [2]

2.2.4 STAŽENINY

Na obrázku 2.4 je vidět typický příklad této vady. Ve většině případů se na povrchu uvnitř otvoru staženiny vytvoří dendritická struktura, avšak bez jakéhokoliv grafitických linií jako tomu je u předchozích vad. Na níže uvedeném příkladu se staženina objevila v tepelném uzlu odlitku a příčina je přisuzována ostrým přechodům a nízkému proudění kovu ve formě. Nedostatečně zaformovaný písek ve formě v okolí vady může být také jednou z příčin. [2]

Jsou zde ale i další příčiny této vady:

- Masivní průřezy odlitku, které nejsou řádně onalitikovány nebo je neadekvátně dimenzována vtoková soustava
- Lityny s nízkým obsahem uhlíku nebo uhlíkového ekvivalentu jsou více náchylnější ke staženinám kvůli nedostatečné hustotě vyloučeného grafitu. Neposkytují tak dostatečný „expanzní“ efekt u přirozeného smršťování při tuhnutí odlitku
- Nedostatečné zajištění formy může vést k jejímu přizvednutí
- Nedostatečné nebo naopak přílišné očkování vede k potenciaálním staženinám, kvůli nedostatku vyloučeného grafitu. To vede k přílišné produkci eutektických buněk, což může mít za následek pórovitost mezi buňkami
- Vysoký obsah fosforu, v množství nad 0,1 % má tendenci podporovat smršťování stejně jako nadměrně vysoká lící teplota [2]



Obrázek 2.4 – vada 43, příklad staženiny (vlevo). Vada byla zjištěna po obrobení, ve středu odlitku T tvaru. Zvětšení povrchu staženiny ilustrující dendritickou strukturu (vpravo) [2]

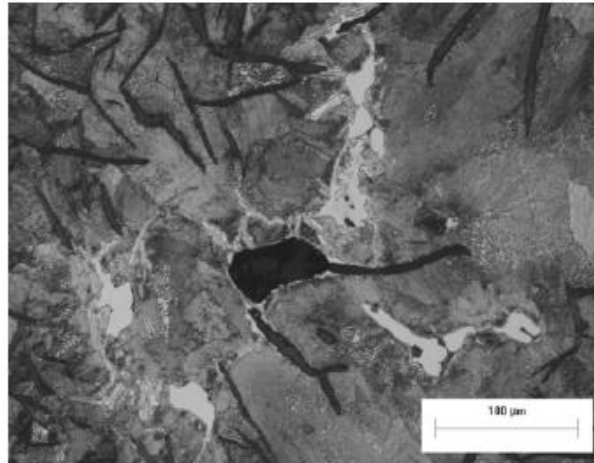
2.2.5 MEZIKRYSTALICKÉ KARBIDY

Dnešní průmysl se musí vypořádat se snižující se kvalitou železného šrotu. Často je stopové množství prvků v oceli vyšší, než bylo odlito dříve a v důsledku toho je zde vyšší riziko vzniku mezikrystalických karbidů. Ty jsou zvláště významné v silnějších částech odlitku, které mají delší dobu tuhnutí a umožňují tak segregaci a hromadění škodlivých prvků jako molybden, vanad, mangan, chrom a titan.

V některých případech může pomoci silnější očkování k rozptýlení karbidu. Nicméně je třeba poznamenat, že účinky stopových prvků uvedených výše jsou kumulativní a ne individuální na

jednotlivé prvky. Dále, některé formy karbidu, například molybdenové a chromové nemohou být odstraněny následným tepelným zpracováním.

Vyvarování se vyloučení karbidů po hranicích zrn dosáhneme řádnou kontrolou surového materiálu, částečně šrot a optimalizace množství očkovačla. Vyšší uhlíkový ekvivalent též může vést k rozptýlení nežádoucích prvků. [2]



Obrázek 2.5 – vada 65, příklad vyloučeného mezikrystalického karbidu [2]

2.2.6 GRAFITICKÉ SÍŤOVÍ

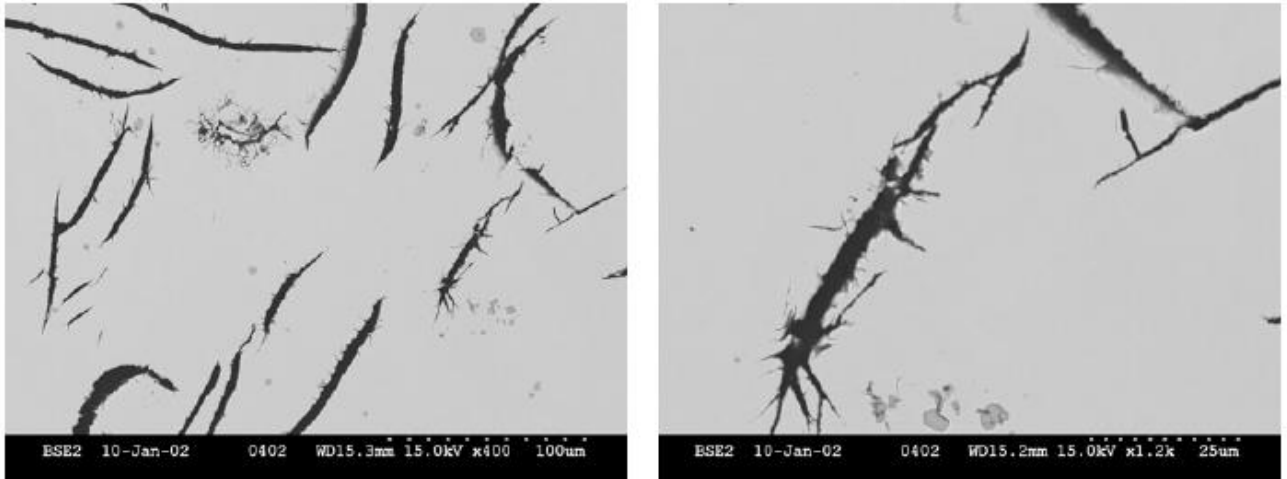
Obrázek 6 ilustruje klasický příklad této vady. Tento efekt, někdy též označován jako ostrý grafit se objevuje, pokud je vysoký obsah stopových prvků jako olovo, bismut nebo antimon.

Antimon podpoří tuto vadu v přítomnosti vodíku, v silnějších průřezích částečně také bismut. Obvyklá příčina tohoto problému je vysoký obsah olova, přídavek v řádu 0,0005 % vede ke vzniku tohoto jevu.

Běžné zdroje olova jsou automatové oceli, staré nátěrové hmoty na šrotu, smaltovaný šrot nebo kontaminace taveniny s bílými kovy. Tavením benzínových bloků motorů z dob olovnatého benzínu může být další zdroj kontaminace olovem.

Grafitické síťoví má katastrofické důsledky na výsledné mechanické vlastnosti. Ostré výstupky jsou slabými místy a vedou k dramatickému snížení pevnosti v tahu.

Jakmile se jednou objeví olovo v šedé litině, tak není žádný opravdový „lék“ kromě použití vzácných zemin obsahující očkovačlo/kondicionér a pokusit se olovo vyseparovat z litiny. [2]



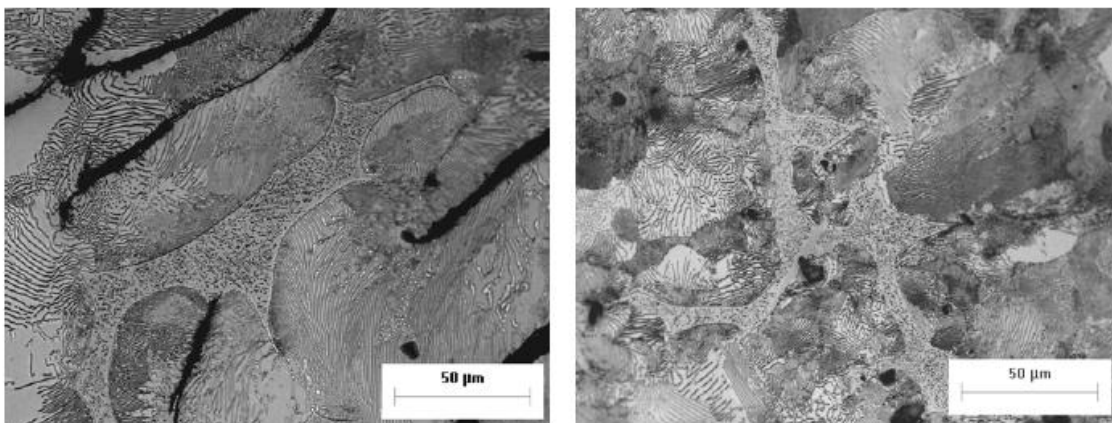
Obrázek 2.6 – vada 71/72/73, grafitická struktura (vlevo), detail grafitického síťoví (vpravo) [2]

2.2.7 STEADIT

Steadit, běžně známý jako fosforové eutektikum je precipitát fosfátů železa. Normálně toto není považováno za vadu, pokud nadbytek fosforu nevstupuje do systému a klastry nejsou detekovány na hranicích zrn.

Fosfor však poskytuje výhodu v podobě rostoucí tekutosti taveniny a odolnosti proti opotřebení pokud se vyskytuje ve správných koncentracích. Obsah méně než 0,04 % může vést k penetraci kovu a žebrování struktury, zatímco obsah nad 0,1 % může vést k formování steaditové sítě na hranicích zrn s následnými problémy smršťování a křehnutí. Některé litiny jsou záměrně produkovány se zvýšeným obsahem fosforu, kde je velkým problémem tekutost taveniny (odlitku radiátorů, kamna nebo odlitky do elektroprůmyslu).

Řešením přebytku steaditu, kromě snížení obsahu fosforu, je rozptýlení fosforu v rámci odlitku pomocí lepšího očkování nebo zvýšení rychlosti tuhnutí. Péče by měla být také věnována výběru šrotu k omezení tavení odlitků radiátorů a také by měla být provedena analýza železných housek, jelikož někteří výrobci obsahují větší množství fosforu, než uvádí. [2]

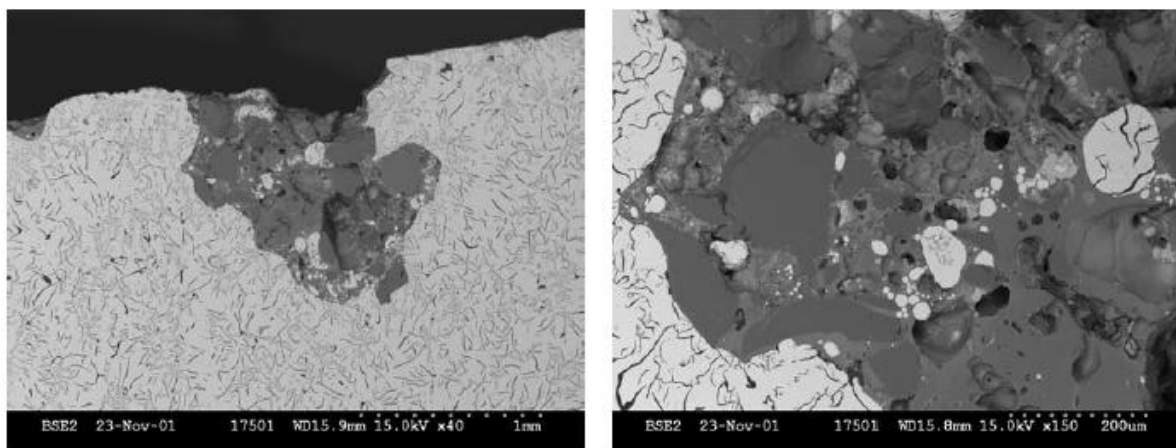


Obrázek 2.7 – vada 65, steadit v masivní části odlitku (vlevo), steadit v tenké části odlitku (vpravo) [2]

2.2.8 ZALITÍ STRUSKY

Tato vada se může vyskytnout jak v průřezu odlitku, tak na jeho povrchu. Jsou rozpoznatelné díky nulovému oduhlíčení a obvykle obsahuje několik různých fází.

Vada je způsobena nedostatečným odfiltrováním strusky během tavení a lití nebo nedostatečným očištěním pánve po předchozím lití. Struskové filtry zabudované do vtokové soustavy pomáhají tuto vadu eliminovat, ale v konečném důsledku nejsou řešením příčiny tohoto problému. Další z příčin mohou být nadměrné turbulence ve vtokové soustavě nebo je lití prováděno z přílišné výšky. Zkoušení a ladění vtokové soustavy a čas vynaložený na sledování obsluhy pánve je v tomto případě účelně vynaložený čas. [2]



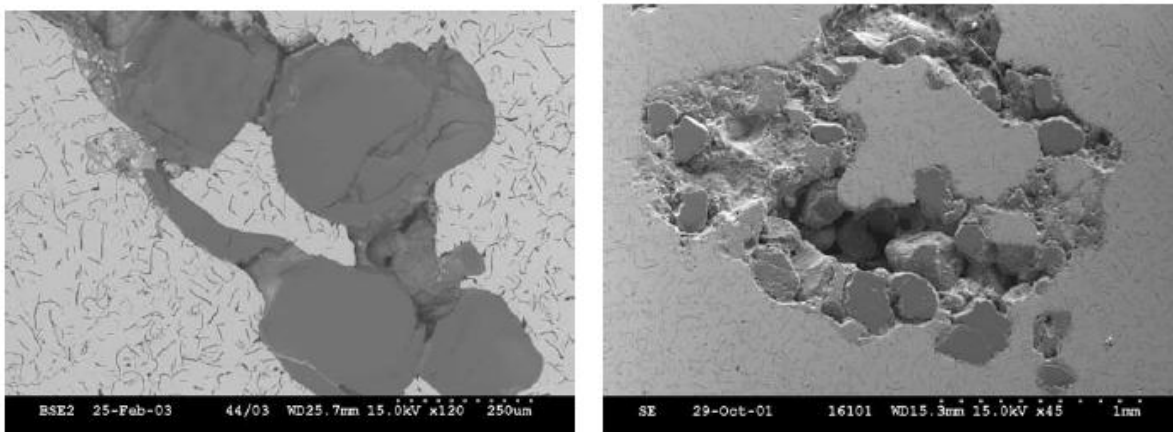
Obrázek 2.8 – vada 51/53, ukázka clusteru strusky v odlitku (vlevo), zvětšení vady pro ukázku různých fází (vpravo) [2]

2.2.9 PŘIPEČENINY FORMOVACÍ SMĚSI

Poslední zde popsaná vada je v souvislosti s formovací směsí. Písek lze od strusky odlišit v tom, že má pouze jednu fázi a nabývá vcelku pravidelných tvarů.

Nedostatečně zaformovaná směs a proudění kovu způsobuje vymílání a erozi směsi nebo je špatně nadimenzována vtoková soustava a kov dopadá na dno formy z příliš velké výšky. S tím souvisí i rozstřík kovu ve formě. Další z příčin jsou zaformované ostré rohy. Dále je třeba dbát na opatrnou manipulaci s již zaformovaným rámem. Částečně pomáhá eliminace nadměrných turbulencí kovu ve formě, stejně jako u zalité strusky.

Často byly zaznamenány případy, kdy zrna písku byla obalena struskou jako na obrázku 2.9. Lepivá struska přicházející z tavení/lití může strhnout i dobře zaformovanou směs písku. Důraz by tedy měl být kladen na řádnou tavbu a přípravu vtokové soustavy. [2]



Obrázek 2.9 – vada 52/53, zalité zrno písku (vlevo), zrno písku obalené struskou (vpravo) [2]

2.2.10 SHRNU TÍ

Vadné odlitky často končí ve šrotu. Toto jsou většinou majoritní náklady sléváren často ve spojení s jejich produktivitou a jejich reputací. Vady, které prošly kontrolou, jsou nejdražší, neboť nemusí být objeveny nebo jsou objeveny ve fázi dokončovacích operací (obrábění) nebo ještě hůř, u koncového zákazníka.

Systematická evidence vad se může jevit jako časově velmi náročná, ale je to užitečná činnost, díky které lze řešit nejzávažnější vady jako hlavní prioritu. Mnoho sléváren tráví neúměrné množství času a peněz na méně závažné vady, zatímco se nesoustředí na hlavní příčiny majoritních vad. Správná údržba, výběr surového materiálu a opatrná manipulace s kovem jsou tři hlavní kritéria k minimalizaci zbytečných vad.

Dále můžeme konstatovat, že sledování složení tavby a očkování jsou také cestou ke snížení zmetkovitosti. Pečlivé sledování výše zmíněných faktorů může mít pro slévárnu klíčový finanční přínos.

V této souvislosti se také dostávají do popředí simulační SW, které jsou schopny predikovat mnoho vad již při simulaci, stejně tak mikrostrukturu nebo proudění ve formě. [2]

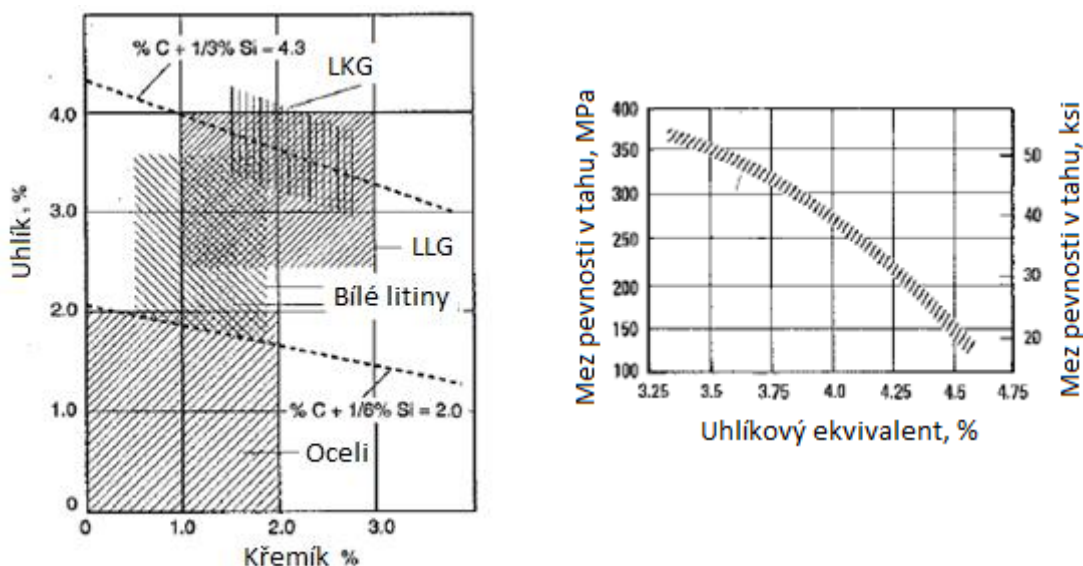
3 TYPY A VLASTNOSTI LLG

Je všeobecně známou skutečností, že pro své velmi příznivé slévárenské vlastnosti, které jsou dány velmi dobrou zabíhavostí, malým smrštěním a poměrně nižší teplotou tavení, dále pak specifickými užitnými vlastnostmi a relativně nízkou cenou je LLG nepoužívanějším železným materiálem k výrobě odlitků.

Chemické složení šedé litiny se pohybuje ve velmi širokém rozmezí; podle konstrukce odlitku a účelu použití: 2,8 až 3,8 %C, 1,0 až 3,0 %Si, 0,4 až 1,20 %Mn, do 1,0 %P, do 0,15 %S.

Původní norma ČSN 42 1241 omezuje prvky v normalizovaných druzích šedých litin s lupínkovým grafitem na hodnoty max.do : 3,0% Si, 1,0 %Mn, 0,5% P, 0,2%Cr, 0,2%Ni, 0,15%S, 0,005% Al, a 0,05% ostatní prvky.

Základní vlastnosti šedé litiny s lupínkovým grafitem ovlivňuje tvar vyloučeného grafitu. Struktura základní kovové hmoty má sekundární vliv. Proto jsou některé sekundární technologické postupy spojené na příklad s tepelným zpracováním, běžně používané např. u tvárné, nebo temperované litiny k získání „vyšších“ užitných vlastností, u litiny s lupínkovým grafitem neúčelné. V porovnání s jinými materiály má litina s lupínkovým grafitem největší citlivost k rychlosti ochlazování.[3]

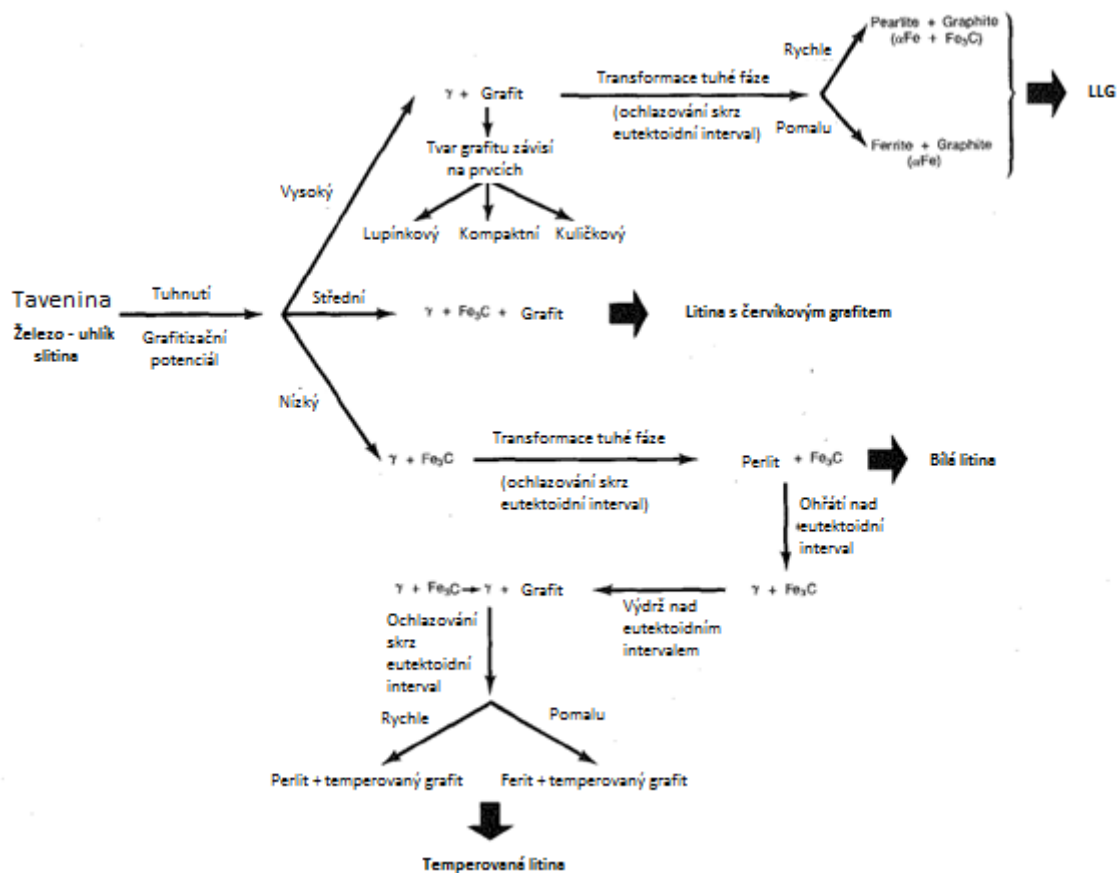


Obrázek 3.1 – dělení litin a ocelí na odlitky dle obsahu uhlíku a křemíku (vlevo), vliv uhlíkového ekvivalentu na pevnost v tahu (vpravo) [4]

Složení litiny se v zásadě volí tak, aby uspokojilo tři zásadní kritéria:

- požadovaný tvar grafitu a jeho distribuce
- struktura bez karbidů
- požadovaná matrice [4]

Pro běžné litiny jsou hlavní chemické prvky uhlík a křemík. Obrázek 10 demonstuje rozsah uhlíku a křemíku pro běžné litiny v porovnání s ocelí. Je zřejmé, že oceli mají uhlík nad mezi maximální rozpustnosti uhlíku v austenitu, což je znázorněno spodní přerušovanou čarou. Vysoký obsah uhlíku zvyšuje množství grafitu nebo Fe_3C . Vysoký obsah uhlíku a křemíku také zvyšují grafítizační potenciál, stejně tak slévárenské vlastnosti. Ačkoliv zvýšený obsah uhlíku a křemíku vedou k většímu grafítizačnímu potenciálu, snižují také chladnou tendenci odlitku což má nepříznivý vliv na pevnost (obrázek 10 vpravo). To je způsobeno podporou feritu a hrubnutím perlitu.[4]



Obrázek 3.2 – dělení litin dle způsobu grafítizace uhlíku [4]

3.1 VLIV PRVKŮ NA STRUKTURU A MECHANICKÉ VLASTNOSTI LLG

Tabulka 2: Pevnost litin s lupínkovým grafitem v tahu [3]

Označení materiálu		Směrodatná tloušťka stěny [mm]		Pevnost v tahu Rm závazné hodnoty [N/mm ²]		Pevnost v tahu Rm předpokládané hodnoty v odlitku [N/mm ²]
značkou	číselně	přes	do a včetně	na odděleně litých zkušebních vzorcích	na přilitých zkušebních vzorcích	
EN-GJL-100	EN-JL1010	5	40	100 až 200	-	-
EN-GJL-150	EN-JL1020	2,5	5	150 až 250	-	180
		5	10		-	155
		10	20		-	130
		20	40		120	110
		40	80		110	95
		80	150		90	80
EN-GJL-200	EN-JL1030	150	300	200 až 300	-	-
		2,5	5		-	230
		5	10		-	205
		10	20		-	180
		20	40		170	155
		40	80		150	130
EN-GJL-250	EN-JL1040	80	150	250 až 350	140	115
		150	300		130	-
		5	10		-	250
		10	20		-	225
		20	40		210	195
		40	80		190	170
EN-GJL-300	EN-JL1050	80	150	300 až 400	170	155
		150	300		160	-
		10	20		-	270
		20	40		250	240
		40	80		220	210
EN-GJL-350	EN-JL1060	80	150	350 až 400	210	195
		150	300		190	-
		10	20		-	315
		20	40		290	280
		40	80		260	250
		80	150		230	225
		150	300		210	-

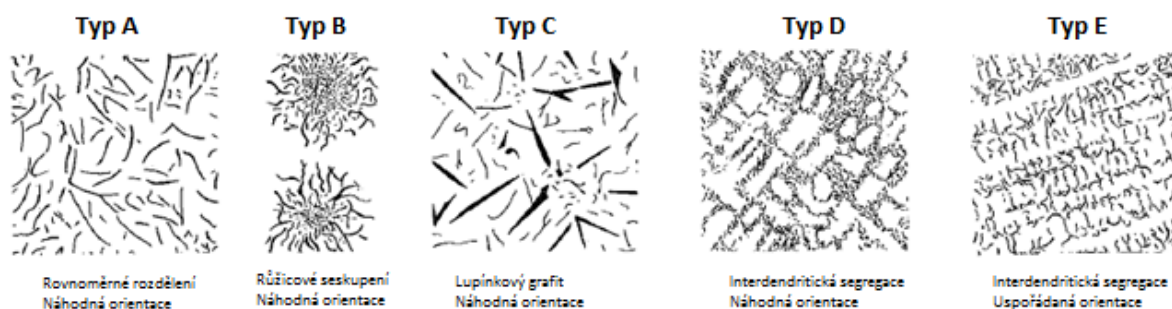
Výsledná struktura litin je závislá na obsahu manganu v litině. Typicky 0,1 % pro feritické litiny, pro perlitické litiny až do 1,2 %. Mangan je silný perlitický prvek.

Výsledné mechanické vlastnosti dané tloušťkou stěny jsou dány právě strukturou. Struktura je přímo dána rychlostí ochlazování odlitku.

Ohledně stopových prvků jsou fosfor a síra nejběžnější a vždy přítomné v matrici. Mohou být v obsahu do 0,15 % v méně kvalitních litinách, ve vysoce kvalitních litinách ve značně menším obsahu, stejně tak v tvárné litině. Efekt síry musí být vyvážený vlivem manganu. Bez manganu by se nežádoucí sulfid železa (FeS) vyloučil na hranicích zrn. Jestliže je obsah síry vyvážen obsahem manganu, pak se vytvoří sulfid manganu (MnS), který je ale neškodný, jelikož je rozložen v celé struktuře. Optimální poměr mezi manganem a sírou pro strukturu bez FeS a maximální podíl feritu je:

$$\%Mn = 1,7 \% S + 0,15 \quad (3.1) [4]$$

Hlavní i vedlejší prvky jako hliník, antimon, arsen, bismut, olovo, hořčík, cer a vápník mohou také výrazně změnit grafitovou morfologii a výslednou matrici. Na obrázku 3.3 jsou znázorněny typické struktury grafitu. [4]



Obrázek 3.3 – typické uspořádání grafitu v matrici [4]

Typ A můžeme vidět v očkovaných litinách s mírnými rychlostmi chladnutí. V podstatě se jedná o strukturu s nejlepšími mechanickými vlastnostmi. Litiny s touto strukturou vykazují mírné podchlazení během tuhnutí.

Typ B můžeme vidět v litinách v okolí eutektického složení, tuhnoucí na limitním počtu nukleovaných jader. Velké eutektické buňky a nízké podchlazení jsou běžné v litinách s tímto typem vyloučeného grafitu.

Typ C se vyskytuje v nadeutektických litinách jakožto výsledek tuhnutí s minimálním podchlazením.

Typ D se vyskytuje v podeutektických nebo eutektických litinách tuhoucích v poněkud vyšších rychlostech ochlazování, zatímco typ E je charakteristický pro silně podeutektické litiny. Typy

D a E jsou oba spojovány s vysokým podchlazením během tuhnutí. Nejenom tvar grafitu ale i jeho velikost jsou důležité, protože přímo ovlivňují pevnost litiny. [4]

Prvky s pozitivním vlivem na grafitizaci litin:

- uhlík
- fosfor
- cín
- křemík
- hliník
- měď
- nikl

Prvky s negativním vlivem na grafitizaci

- mangan
- chrom
- molybden
- vanad [4]

Toto dělení je založeno na termodynamické analýze vlivu třetího prvku v diagramu Fe-C-X (obrázek 13), kde X je přidávaný prvek. Ačkoliv je fosfor uveden jako prvek s pozitivním vlivem na grafitizaci (což může být termodynamicky pravda), je také dokázáno, že zvyšuje tvrdost matrice. Nad mezí své rozpustnosti (cca 0,08%) utváří velmi tvrdé terciární eutektikum. Výše uvedené dělení by také mělo zahrnout síru jakožto tvořitel karbidů, nicméně mangan a síra mohou reagovat a neutralizovat se navzájem. Výsledný MnS také působí jako podpora při nukleaci zárodků lupínkového grafitu. [4]

V podstatě se mohou slitinové prvky rozdělit do tří kategorií probraných níže:

Křemík a hliník zvyšují grafitizační potenciál pro obě transformace (eutektické a eutektoidní) a zvyšují také počet grafitových částic. Tvoří tuhé roztoky v matrici. Jelikož zvyšují feriticko-perlitický podíl, snižují tak pevnost a tvrdost.

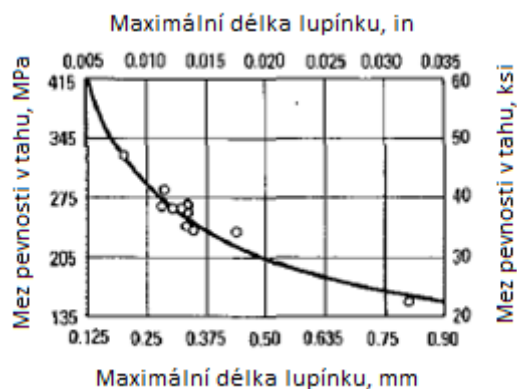
Nikl, měď a cín zvyšují grafitizační potenciál během eutektické transformace, ale snižuje ho během eutektoidní transformace. Tím pádem zvyšuje feriticko-perlitický podíl. Tento sekundární efekt je kvůli zpoždění difúze uhlíku. Tyto prvky utváří tuhý roztok v matrici. Jelikož zvyšují podíl perlitu, zvyšují také pevnost a tvrdost.

Chrom, molybden, titan a vanad snižují grafitizační potenciál v obou fázích transformace. Tím pádem zvyšují podíl karbidů a perlitu. Principiálně se koncentrují a utváří v karbidech typu

(FeX)_nC, ale také vytváří tuhý roztok uhlíku v Fe α. Do doby než se začnou utvářet karbidy, tyto prvky zvyšují pevnost a tvrdost. [4]

Tabulka 3: Rozsah legujících prvků pro běžně legovanou litinu [4]

Prvek	Chrom	Molybden	Vanad	Nikl	Měď	Cín
Obsah[%]	0,2 – 0,6	0,2 - 1	0,1 – 0,2	0,6 - 1	0,5 – 1,5	0,04 – 0,08



Obrázek 3.4 – vliv velikosti lupínku na pevnost litiny [4]

Tabulka 4: Mechanické vlastnosti na odděleně litych vzorcích Ø30 mm [3]

Vlastnost	Označení	Jednotka SI	Označení materiálu				
			EN-GJL-150 (EN-JL1020)	EN-GJL-200 (EN-JL1030)	EN-GJL-250 (EN-JL1040)	EN-GJL-300 (EN-JL1050)	EN-GJL-350 (EN-JL1060)
			Základní struktura				
			feritická	ferticko/perlitická	perliticko /feritická	perlitická	
Pevnost v tahu	R_m	N/mm ²	150 až 250	200 až 300	250 až 350	300 až 400	350 až 450
Mez 0,1%	R_{p0,1}	N/mm ²	98 až 168	130 až 195	165 až 228	195 až 260	228 až 285
Tažnost	A	%	0,8 až 0,3	0,8 až 0,3	0,8 až 0,3	0,8 až 0,3	0,8 až 0,3
Pevnost v tlaku	σ_{db}	N/mm ²	600	720	840	960	1080
Mez 0,1% v tlaku	σ_{d0,1}	N/mm ²	195	260	325	390	455
Pevnost v ohybu	σ_{b0}	N/mm ²	250	290	340	390	490
Pevnost ve stříhu	σ_{aB}	N/mm ²	170	230	290	345	400
Pevnost v krutu	τ_k	N/mm ²	170	230	290	345	400
Modul pružnosti	E	kN/mm ²	78 až 103	88 až 113	103 až 118	108 až 137	123 až 143

Poissonův poměr	ν	-	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
Únavová pevnost v ohybu	b_w	N/mm ²	70	90	120	140	145
Mez únavy při střídavém namáhání tah-tlak	σ_{zdW}	N/mm ²	40	50	60	75	85
Lom. houž.	K_{Ic}	N/mm ²	320	400	480	560	650

Vztah pro výpočet meze pevnosti v závislosti na chemickém složení:

$$TS = 162,37 + 16,61/D - 21,78(\%C) - 61,29(\%Si) - 10,59(\%Mn - 1,7\% S) + 13,80(\%Cr) + 2,05(\%Ni) + 30,66(\%Cu) + 39,75(\%Mo) + 14,16(\%Si)^2 - 26,25(\%Cu)^2 - 23,83(\%Mo)^2 \quad (3.2) [4]$$

kde TS je mez pevnosti a D průměr vzorku (v palcích). Tento vztah platí pro průměry v rozmezí 20 – 50 mm a chemickém složení v následujícím rozsahu.[4]

Tabulka 5: Rozsah prvků pro vztah 3.2 [4]

Prvek	Uhlík	Chrom	Molybden	Křemík	Nikl	Síra	Mangan	Měď
Obsah [%]	3,04 - 3,29	0,1 – 0,55	0,03 – 0,78	1,6 – 2,46	0,07 – 1,62	0,089 – 0,106	0,39 – 0,98	0,07 – 0,85

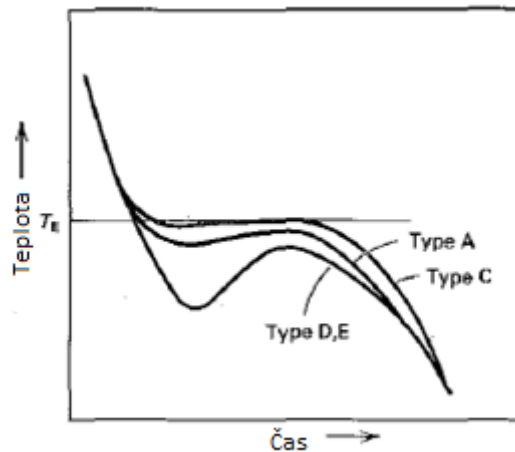
3.2 VLIV OCHLAZOVÁNÍ, OČKOVÁNÍ A TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ NA LLG

Rychlosti ochlazování, stejně jako chemické složení může významně ovlivnit výslednou strukturu a také mechanické vlastnosti. Rychlost ochlazování je primárně závislá na tloušťce odlitku. Závislost struktury a vlastností v daném řezu je dána citlivostí daného místa. Zvyšující se rychlost ochlazování ovlivní:

- velikost grafitického lupínku a výslednou matici; to má za následek zvýšení pevnosti a tvrdosti
- zvýšení chladicí tendence; to může mít za následek vyšší tvrdost, ale menší pevnost

Tudíž složení musí být přizpůsobeno tak, aby poskytovalo správný grafitizační potenciál pro danou rychlost ochlazování. Pro dané chemické složení a zvětšující se tloušťku stěny se stává grafit

hrubším a klesá perliticko-feritický podíl, což má za následek nižší pevnost a tvrdost. Zvyšující se uhlíkový ekvivalent má podobný efekt. [4]

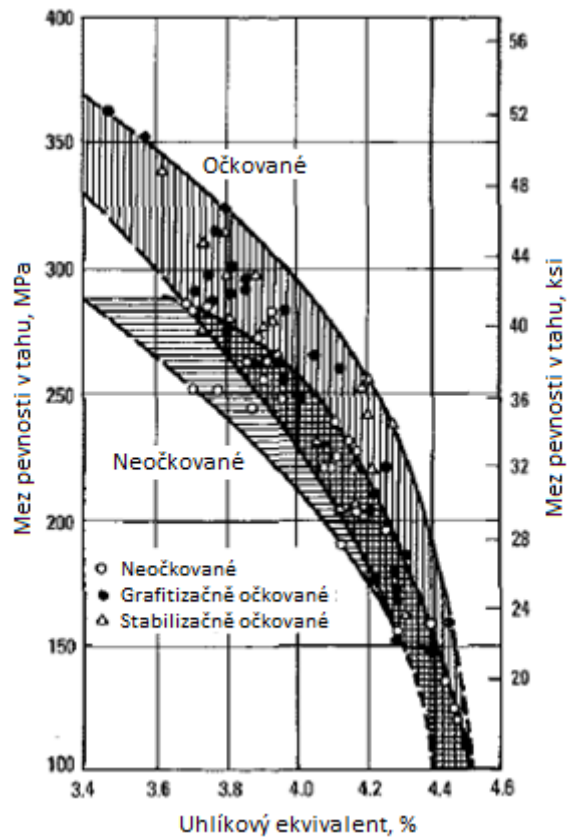


Obrázek 3.5 – Charakteristické křivky ochlazování v závislosti na tvaru grafitu. T_E je rovnovážná eutektická teplota [4]

Očkování litiny je nejdůležitější činitel v technologickém postupu, protože může dramaticky změnit nukleační a růstové podmínky během tuhnutí. Ve výsledku může být značně ovlivněna morfologie vyloučeného grafitu a tím pádem i mechanické vlastnosti. Tavenina se očkuje těsně před litím, obvykle ferokřemičitany s přísadkami hliníku a vápníku nebo jejich slitin. Hlavní účinky očkování jsou:

- zvýšení grafitizační potenciál v důsledku sníženého podchlazení během tuhnutí; to má za následek snížení tendence chladnutí a tvar grafitu se mění z typu D nebo E na typ A
- zjemnění struktury (v důsledku vyššího počtu eutektických buněk); to má za následek zvýšení pevnosti[4]

Jak ukazuje obrázek 16, očkování zvyšuje pevnost v tahu. Tento efekt je ještě výraznější u litin s nízkým uhlíkovým ekvivalentem.



Obrázek 3.6 – vliv očkovaní na pevnost v tahu [4]

Tepelné zpracování může podstatně změnit strukturu matrice, nicméně tvar a velikost grafitu nejsou téměř ovlivněny. Z celkové produkce šedé litiny je minimum dále tepelně zpracování. V případě že ano, obvykle se používá normalizační žíhání pro snížení vnitřního pnutí. [4]

4 PŘEHLED SIMULAČNÍCH PROGRAMŮ

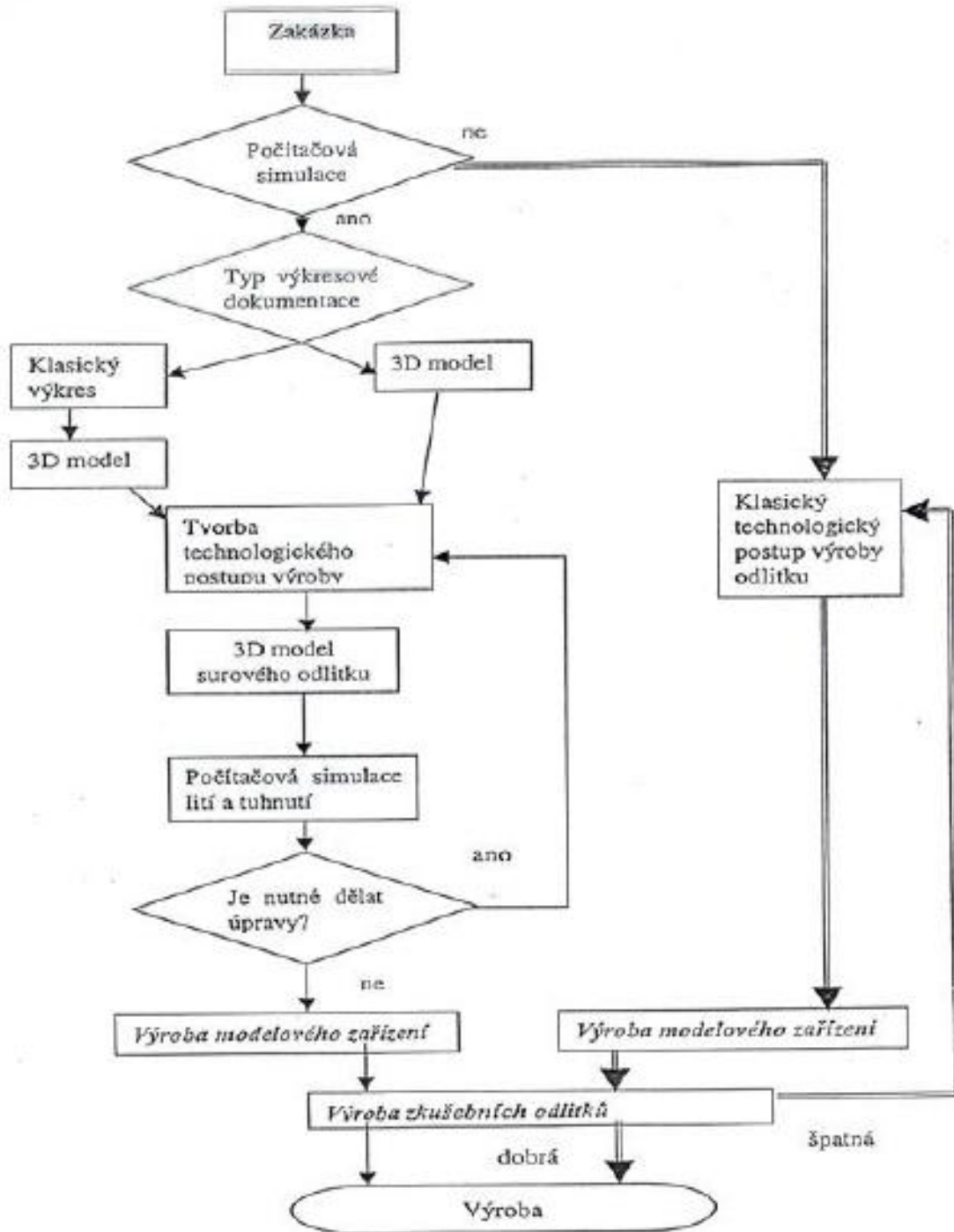
Simulace tuhnutí odlitku nebo simulace celé vtokové soustavy, kterou se ve většině počátečních návrhů nebo při inovaci technologie zabýváme je založena na řešení rovnic přestupu tepla entalpickou metodou spojenou s modely adaptovanými na určité skupiny slitin. Pomocí termomechanických modelů se počítají deformace odlitků. Dále k tomu přistupují vizualizace izoterm, ztuhlých a tekutých částí odlitku, vady typu staženiny a porezita, vnitřní pnutí, výsledná mikrostruktura apod. [5]

Pro tyto účely simulační programy obsahují matematické rozpracování nejrůznějších rovnic a fyzikálních zákonů:

- Navier – Stokesův zákon zachování hybnosti
- Fourierovu diferenciální rovnici nestacionárního přestupu tepla
- Zákony mechaniky tuhého tělesa při plastické a elastické deformaci
- Rovnice pro stanovení napětí a deformace
- Transformační a strukturní diagramy [5]

Tabulka 6: Přehled nejpoužívanějších simulačních SW [5]

Název SW	Země původu	Metoda tvorby sítě	Plnění	Tuhnutí	Zbytková pnutí	Struktura
PROCAST	USA	FEM	X	X	X	X
MAGMASOFT	Německo	FDM/FEM	X	X	X	X
NOVA FLOW&SOLID	Švédsko	FDM	X	X	X	X
CAPCAST	USA	FEM	X	X	X	X
SOLIDCAST	Anglie	FDM	X	X	X	-



Obrázek 4.1 – implementační schéma simulačních SW ve výrobě [5]

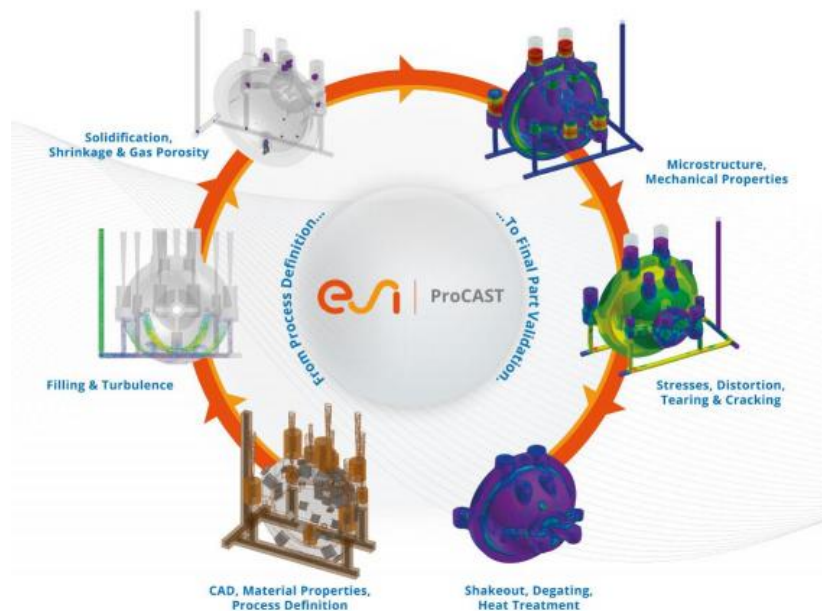
V dnešních slévárenských simulačních SW se nejčastěji vyskytují výpočtové moduly používající metodu konečných diferencí (FDM) nebo metodu konečných prvků (FEM).

4.1 PROCAST

ProCAST funguje na trhu už 25 let a pomohl velkým i malým slévárnám zlepšit kvalitu odlitků, snížit výrobní vady a zároveň snížit ceny šrotu. V České Republice je zastoupena firmou MECAS Plzeň. ESI ProCAST je univerzální SW pro získání přesných výsledků i velmi složitých odlitků. Umožňuje rychle predikovat a opravit defekty způsobené smršťováním, zachycenými plyny, pórovitostí, nezaběhnutími, inkluzí a řadou dalších vlivů. ProCAST také disponuje vyhodnocením zbytkových pnutí, trhlin za tepla a predikcí výsledné mikrostruktury. Tento software lze použít ve všech fázích životnosti výrobku od počátečního vývoje před uvedením do výroby, přes následnou optimalizaci produktu až po reverse engineering. [6]

ProCAST lze použít u technologií:

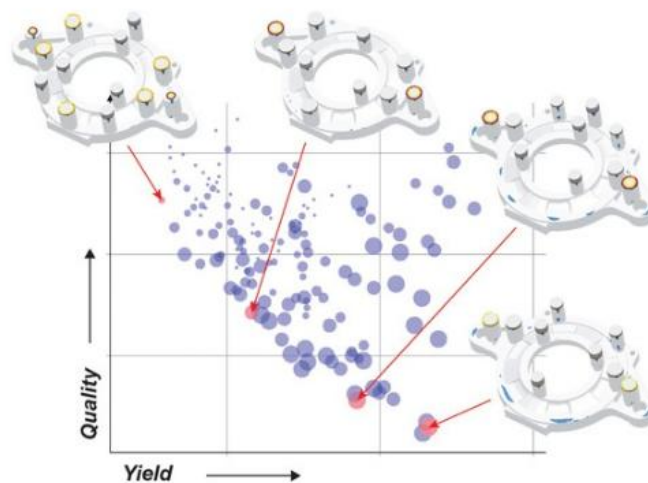
- lití do pískových a kovových forem,
- gravitační, nízkotlaké a vysokotlaké lití
- plynulé a odstředivé lití
- kompozity s kovovou maticí
- odlévání thixotropních a reologicky složitých materiálů
- squeeze casting [6]



Obrázek 4.2 – cyklus výrobku od CAD dat až po finální analýzu [6]

4.2 MAGMASOFT

MAGMA5 je komplexní a efektivní simulační nástroj pro zlepšení kvality odlitku, optimalizace provozních podmínek a snížení výrobních nákladů. Tento software umožňuje vytvoření robustních procesních podmínek a optimalizování licích rozvržení pro všechny hutní materiály a technologie. MAGMA5 je navržen tak, aby předvídal celkovou kvalitu odlitku pomocí simulace plnění formy, tuhnutí a chladnutí, zbytkových napětí a deformací, predikce mikrostruktury a distribuce mechanických vlastností. Velkým náskokem před konkurencí je zadání omezujících podmínek a následné vyhodnocení několika možných variant. [7]



Obrázek 4.3 – výpočet variant nálitků s ohledem na konečné vlastnosti [7]

Díky své modulární konstrukci, MAGMA5 přispívá ke snížení nákladů v celém procesu odlitku: od konceptuální do konečného návrhu komponent, rozložení nástrojů a prototypů, celou cestu až do optimalizačního procesu, spolehlivé výroby a řízení kvality.

MAGMA5 má modulární strukturu a obsahuje následující funkce pro komplexní simulace:

- běžné grafické uživatelské rozhraní pro všechny moduly
- perspektivní projektový management pro manipulaci s verzí projektu
- parametrické modelování geometrie pomocí CAD, stejně tak import a export CAD dat
- komplexní mapování procesů s přímým přístupem ke všem materiálům, procesních kroků a odpovídající nastavení simulace
- definice virtuálních návrhů a parametrů pro optimalizaci výpočtů
- simulační programy pro výpočet plnění formy, tuhnutí a chladnutí
- interaktivní a automatické vyhodnocení výsledků

- komplexní vizualizace a vyhodnocování výsledků simulace
- kvantitativní vyhodnocení virtuálního navrhování experimentů a optimalizačních běhů
- databáze modulů pro správu termofyzikálních a jiných údajů nezbytných pro simulaci procesu [7]

Přídavné moduly MAGMA5:

MAGMAiron, MAGMAsteel, MAGMAnonferrous

moduly umožňující predikci mikrostruktury a vlastností železných i neželezných slitin

MAGMAhpdc, MAGMAlpdc, MAGMApermanentmold, MAGMAwheel

moduly umožňující zvážení specifických požadavků na proces a jeho kontrolu

MAGMAcore+mold, MAGMAielife

moduly pro predikci vstřelbu jádra, plynování, proplachování a posouzení životnosti formy

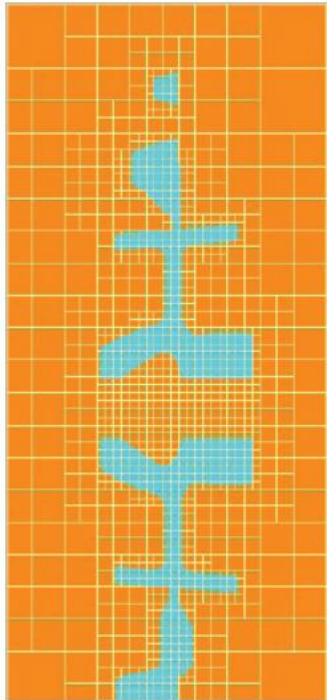
MAGMA HT thermal, MAGMAstress, MAGMALink

moduly pro simulaci napěťové složky po odlévání, tepelné zpracování a výměnu informací na základě výsledků simulace [7]

4.3 NOVA FLOW&SOLID

NovaFlow&Solid je slévárenský simulační software švédské firmy NOVACAST Systems. Umí simulovat většinu komerčně používaných technologií jako lití do písku, gravitační, nízkotlaké a vysokotlaké lití, metodu vytavitelného modelu, kontinuální lití, odstředivé lití a metodu spalitelného modelu. Je možné použít materiály (v případě že neexistují tak zadefinovat): LLG a LKG, ocelové slitiny, hliníkové slitiny, měděné slitiny, zinkové slitiny, hořčíkové slitiny nebo superslitiny typu chromniklových a titanových slitin. Software může být použit pro všechny typy komerčně dostupných formovacích a jádrových materiálů, stejně tak exotermických zásypů, chladítek či filtrů. Lze také simulovat dva odlévané materiály dohromady (např. ocel a litina) v jedné formě se zadanými omezujícími podmínkami. NovaFlow&Solid umí predikovat vady typu bubliny, proudění ve formě, studené spoje, staženiny, porezitu, vměstky strusky apod.

S nejnovější verzí přichází i nový způsob meshování modelu tzv. Control Volume Mesh (CVM). To znamená, že zadaný model je rozdělen na konečné prvky, ale o různých velikostech, což ve výsledku znamená úsporu času a dosažení přesnějších výsledků. [8]



Obrázek 4.4 – ukázka nově používané mesh metody CVM [8]

V nové verzi NovaFlow&Solid 6.0 můžeme nalézt tyto doplňky:

- Multi meshing: použití různých velikostí meshování během plnění a poté během tuhnutí
- Good Guy's Index: porovnání různých simulací z technického a environmentálního hlediska
- Mikrostruktura: průměrné hodnoty pro austenit, grafit a cementit pro železné odlitky
- Nepravidelné meshování formy
- Úplný výpočet zbytkového pnutí jak pro odlitek tak pro formu
- Optimalizace technologickým parametry
- Predikce staženin pro šedou litinu s ohledem na grafitickou expanzi [8]

4.4 CAPCAST

CAPCAST je software vyvinutý firmou EKK Inc. sídlící v USA, nicméně spadá pod společnost ESI GROUP, v České Republice má zastoupení společností MECAS Plzeň.

Poskytuje simulační řešení železných i neželezných odlitků. Meshování modelu je založeno na metodě FEM. CAPCAST softwarem lze simulovat lití do písku, nízkotlaké a vysokotlaké lití a sklopné lití. Výpočet zahrnuje tuhnutí odlitku, teplotní pole, proudění ve formě, výpočet zbytkového pnutí a konečné porezity. [9]

4.5 SOLIDCAST

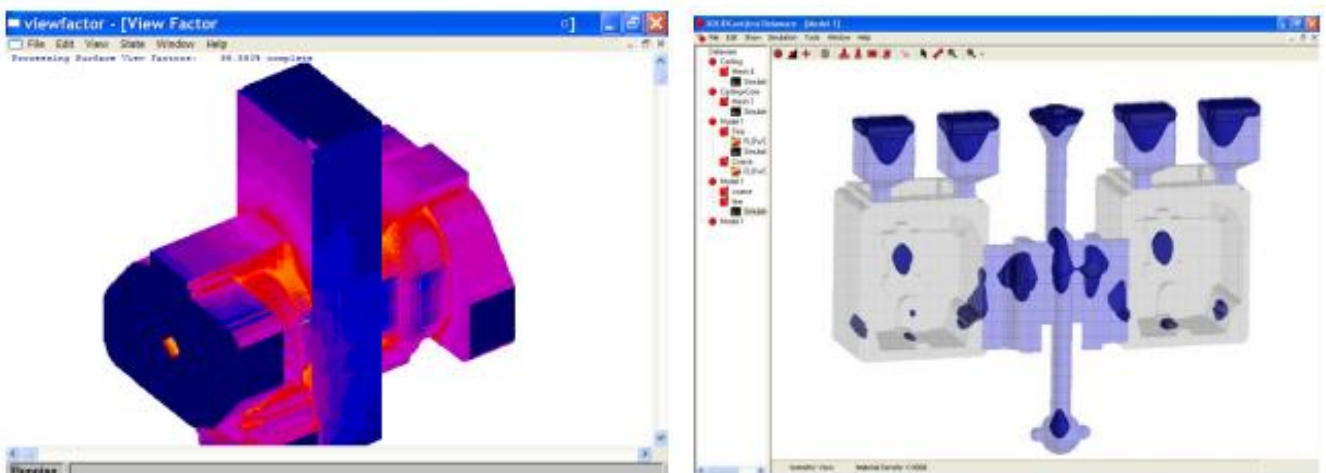
SOLIDCast je softwarové řešení slévárenských technologií od firmy FiniteSolutions pocházející z Velké Británie. V současné době se svému software věnuje již 27 let. Použití tohoto software se odhaduje na více než 800 sléváren a univerzit. Tento program se sestává ze 3 samostatných modulů:

- SOLIDCast
- FLOWCast
- OPTICast

Modul SOLIDCast slouží pro výpočet samotného tuhnutí odlitku a predikci vad spojených tuhnutím odlitku. Modul FLOWCast slouží pro výpočet plnění formy a proudění taveniny ve formě. Modul OPTICast slouží pro následnou optimalizaci odlitku na základě předchozích vypočtených dat. [10]

Podporované slévárenské technologie SOLIDCast:

- lití do písku
- přesné lití vytavitelným modelem
- lití do trvalých forem

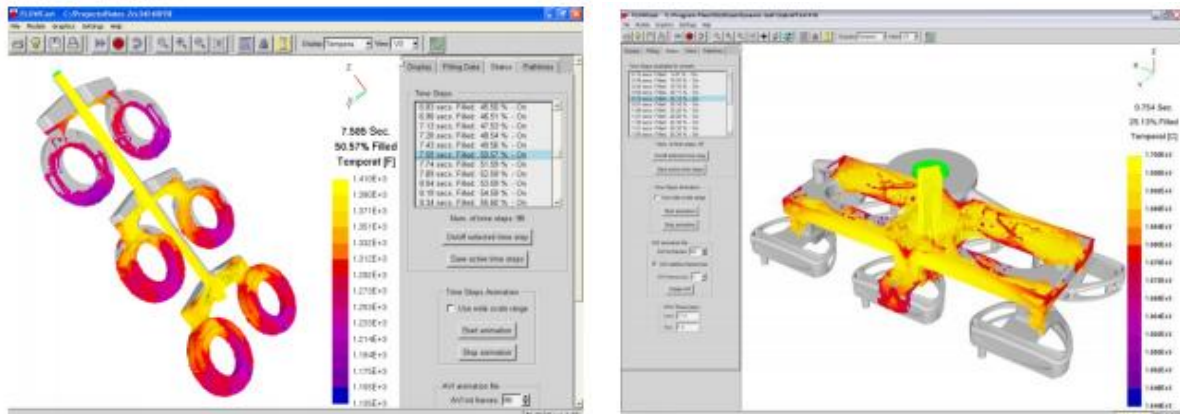


Obrázek 4.5 – ukázka tepelné radiace odlitku (vlevo), predikce staženin odlitku (vpravo); modul SOLIDCast [10]

Modul FLOWCast slouží k výpočtu konvekce, vedení a záření tepla v dutině formy, takže lze analyzovat návrh odlitků a vtoků pro co nejpřesnější predikci a minimalizaci vad souvisejících s

průtokem, jako jsou například vady v důsledku předčasného ztuhnutí nebo tvorby oxidu nebo eroze forem v důsledku nadměrných rychlostí během plnění, nebo vymílání formy. [11]

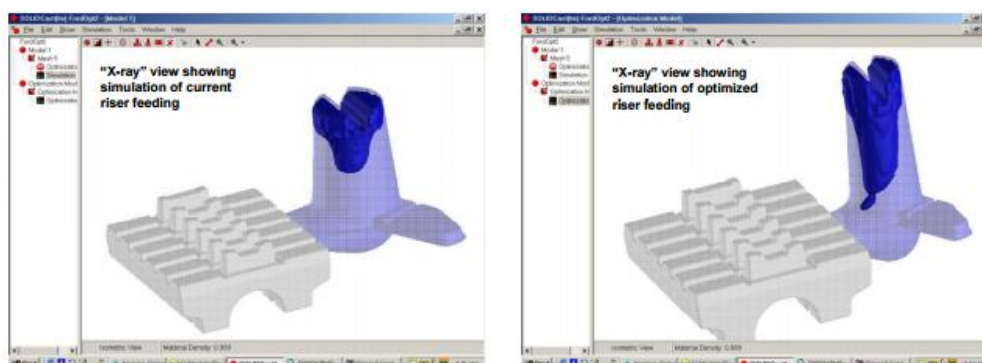
FLOWCast je plnohodnotná simulace CFD (Computational Fluid Dynamics), založena na Navier-Stokesových rovnicích pro průtok kapalin. Pomocí programu FLOWCast lze během plnění zobrazit z libovolného úhlu pohledu teplotu, rychlost taveniny a tlak taveniny. [11]



Obrázek 4.6 – teplotní pole Al odlitku, naklápěcí trvalá forma (vlevo), teplotní pole odlitku, vytavitelný model (vpravo) [11]

Modul OPTICast softwarový nástroj, který pracuje ve spojení se systémem SOLIDCast pro OPTICast používá Response Surface Methodology (RSM) pro dosažení nejlepších výsledků. Modul pracuje s počátečním návrhem pro odlévání, s nálitky a vtokem, který je vytvořen v modelovém systému SOLIDCast pomocí nástroje Gating and Riser Design Wizards. Poté je potřeba zadat následující vlastnosti. [12]

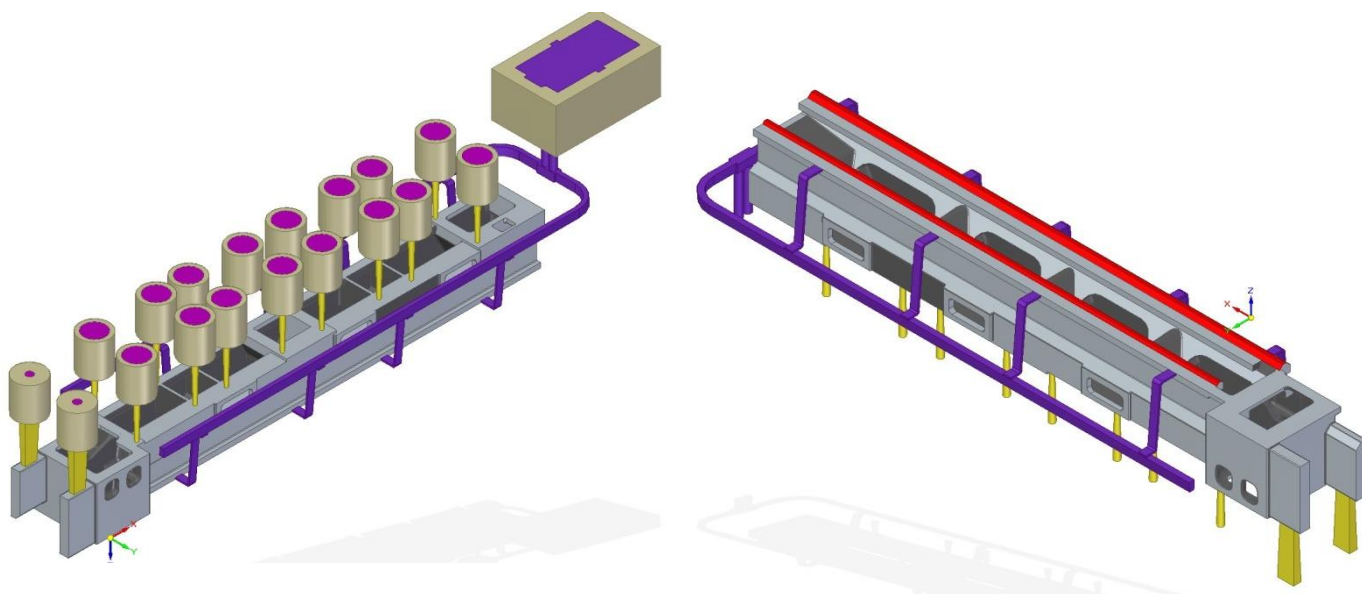
- *Proměnné návrhu:* Prvky, které se mohou měnit, například výška a průměr nálitky, teplota lití kovu nebo teplota předehřívání skořepiny
- *Omezení:* Určuje, zda je určitá konstrukce přijatelná. Například minimální přijatelné procento využití kovu nebo maximální přijatelná míra makroporozity. Mnoho omezení může být použito v jediném optimalizačním cyklu.
- *Cílová funkce:* Uvádí, co se snažíte dosáhnout, jako je maximalizace využití kovu, minimalizace smršťování nebo minimalizace doby tuhnutí. [12]



Obrázek 4.7 – náletek litiny, písková forma před a po optimalizaci, modul OPTICast [12]

5 ANALÝZA ODLITKU

Cílem mé práce je ve spolupráci s firmou Metalurgie Rumburk s.r.o. analyzovat a optimalizovat odlitek lože soustruhu pomocí počítačové simulace v software NovaFLOW&SOLID. Materiál odlitku je LLG, EN GJL 250. Při výrobě tohoto odlitku byly po obrábění vodících ploch detekovány vady, které byly neslučitelné s předávkou pro zákazníka. Při kapilární zkoušce obráběných funkčních vodících ploch koníka soustruhu vyšla najevo mikroporozita.



Obrázek 5.1 – 3D model s technologickými přídávky

Metalurgií Rumburk byl dodán již opřídavkovaný model připravený k simulaci. Červeně označené plochy byly po odlití obráběny, na kterých byla následně detekována mikroporozita. Fialovou barvou je označena vtoková soustava. Výstupky vedoucí z odlitku slouží jako výfuky a zároveň také jako nálitky pro absorpci staženin.

Tento model byl následně použit pro počáteční simulaci a analýzu prvotních výsledků.



Obrázek 5.2 - zaformovaný spodní (vlevo) a vrchní díl (vpravo) formy

Technologické parametry odlitku:

Materiál odlitku: EN GJL 250

Formovací směs: Furanový písek

Licí teplota: 1340 °C

Doba lití: 40 s

Okolní teplota: 20 °C

Chladítka: Ne

Odlitek je umístěn ve formě vodícími plochami na dno formy. To znamená, že je odléván dnem vzhůru.

Rozměry odlitku:

Délka x šířka x výška: 3343 x 355 x 359 mm

Surová hmotnost: 1486 kg

Čistá hmotnost: 895 kg

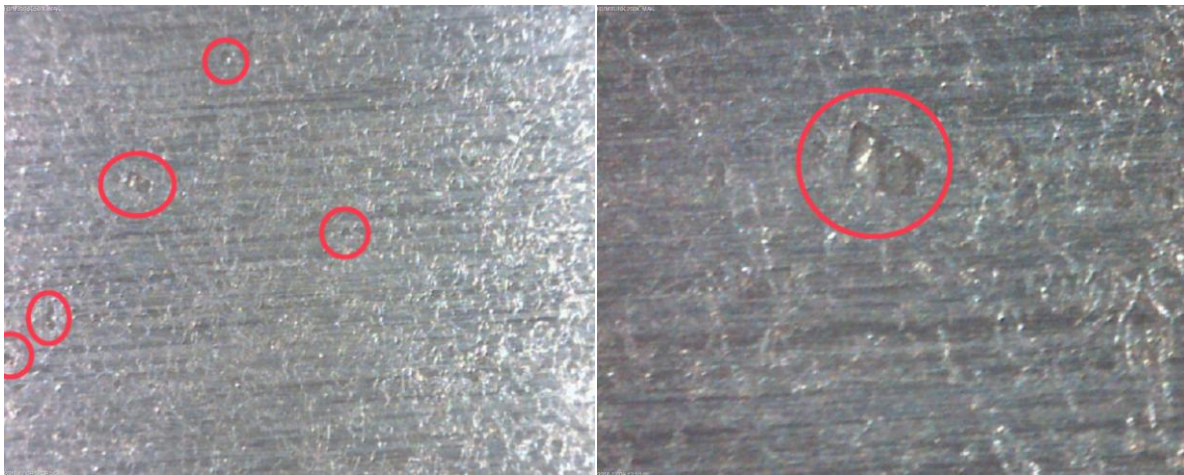
Metalurgie dané tavby:

Tabulka 7: Chemický rozbor dané tavby odlitku

Datum:	Č. tavby:	C	Mn	Si	P	S	Cr	Cu	Mg	CE
01.11.2016	16-0392	3.201	0.754	1.585	0.248	0.047	0.051	0.113	0.001	3.721

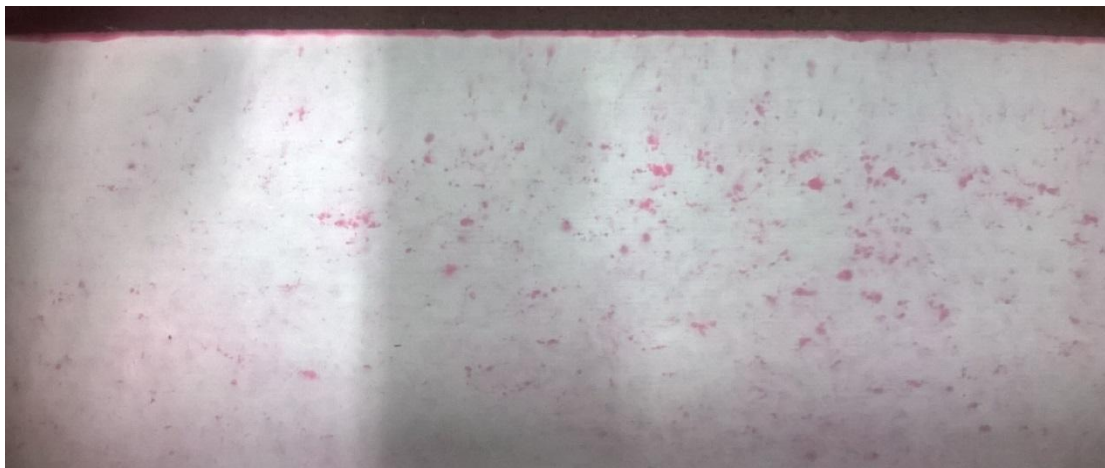
Metalografie obrobené vadné plochy:

Na vodících plochách byly po obrábění detekovány vady. Prvotní domněnka byla, že se jedná o trhliny způsobené vlivem vnitřního pnutí. Nicméně po provedení vstupní simulace bylo zjištěno, že v odlitku v oblasti problematických ploch není žádné výrazné zbytkové pnutí způsobující trhliny. Proto se tedy přešlo na variantu, že se jedná o vyplavený volný grafit a mikroporozitu, což potvrzují i následně dodané metalografické snímky vodících ploch a vstupní simulace.



Obrázek 5.3 – detekovaná abnormální mikroporozita vodících ploch, zvětšeno 50x(vlevo), 200x(vpravo)

Kapilární zkouška vodících ploch opět potvrzuje cestu mikroporozity.



Obrázek 5.4 – snímek z kapilární zkoušky

6 SIMULACE TECHNOLOGICKÝCH VARIANT ODLITKU

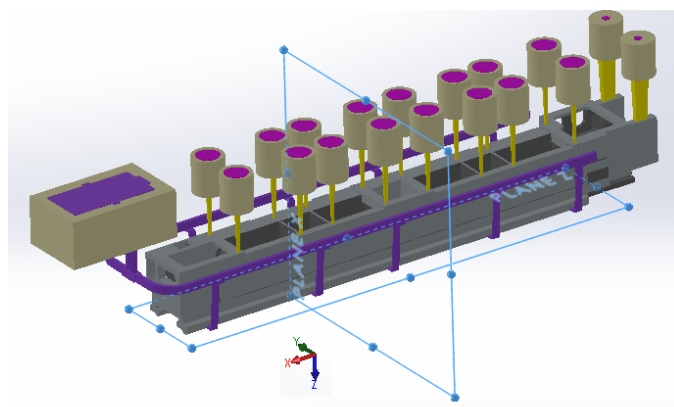
V rámci racionalizace technologie a zamezení opakování zmíněných vad jsem provedl výchozí simulaci pro zjištění současného stavu a dále 6 technologických variant. Během úpravy technologických paramaterů byly upravovány pouze vtoky a chladítka. Procesní parametry (licí teplota, čas lití, formovací směs) zůstaly beze změny.

Simulované technologické varianty:

- výchozí model
- model s chladítky umístěnými na vodících plochách mimo zářezy ústící do odlitku
- model s chladítky umístěnými na vodících plochách v celé délce
- model s dvěma zaformovanými vtoky
- model s pomocnými zářezy v horní části odlitku
- model s pomocnými zářezy v horní části odlitku a chladítky umístěnými na vodících plochách v celé jejich délce

Technologická varianta s dvěma zaformovanými vtoky je pouze informativní. Technologické možnosti dané slévárny neumožňují tuto variantu provést z důvodu nedostatečného místa pro dvě kočky jeřábu v dané zaformované délce odlitku.

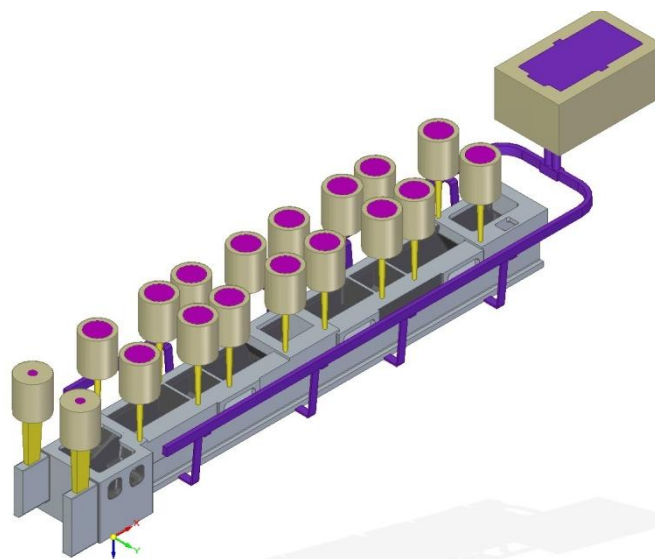
Při analýze provedených simulací byly vyhodnocovány dva typy řezů odlitku. Jedná se o podélné řezy rovinou Z a příčné řezy rovinou X. Rovina X protíná odlitek v několika částech v celé délce součásti. Rovina Z představuje pohled shora na průřez vodících ploch. Rovina X představuje příčné řezy ve sledovaných kritických místech dle výsledků simulace.



Obrázek 6.1 – rovina Z (horizontální rovina) vedená vodícími plochami, rovina X (vertikální rovina)

6.1 SIMULACE Č.: 1

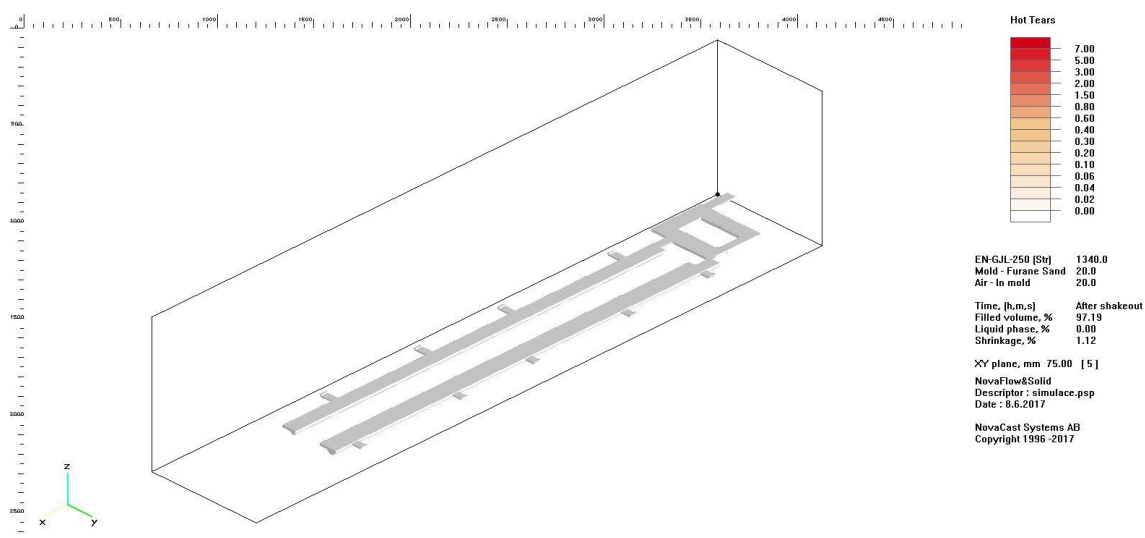
První varianta simulace se zabývá vstupní analýzou odlitku a zjištění příčin daných vad.



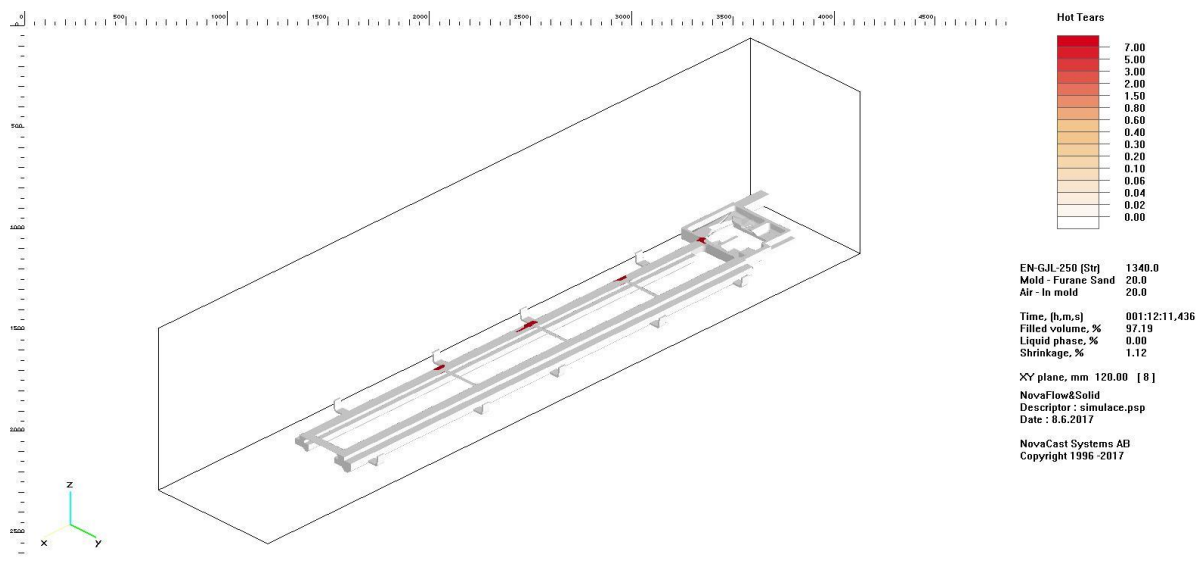
Obrázek 6.2 – vstupní model pro simulaci

Tabulka 8: Technologické parametry procesu

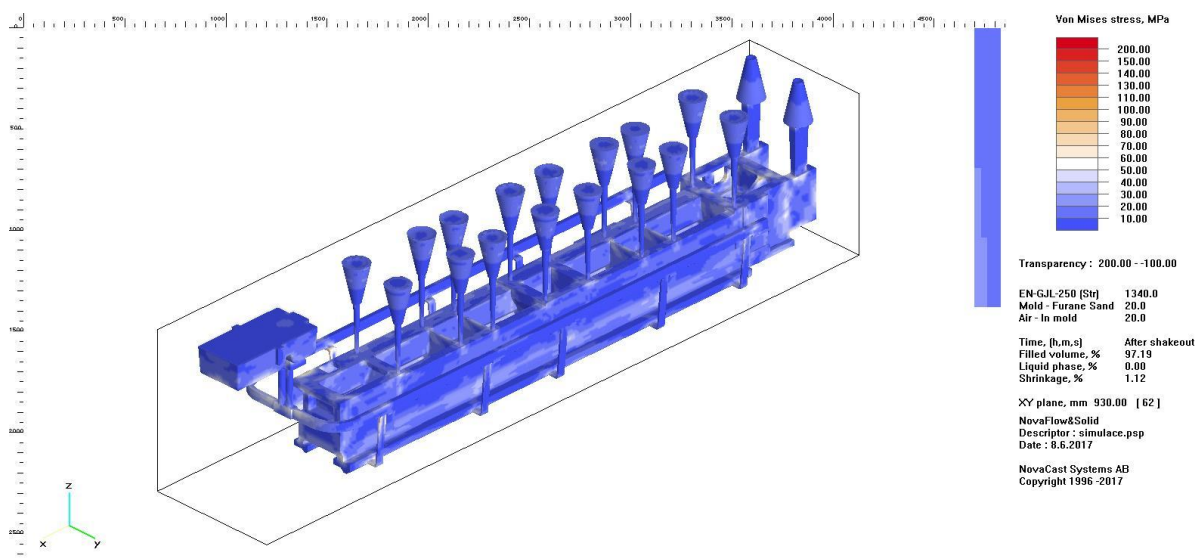
Licí teplota	1340 °C
Okolní teplota	20 °C
Doba lití	40 s
Chladítka	Ne
Jádra	Ano, furanová směs



Obrázek 6.3 – snímek trhlin za tepla (řez 45 mm od spodní plochy)

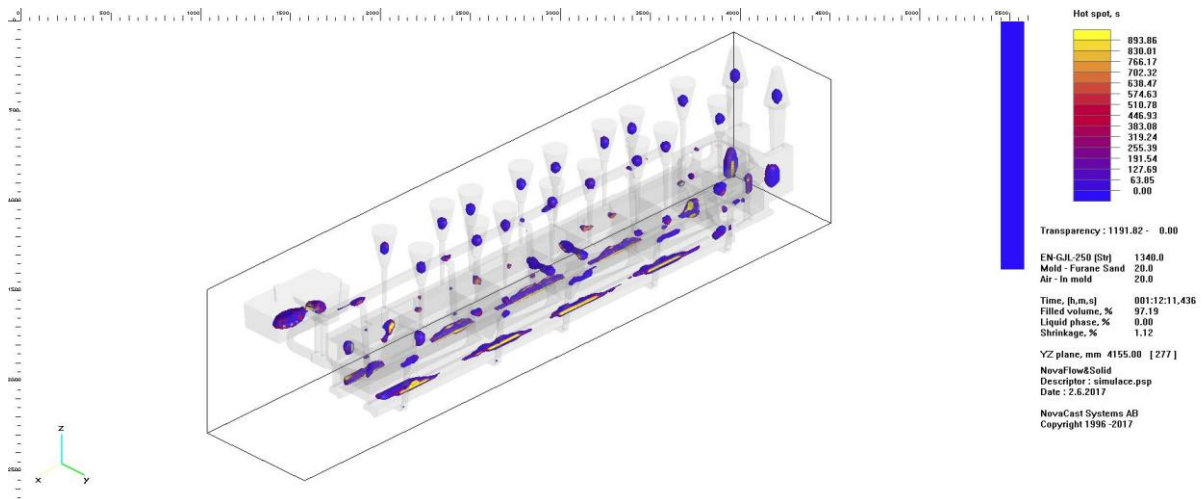


Obrázek 6.4 – snímek trhlin za tepla (řez 60 mm od spodní plochy)

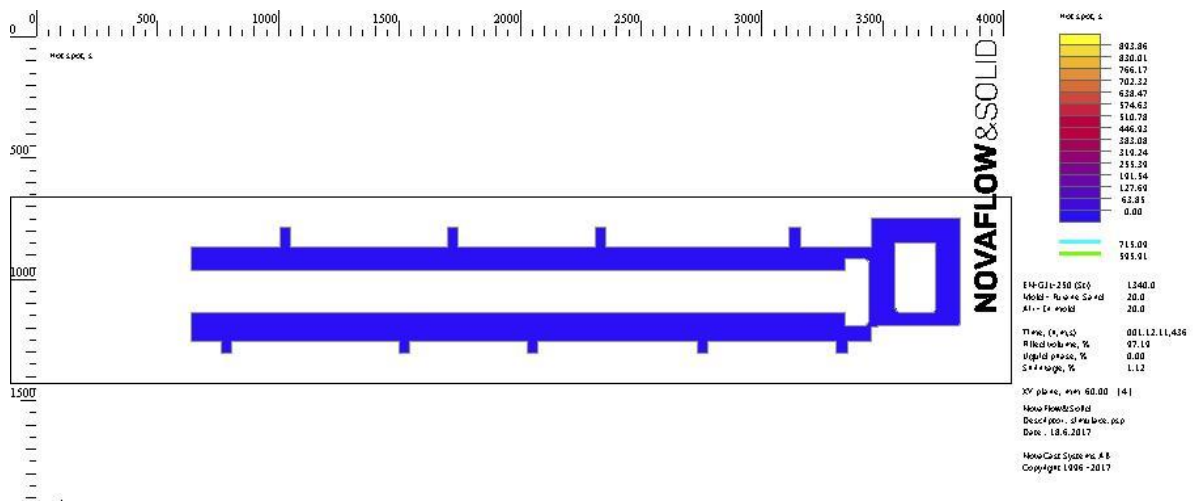


Obrázek 6.5 – zbytkové pnutí v odlitku

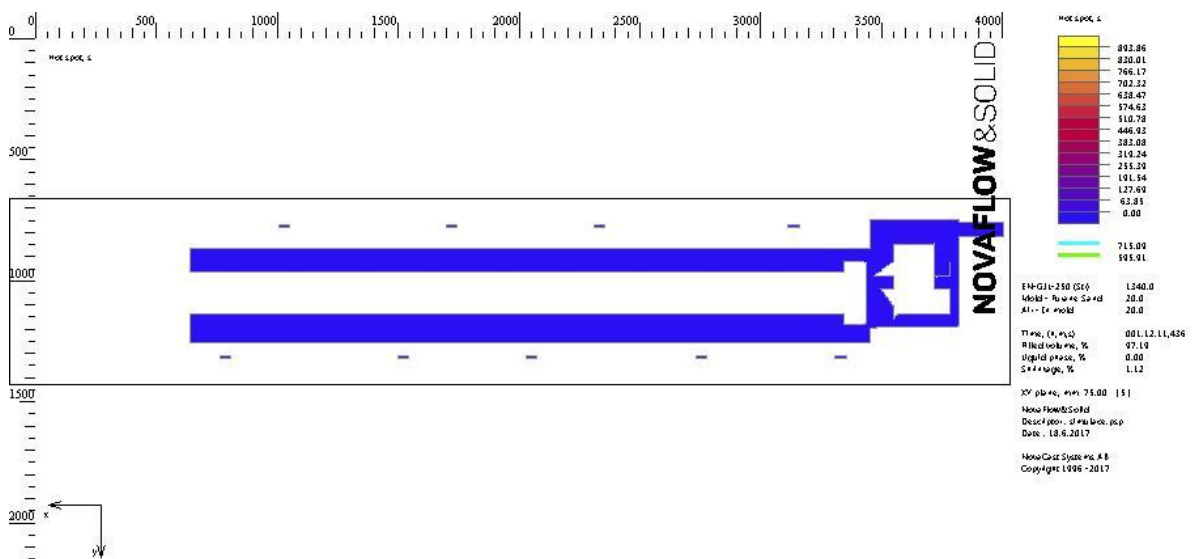
Při analýze zbytkového pnutí a trhlin za tepla bylo zjištěno, že v bezprostředním okolí problematických ploch se nenachází žádné vady ani kritické napětí. Až v řezu 60 mm od spodní plochy (viz. obrázek 30) můžeme pozorovat možný výskyt trhlin. Ty ovšem nezasahují do vodících ploch. Na základě těchto výsledků a následné konzultaci (jedná se o vypalovaný grafit a mikroporozitu) jsem tedy přešel k analýze tuhnutí odlitku a hledání tepelných uzlů.



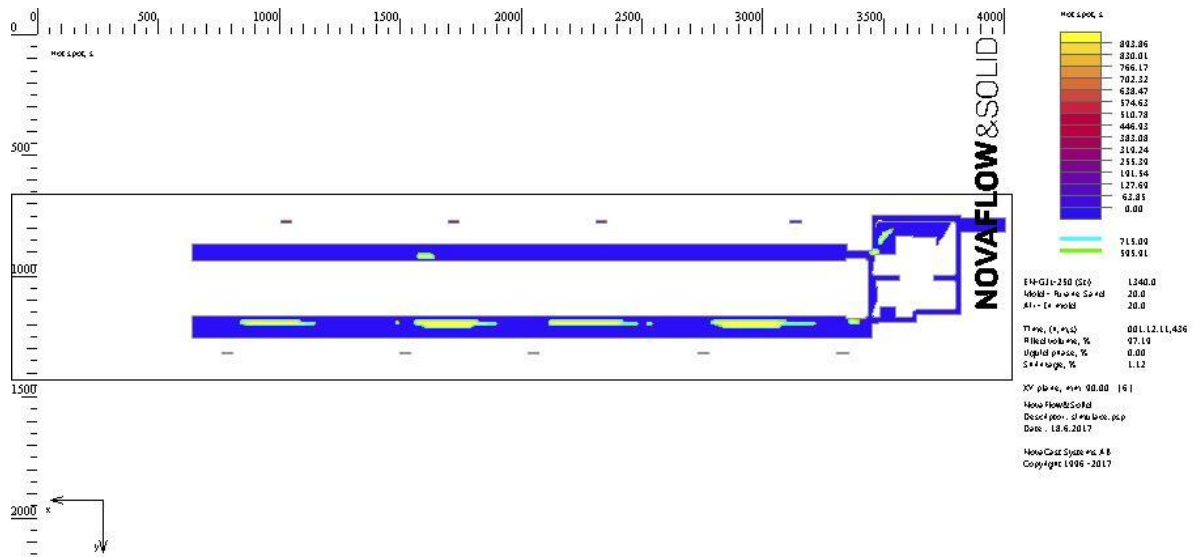
Obrázek 6.6 – zobrazení tepelných uzlů v transparentním modelu



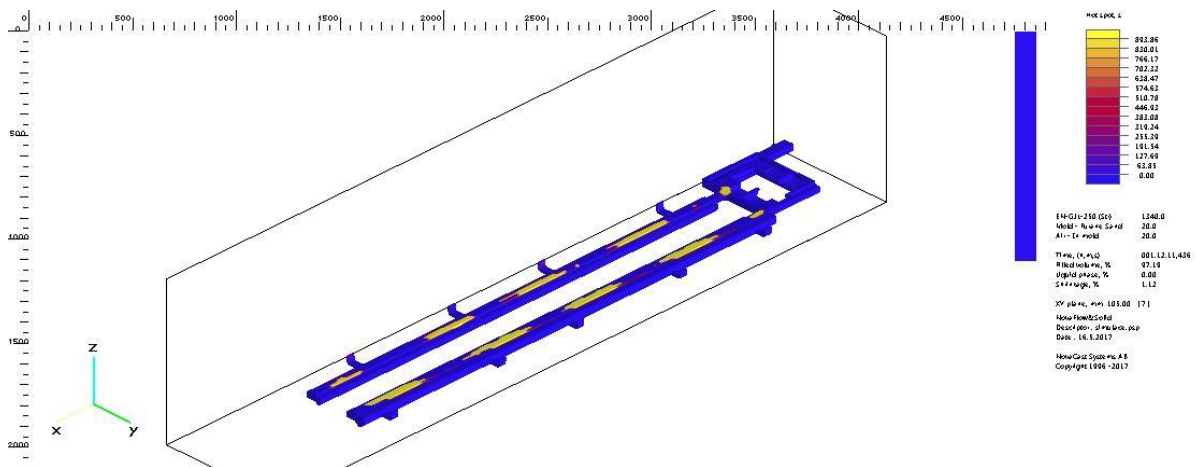
Obrázek 6.7 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 30 mm



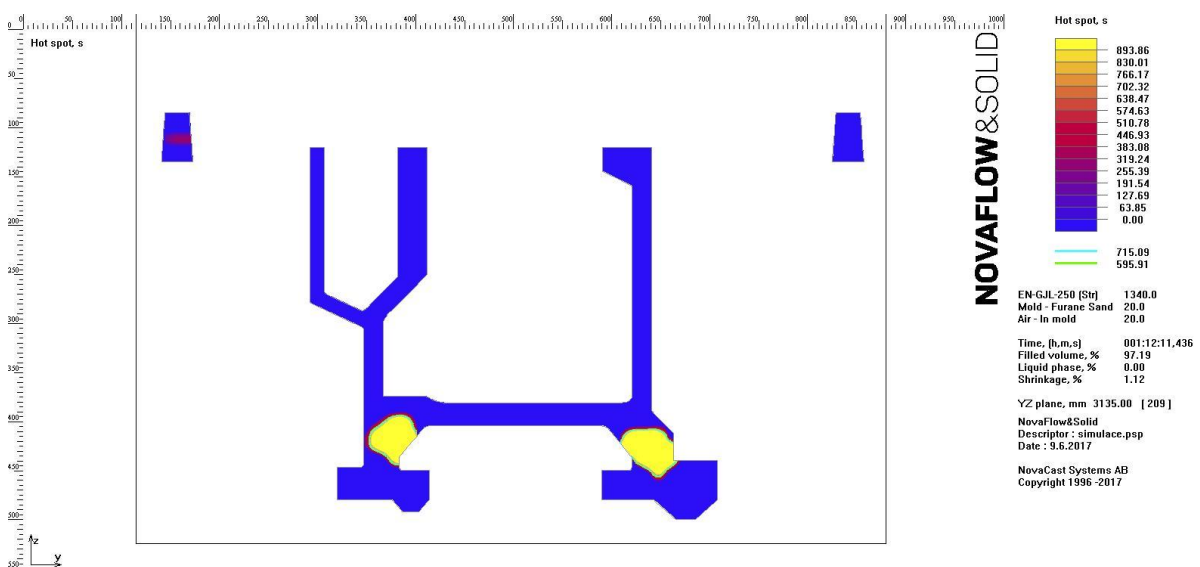
Obrázek 6.8 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 45 mm



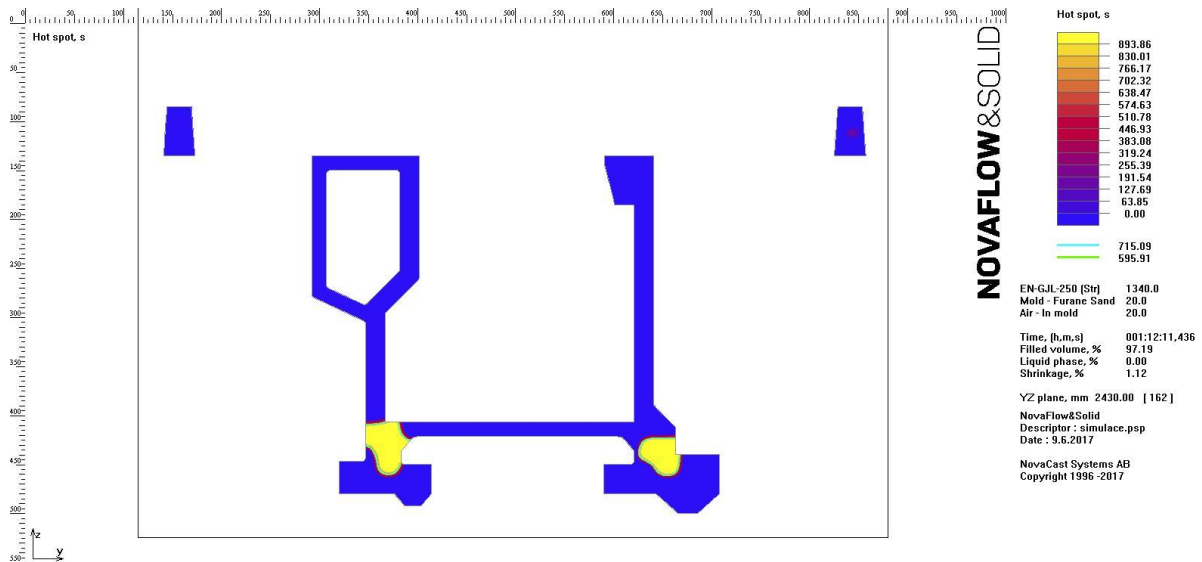
Obrázek 6.9 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 60 mm



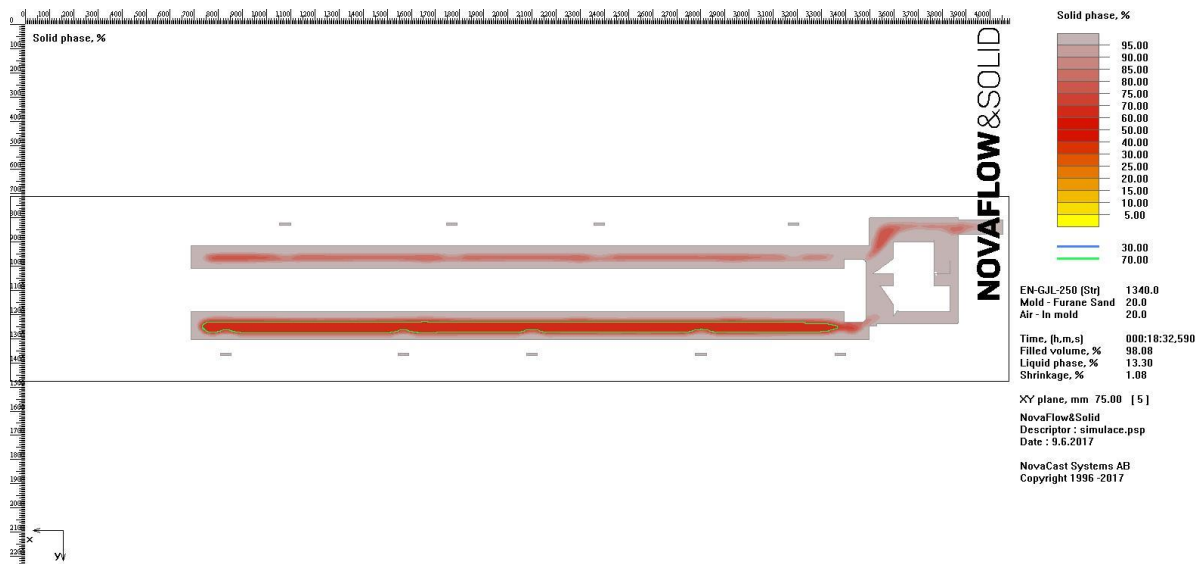
Obrázek 6.10 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 70 mm



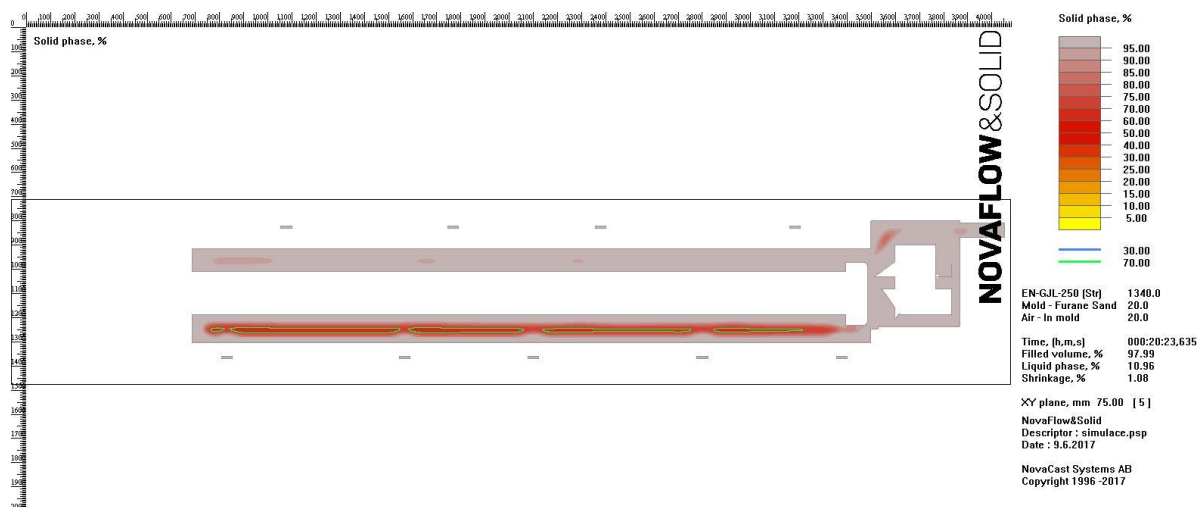
Obrázek 6.11 – tepelné uzly, řez rovinou X



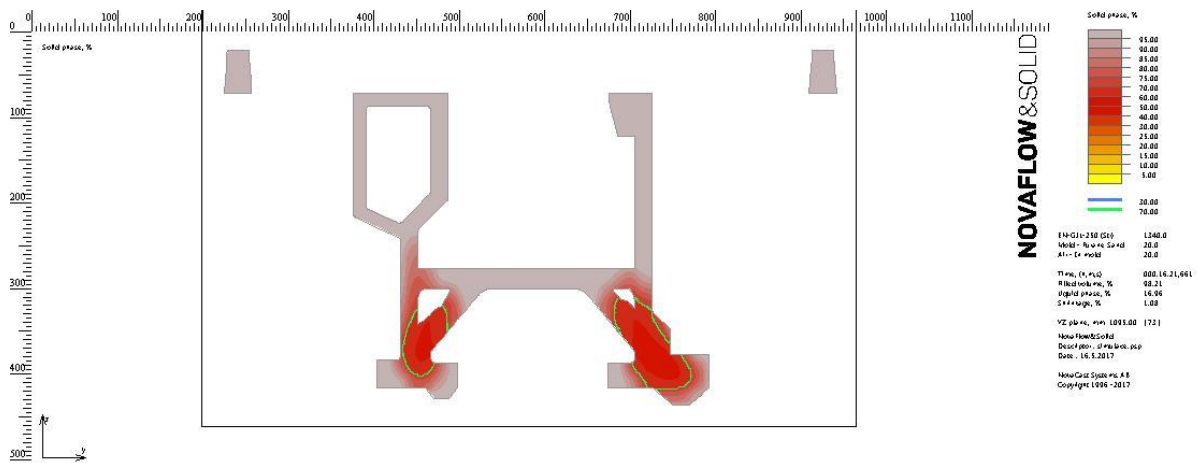
Obrázek 6.12 – teplé uzly, řez rovinou X



Obrázek 6.13 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 45 mm, likvid 13%



Obrázek 6.14 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 45 mm, likvid 11%



Obrázek 6.15 – tuhnutí odlitku, řez rovinou X, likvid 17%

Shrnutí výsledků simulace:

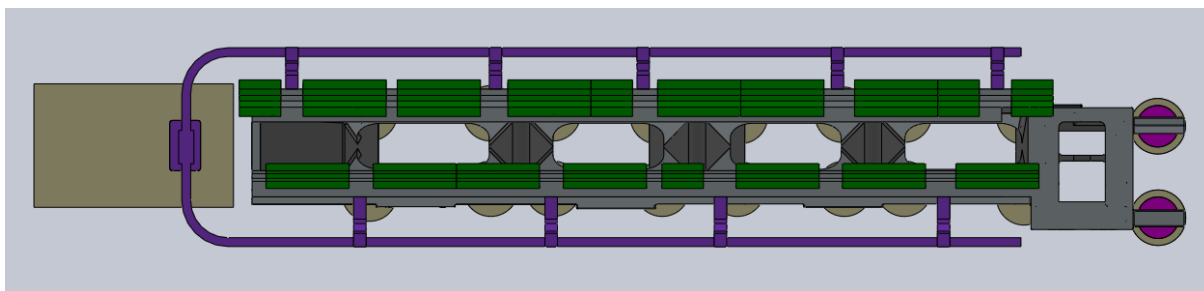
Na základě výsledků počáteční simulace můžeme vidět, že prvotní myšlenka trhlin způsobených vnitřním pnutím nebo trhliny za tepla byla mylná. Napětí v odlitku nepřesahuje 30 - 40 Mpa, možné trhliny se mohou nacházet mimo problematickou oblast.

Naopak při analýze tuhnutí odlitku bylo zjištěno, že okolí vodících ploch v odlitku tuhne téměř jako poslední. To je dáno jednak technologickou konstrukcí odlitku, asice vyústěním zářezů do odlitku a dále konstrukcí odlitku jako takovou, kdy se v tomto místě protínají vodící plochy, tělo lože a žebrování. To dává za vznik zmiňovaným tepelným uzlům. Dlouhá doba tuhnutí jedním z kritérií pro vyplavení volného grafitu.

V dalších variantách se tak budu pokoušet tepelné uzly zcela odstranit, nebo alespoň posunout do horních částí odlitku tak, aby nezasahovaly do vodících ploch.

6.2 SIMULACE Č.: 2

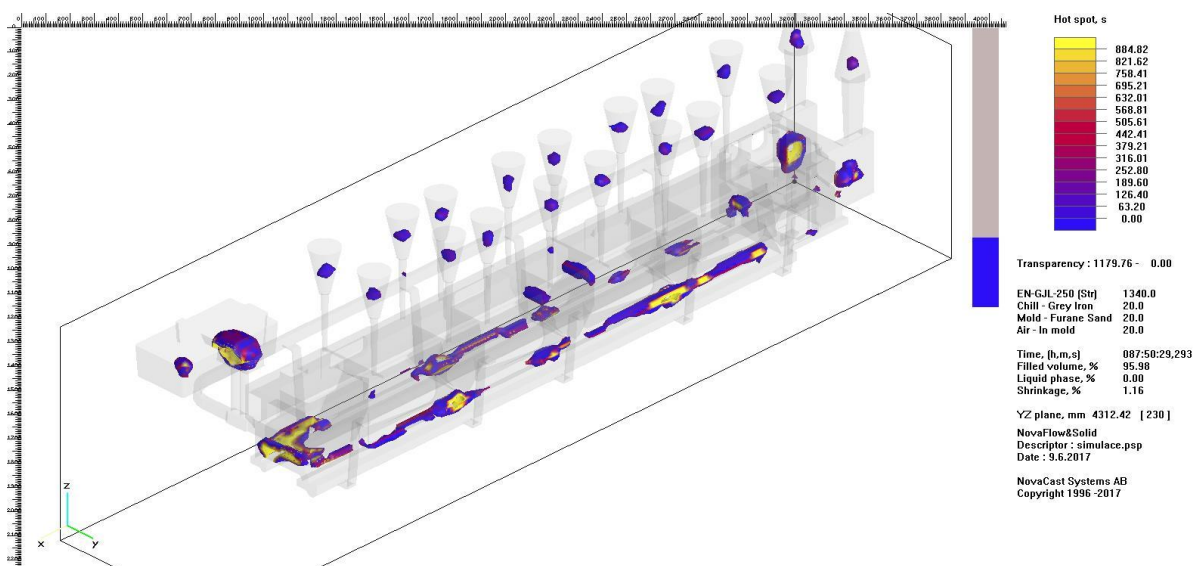
V této simulační variantě byla přidána chladítka na vodící plochy. Byla rozmístěna s ohledem na zářezy ústící do odlitku. Chladítka jsou mimo tyto zářezy. Toto rozmístění bylo zvoleno proto, aby nedocházelo k přílišnému ochlazování taveniny vstupující do formy.



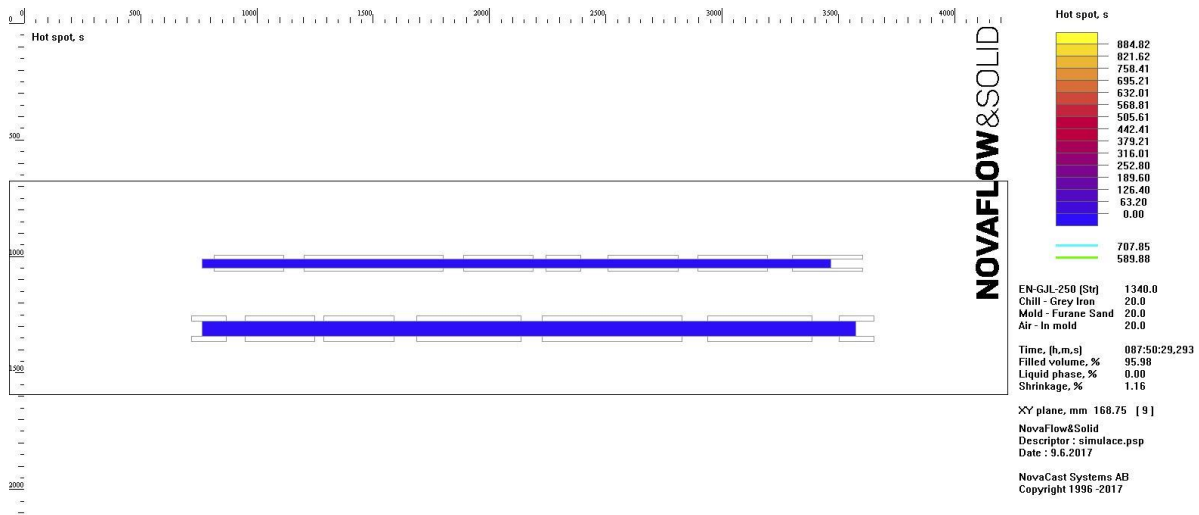
Obrázek 6.16 – vstupní model pro simulaci, zobrazení rozmístění chladítek na vodících plochách

Tabulka 9: Technologické parametry procesu

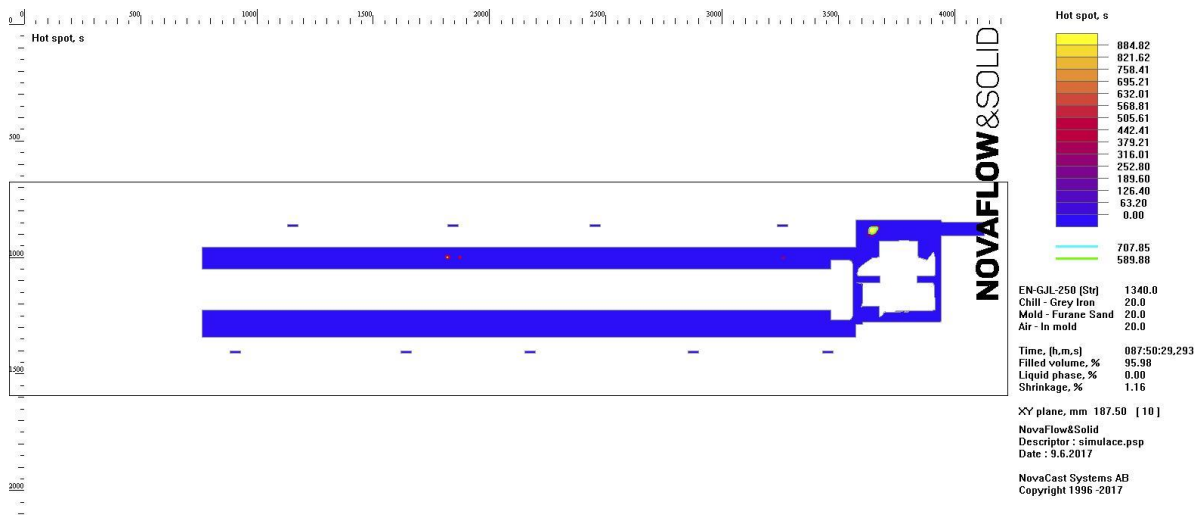
Licí teplota	1340 °C
Okolní teplota	20 °C
Doba lití	40 s
Chladítka	Ano, litinová, 20 °C, s rozestupy
Jádra	Ano, furanová směs



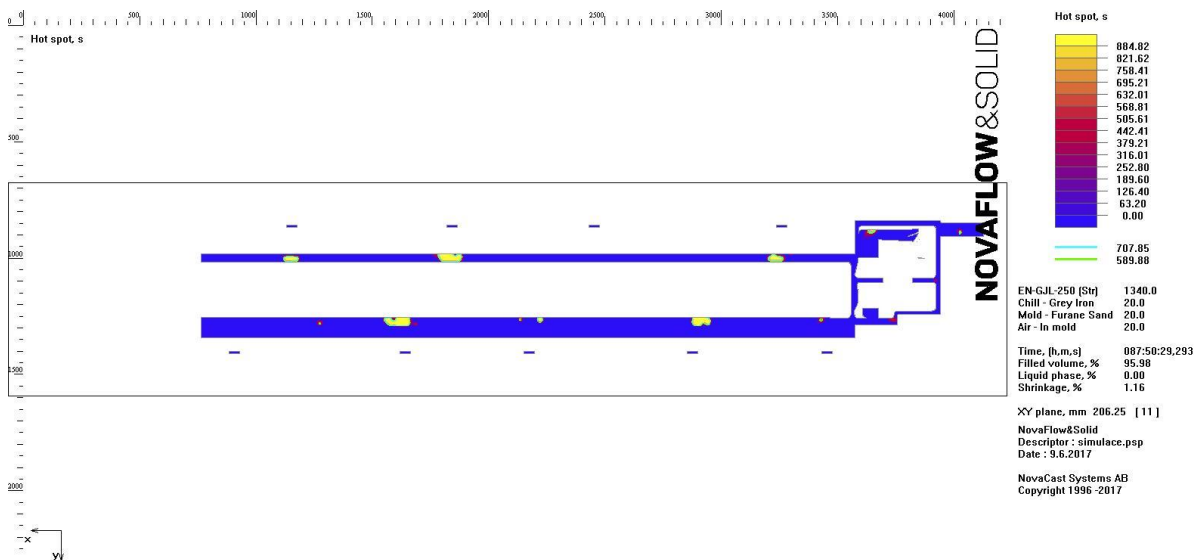
Obrázek 6.17 – zobrazení tepelných uzlů v transparentním modelu



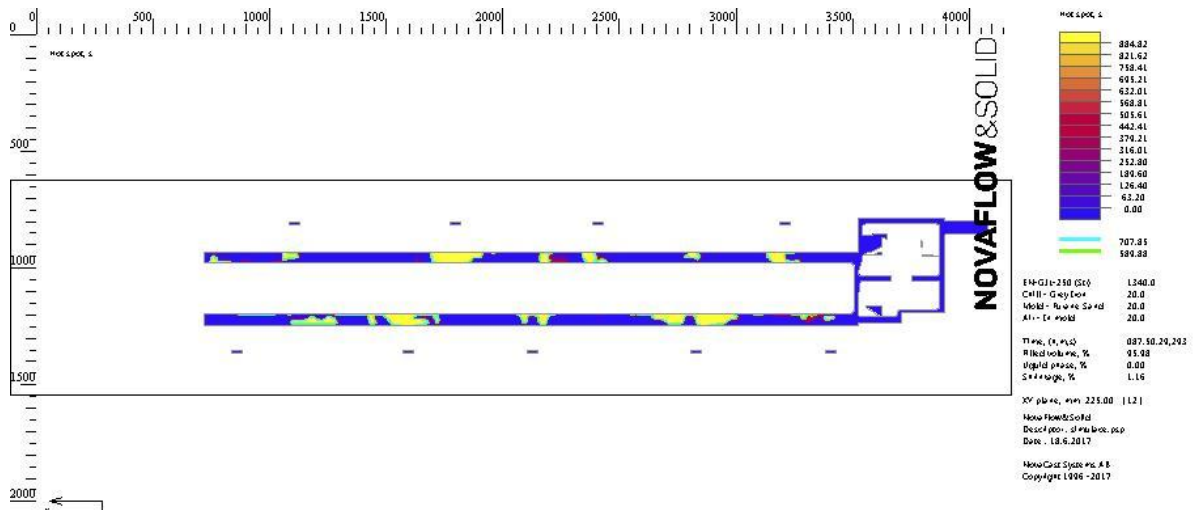
Obrázek 6.18 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 30 mm



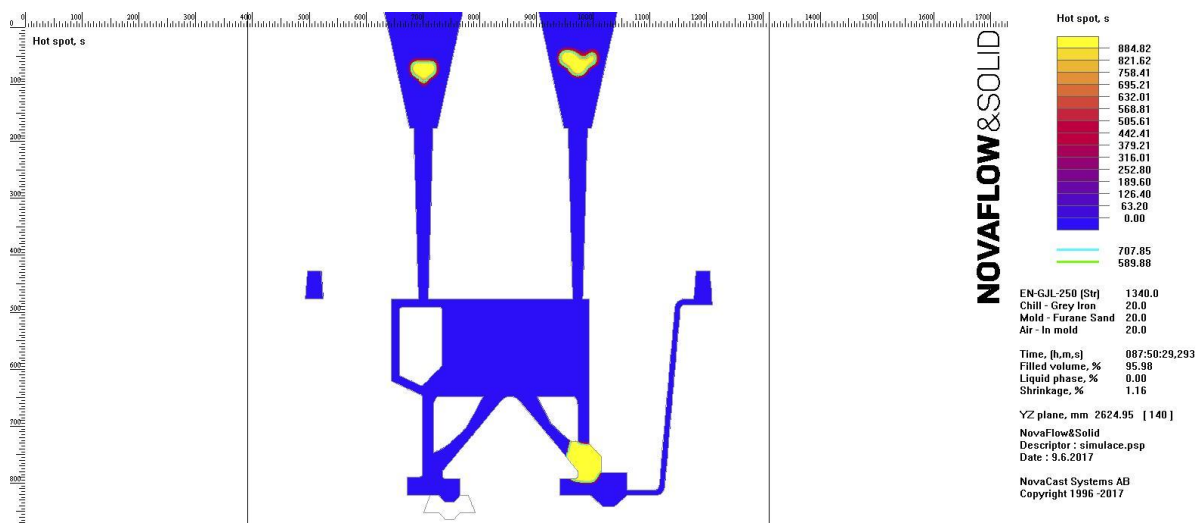
Obrázek 6.19 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 45 mm



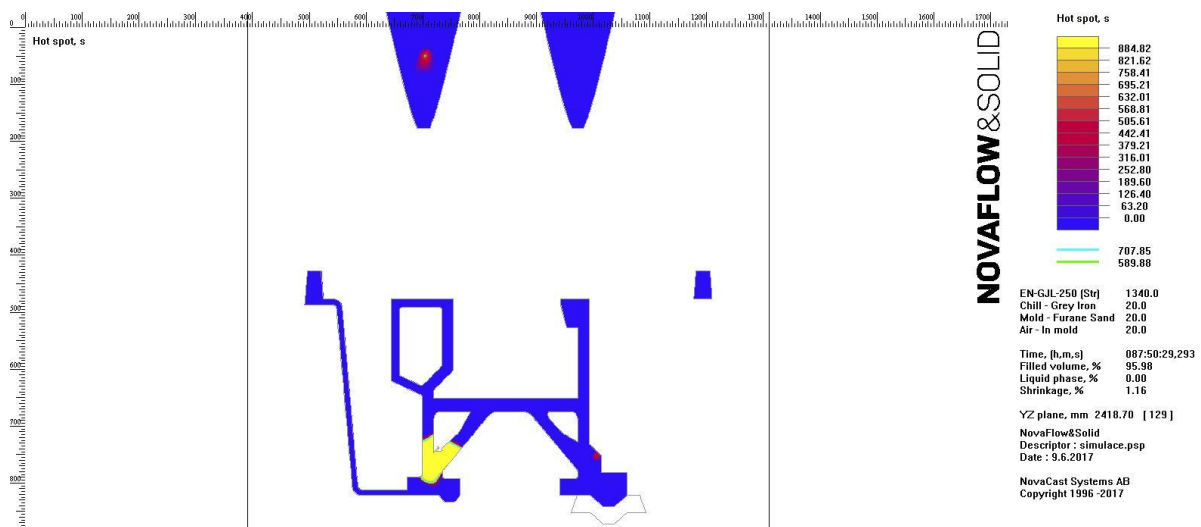
Obrázek 6.20 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 60 mm



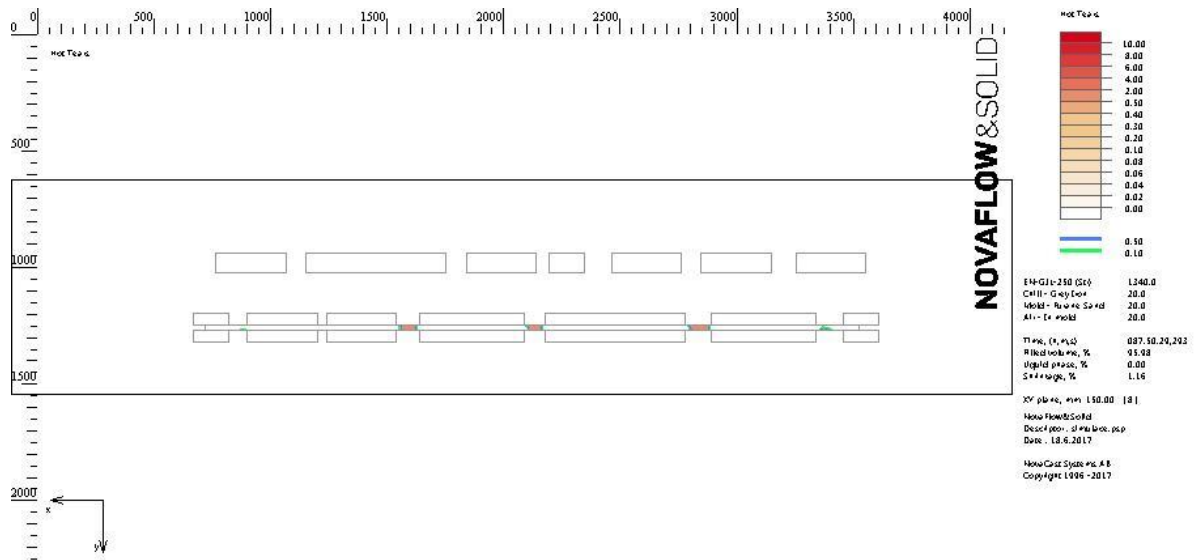
Obrázek 6.21 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 75 mm



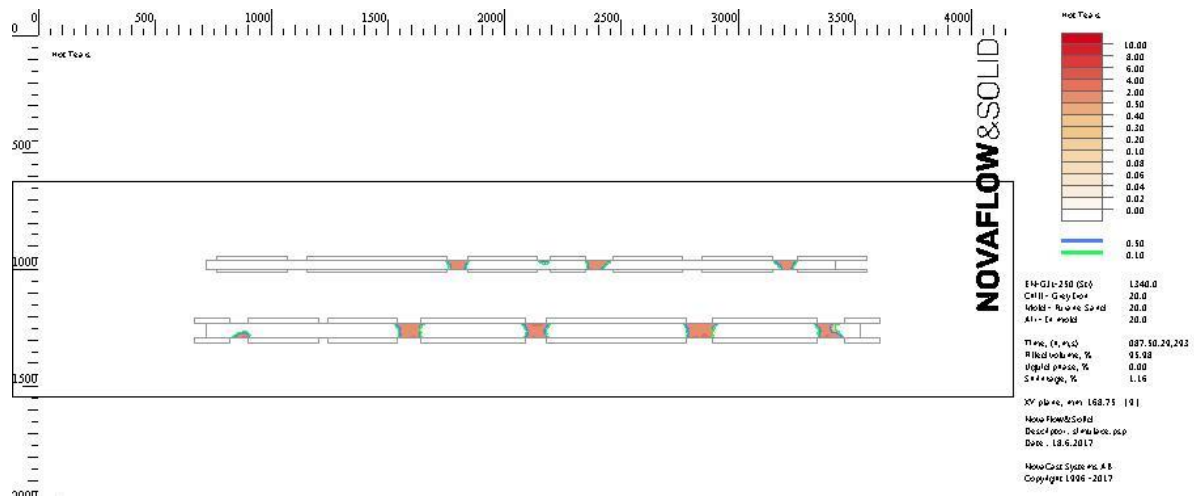
Obrázek 6.22 – tepelné uzly, kritické místo č.:1, řez rovinou X



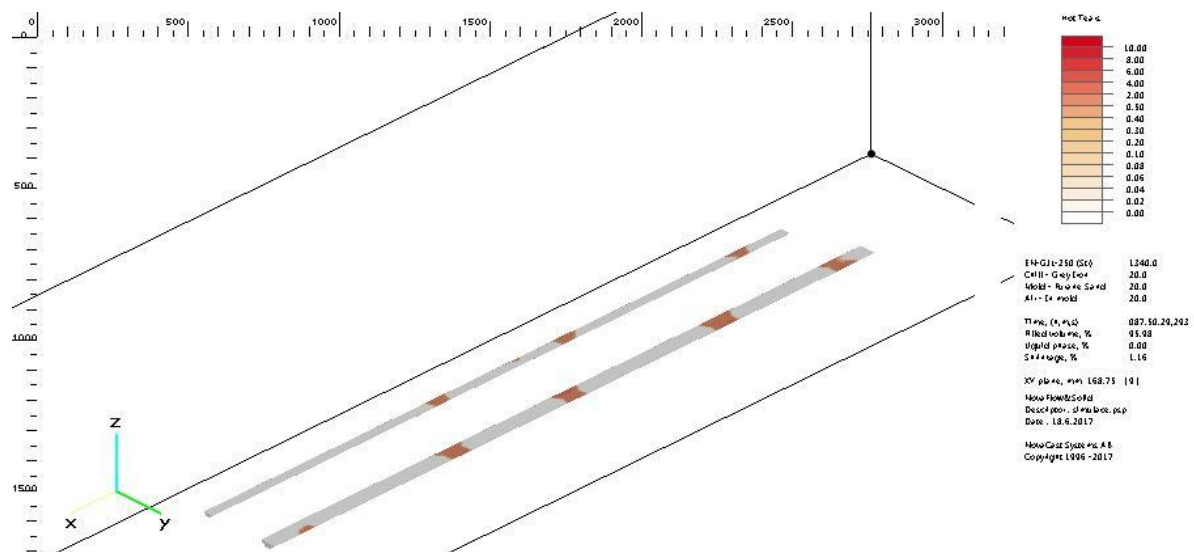
Obrázek 6.23 – tepelné uzly, kritické místo č.: 2, řez rovinou X



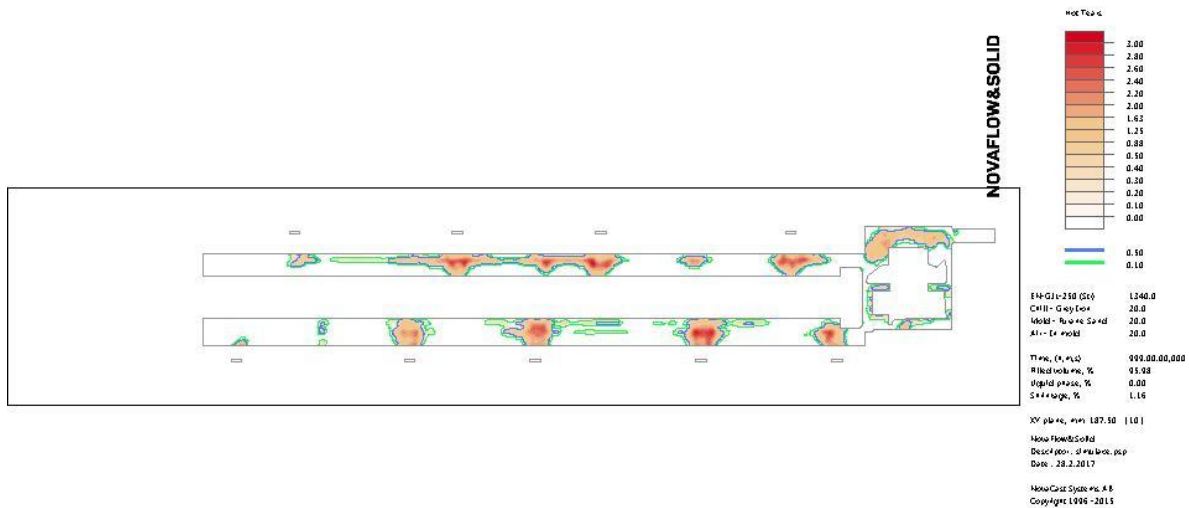
Obrázek 6.24 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 15 mm



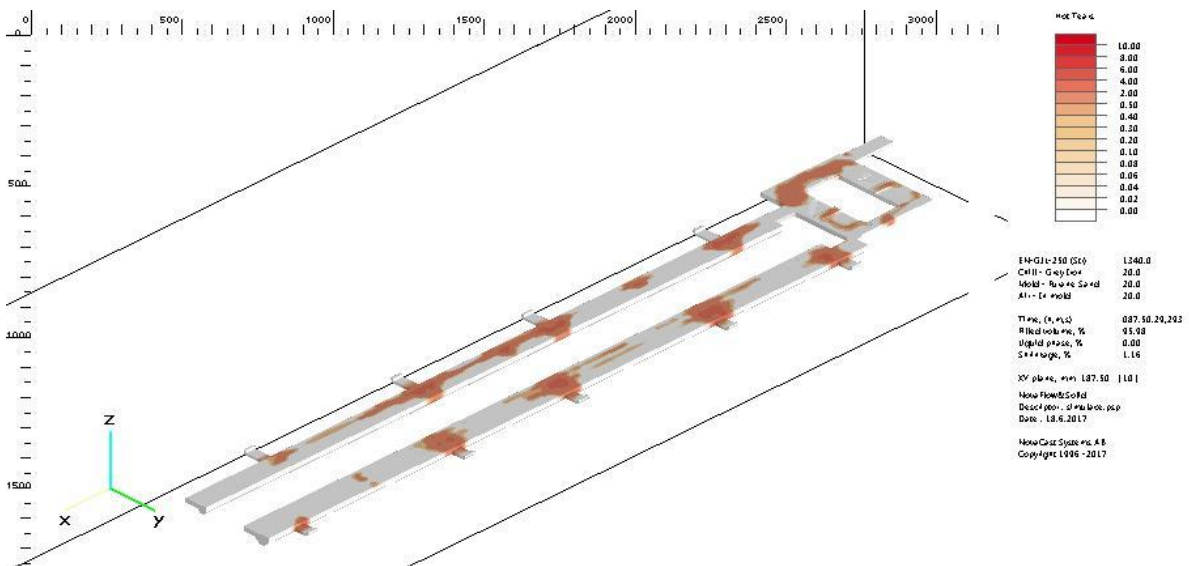
Obrázek 6.25 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 30 mm



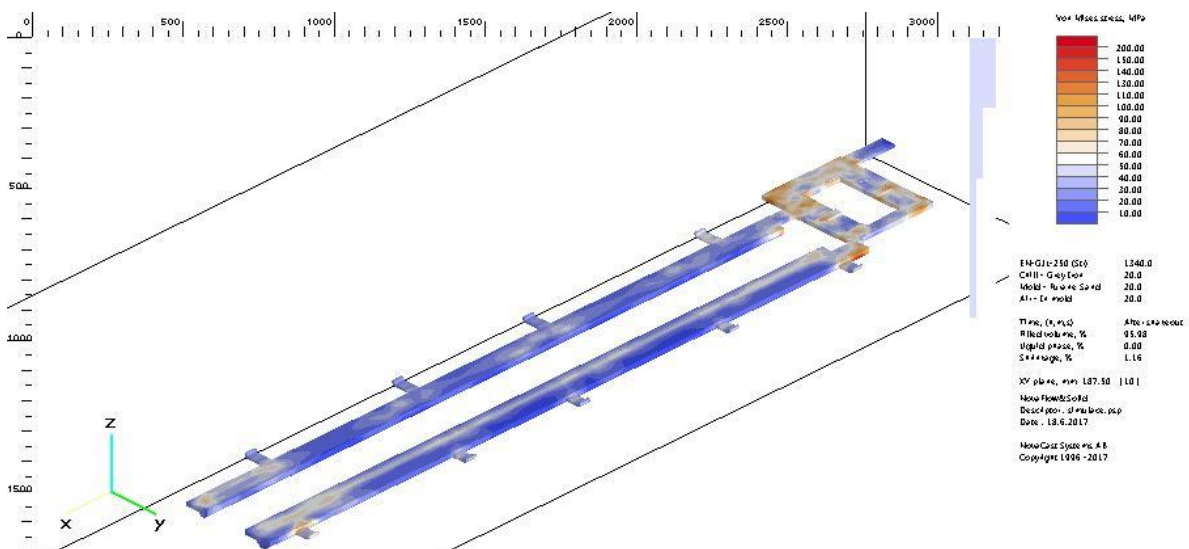
Obrázek 6.26 – izometrické zobrazení obrázku 6.25



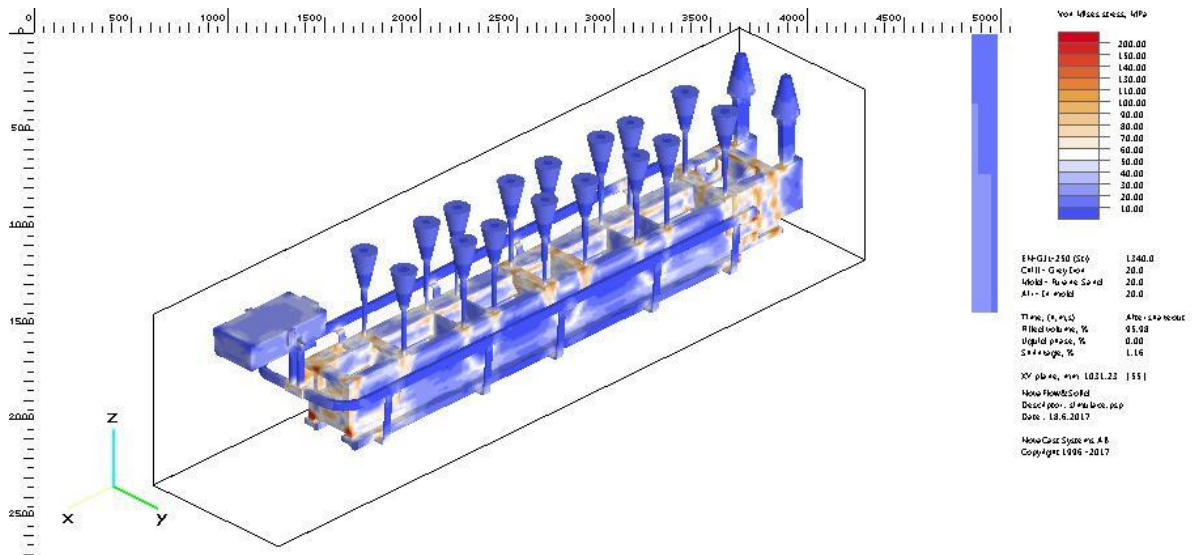
Obrázek 6.27 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 45 mm



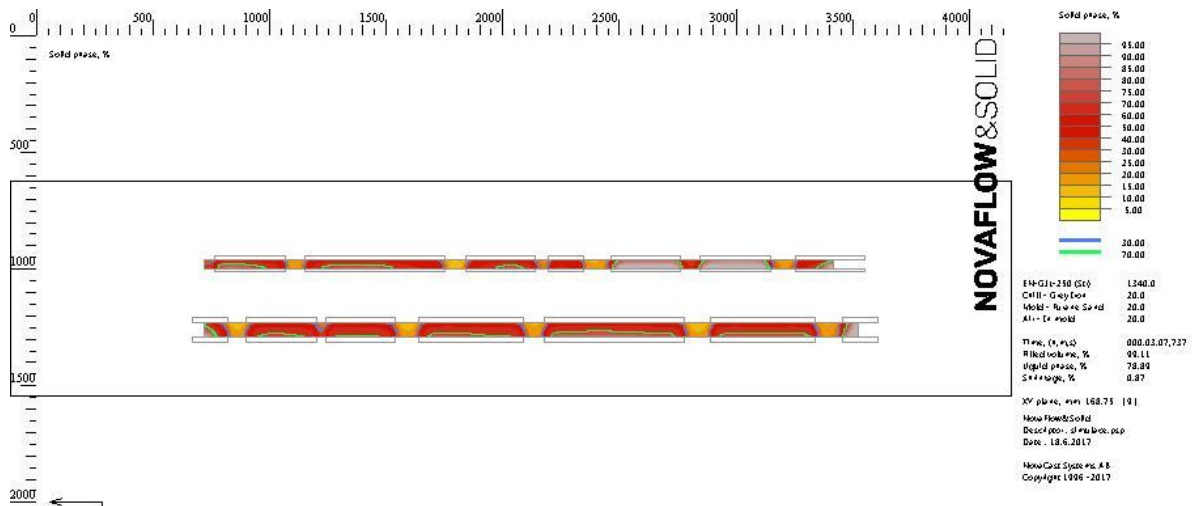
Obrázek 6.28 – izometrické zobrazení obrázku 6.27



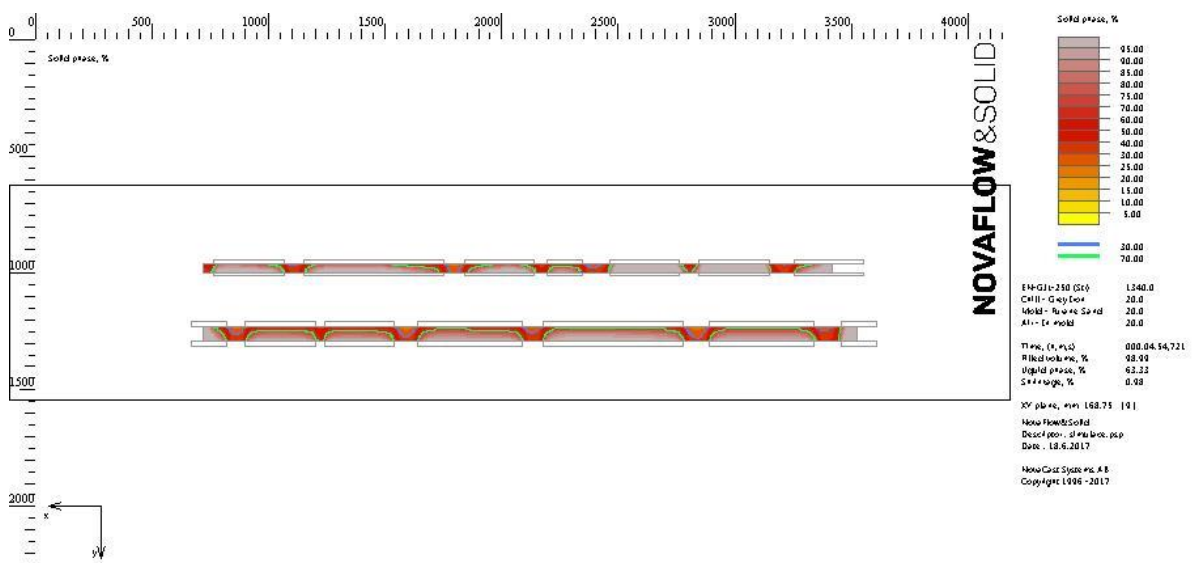
Obrázek 6.29 – zbytkové pnutí v okolí vodících ploch



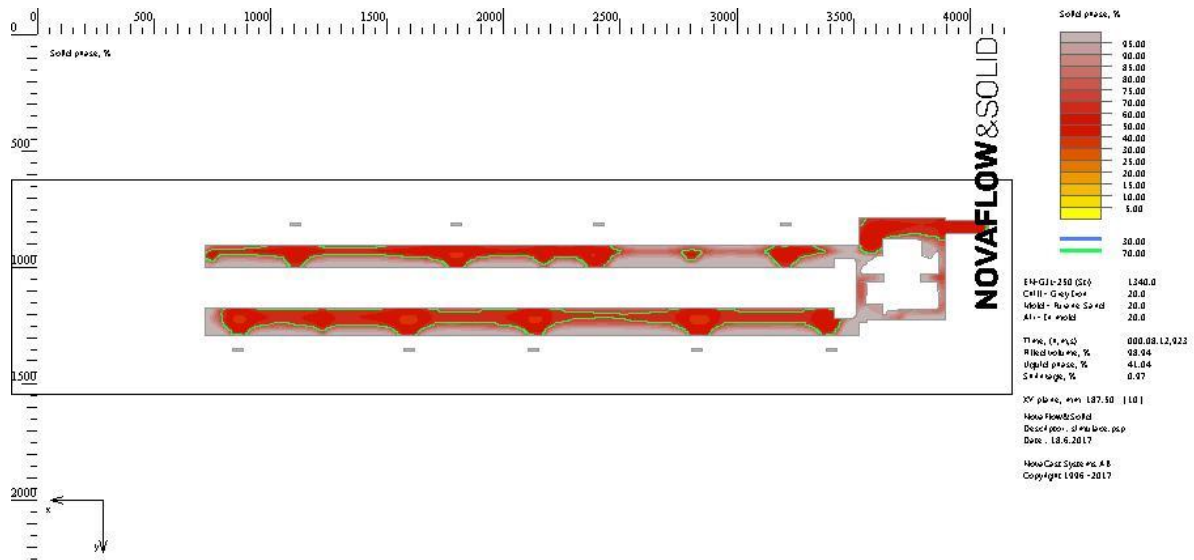
Obrázek 6.30 – zbytkové pnuti v celém odlitku



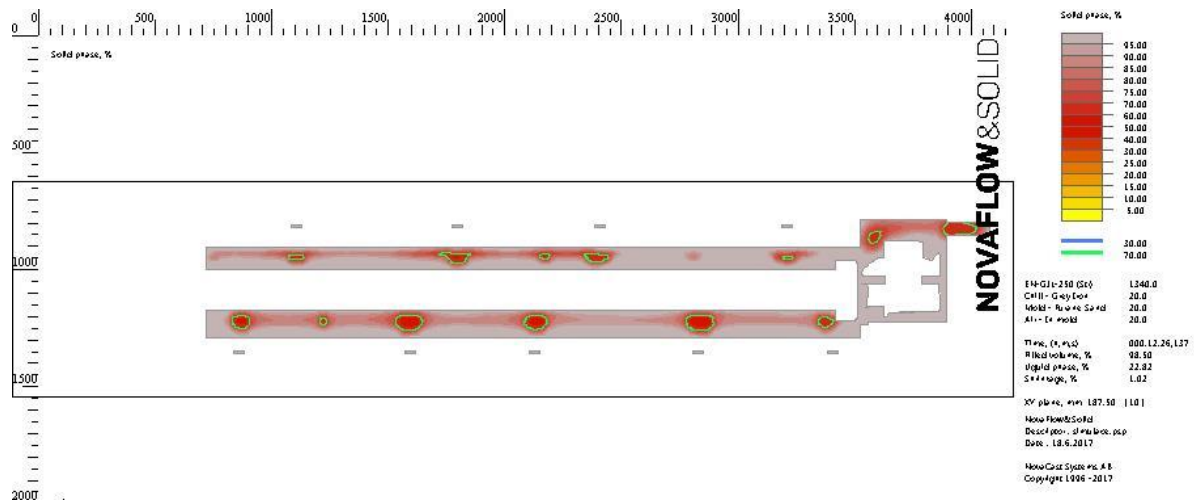
Obrázek 6.31 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30mm, likvid 73 %



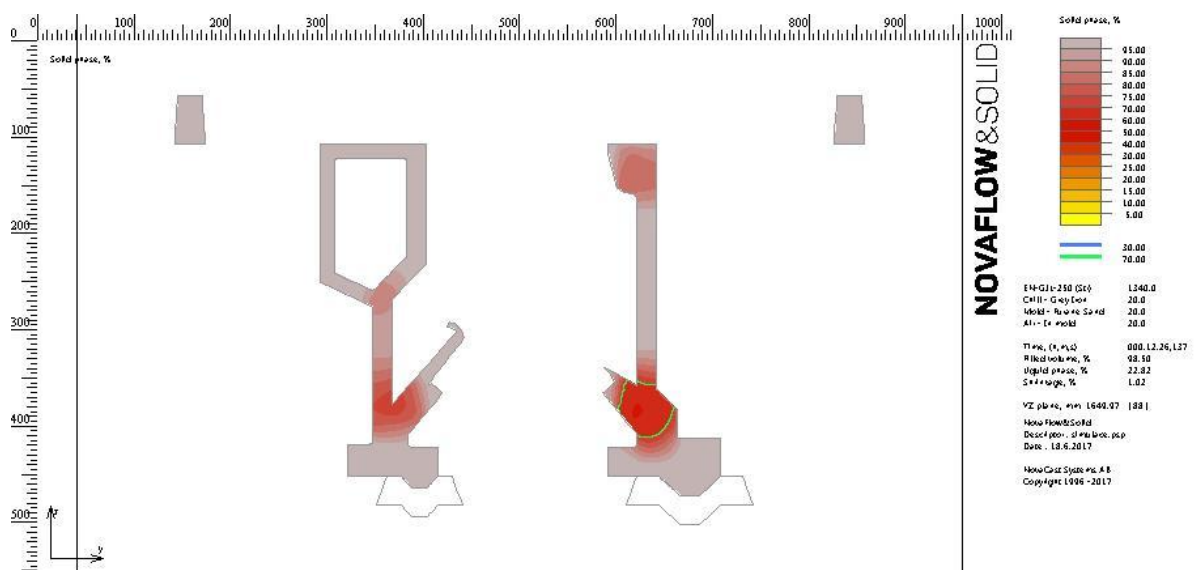
Obrázek 6.32 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 63 %



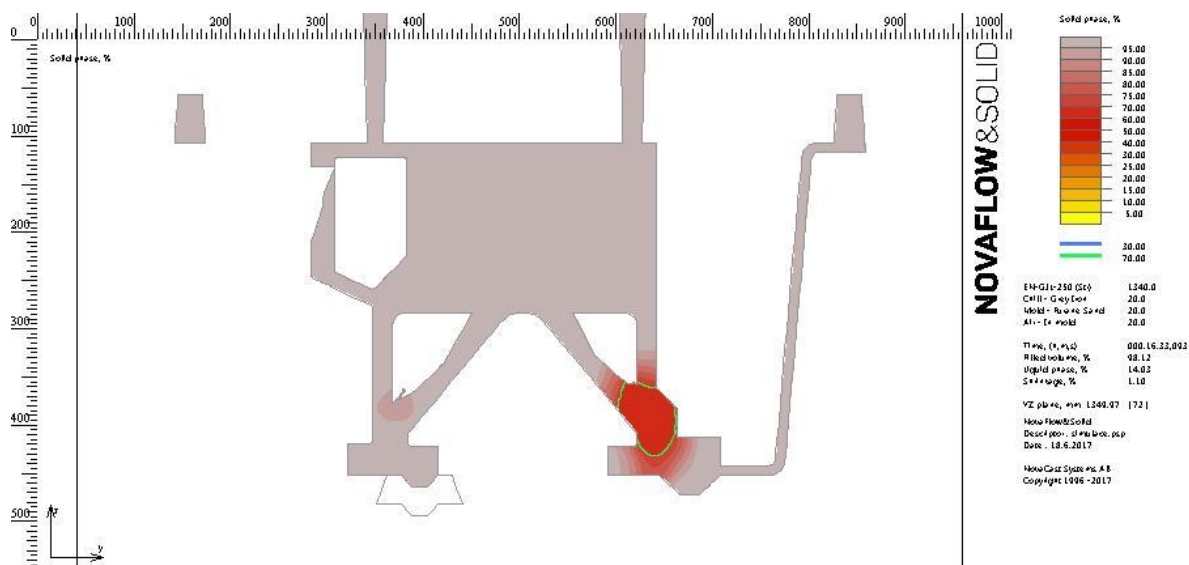
Obrázek 6.33 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 45 mm, likvid 41 %



Obrázek 6.34 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 45 mm, likvid 23 %



Obrázek 6.35 – tuhnutí odlitku, řez rovinou X s chladítky, likvid 23 %



Obrázek 6.36 – tuhnutí odlitku, řez rovinou X mimo chladítka, likvid 14%

Shrnutí výsledků simulace:

Na základě zobrazení výsledků tepelných uzlů v odlitku můžeme vidět, že tepelné uzly začínají v rovině řezu Z - 60 mm a vyskytují se pouze v okolí zářezů, kde nejsou umístěna chladítka. Oproti prvotní simulaci se povedlo v této výšce řezu tepelné uzly značně omezit, respektive posunout výše do odlitku. Ve vyšších částech odlitku už tyto tepelné uzly nejsou natolik kritické oproti vodícím plochám a jejich okolí.

Chladítka však přináší úskalí v podobě možnosti vzniku trhlin za tepla z důvodu tepelného šoku pro taveninu vstupující do odlitku. Kritická místa pro trhliny se nachází výsadně v okolí zářezů, kde nejsou umístěna chladítka. Nicméně dle barevného odstínu stupnice se jedná o přijatelné riziko.

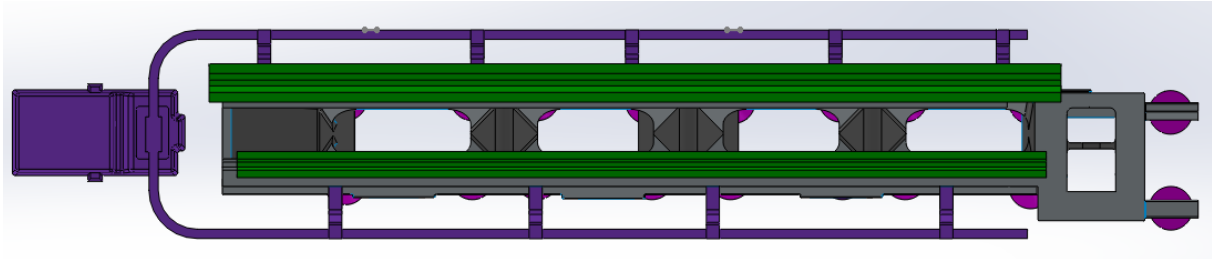
Zbytkové pnutí v okolí vodících ploch je minimální. Při pohledu na celý odlitek se zde potom vyskytují místa s větším pnutím, nicméně nezasahují do vodících ploch.

Tuhnutí odlitku probíhá usměrněně, směrem od chladítek dále do odlitku. Místa zářezů tuhne ve vodící ploše jako poslední (řez rovinou Z). V zobrazení tuhnutí řezem rovinou X (řez skrz chladítka) můžeme vidět posun posledního tuhnoucího místa směrem nahoru. Naopak kritickým místem stále zůstává zářez vedoucí do odlitku bez chladítka (obrázek 62), kde poslední tuhnutí probíhá velice blízko k vodícím plochám.

V další variantě proto zkusím umístit chladítka v celé délce vodících ploch, včetně zářezů.

6.3 SIMULACE Č.: 3

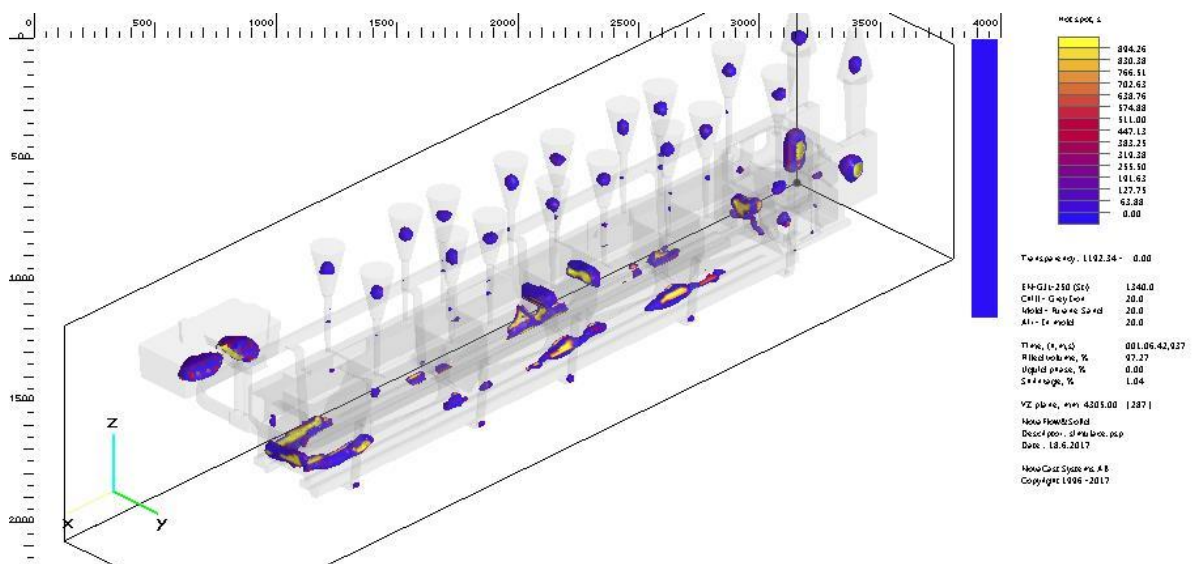
V této simulační variantě jsou umístěna chladítka v celé délce vodících ploch z důvodu posunutí tepelných uzlů u zářezů výše do odlitku. Předpokládám však, že zde bude větší riziko trhlin za tepla, případně zbytkového pnutí oproti variantě č.: 2.



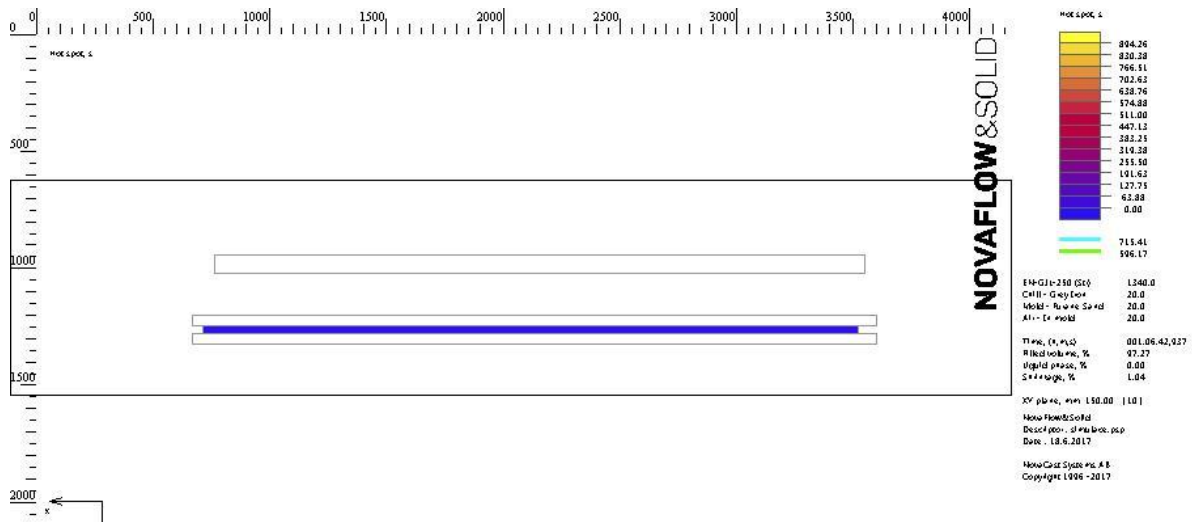
Obrázek 6.37 – vstupní model pro simulaci, zobrazení chladítek na vodících plochách

Tabulka 10: Technologické parametry procesu

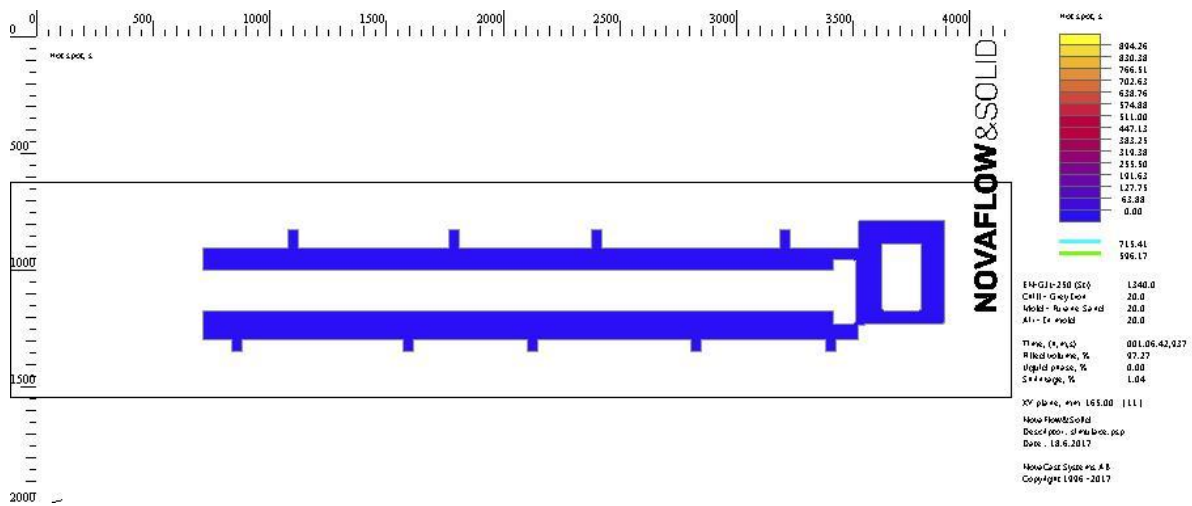
Licí teplota	1340 °C
Okolní teplota	20 °C
Doba lití	40 s
Chladítka	Ano, litinová, 20 °C, v celé délce
Jádra	Ano, furanová směs



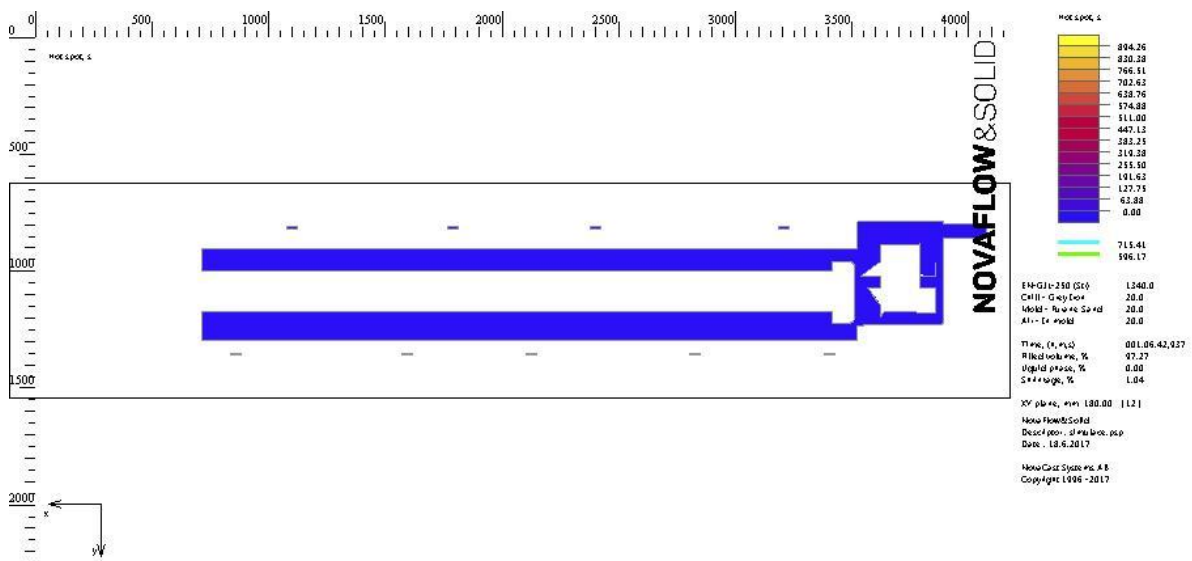
Obrázek 6.38 – tepelné uzly, transparentní model



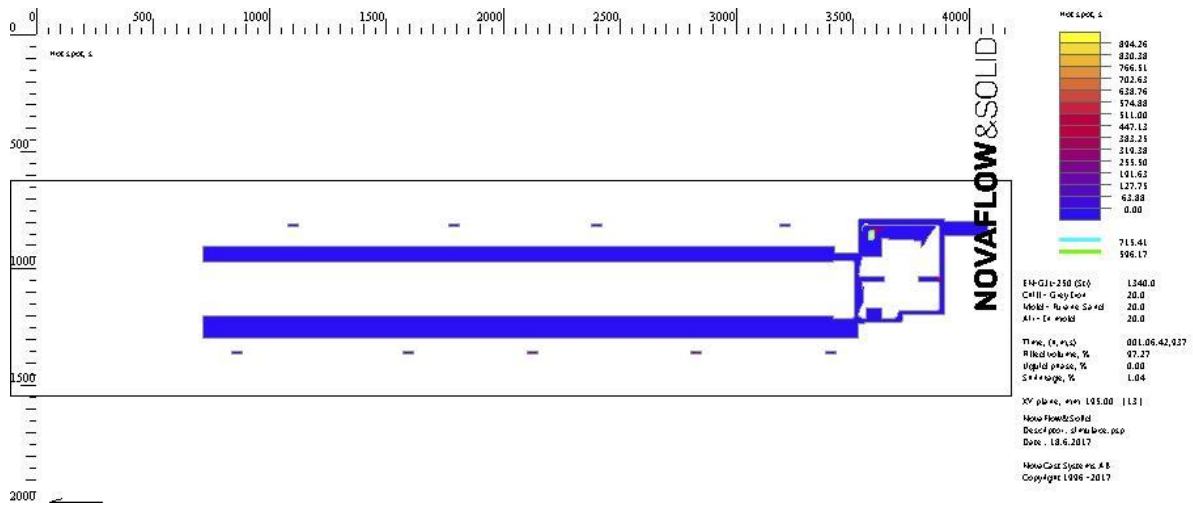
Obrázek 6.39 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 15 mm



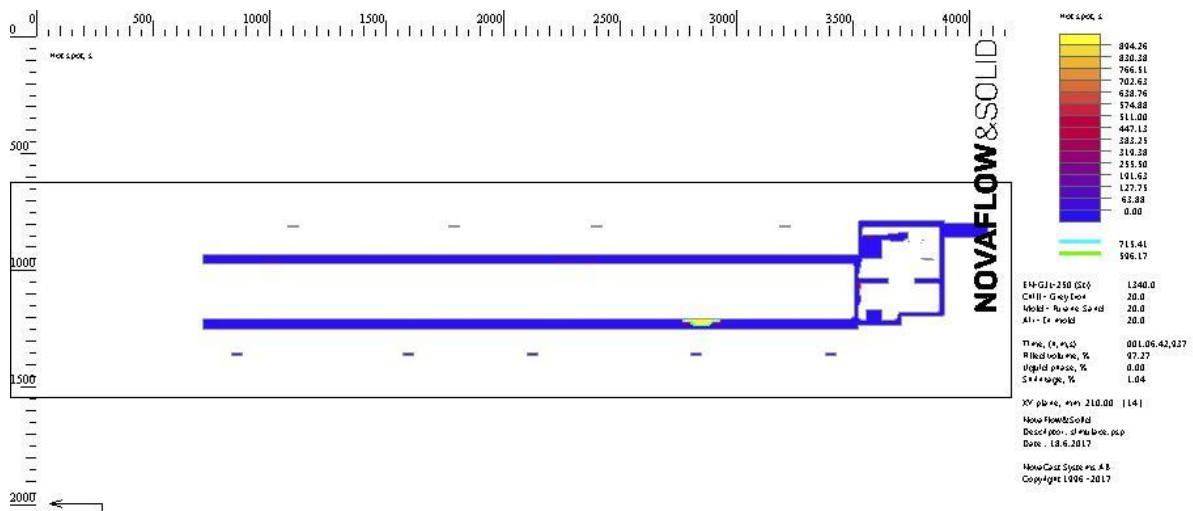
Obrázek 6.40 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 30 mm



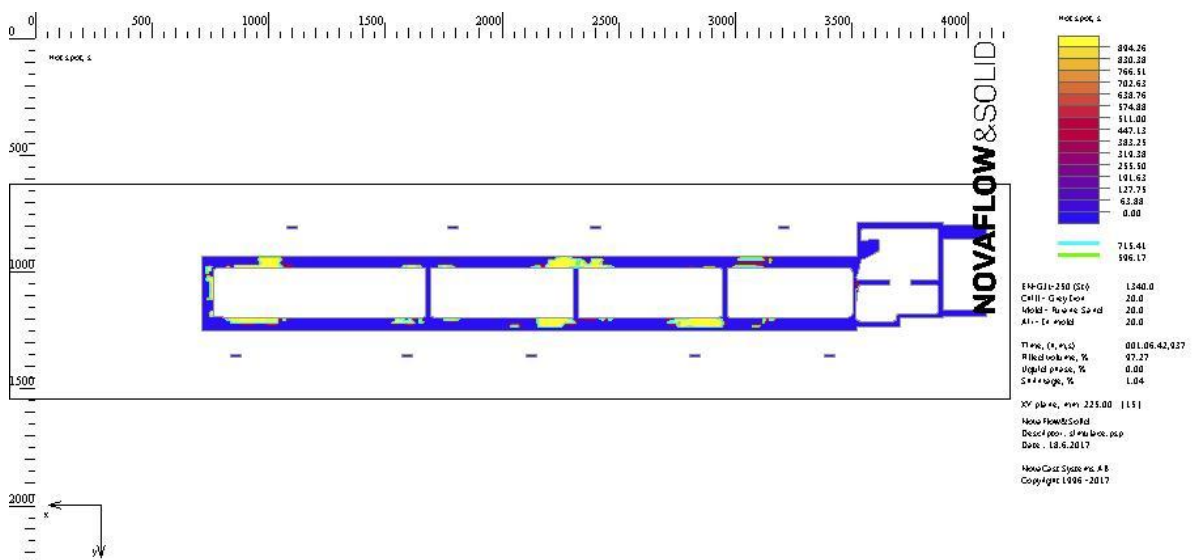
Obrázek 6.41 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 45 mm



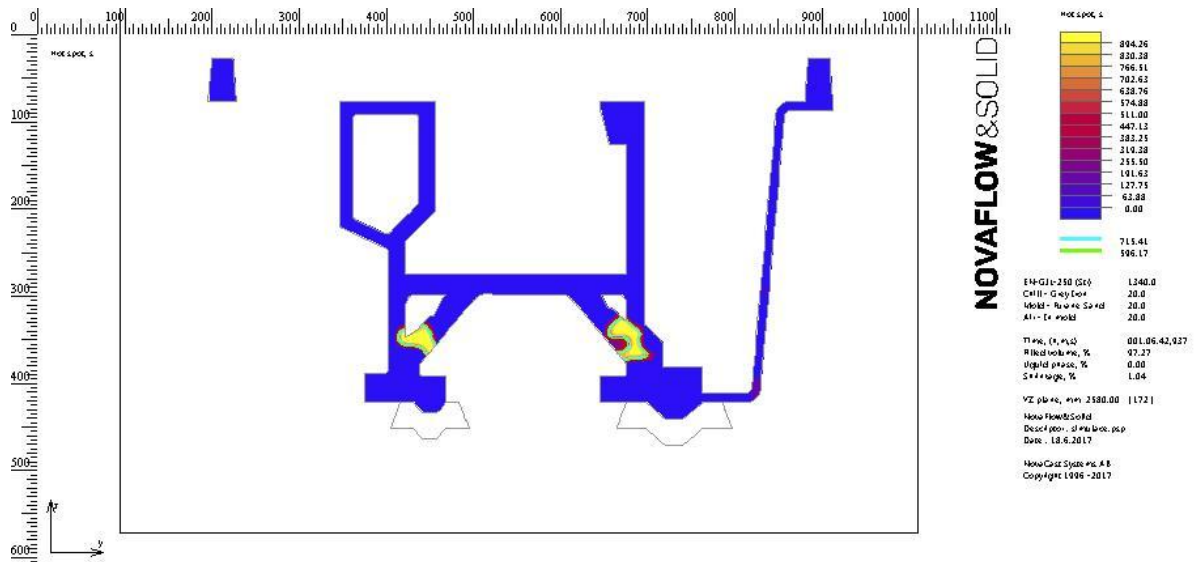
Obrázek 6.42 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 60 mm



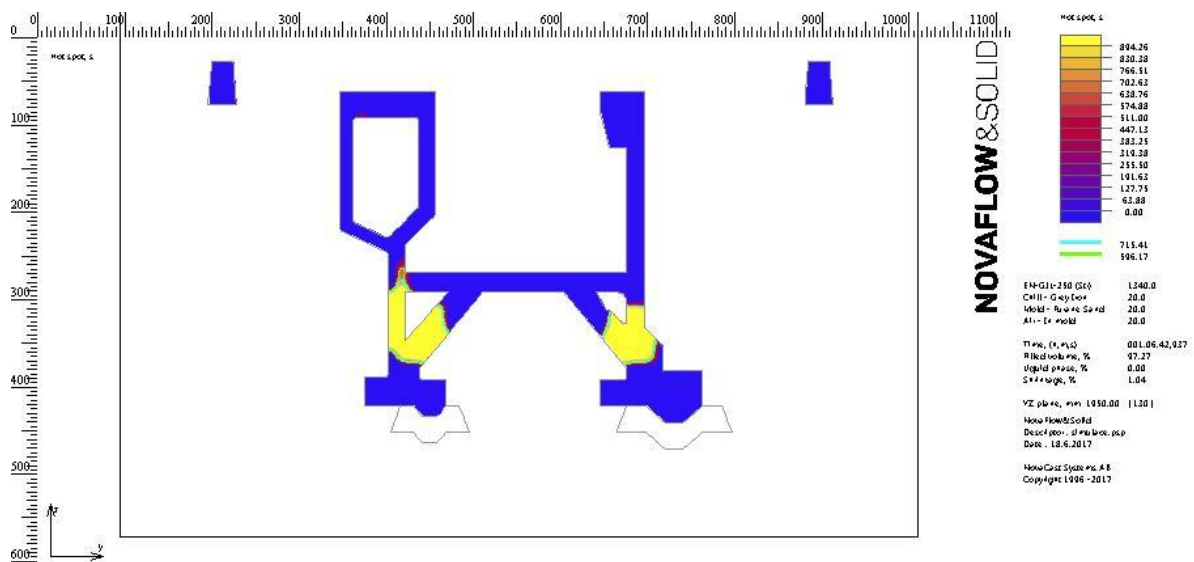
Obrázek 6.43 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 75 mm



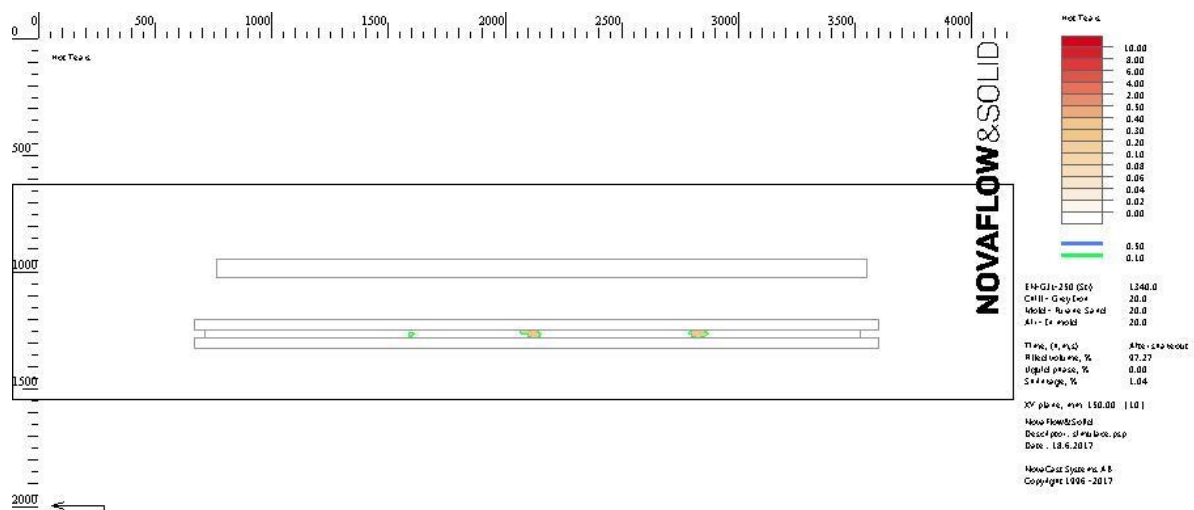
Obrázek 6.44 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 90 mm



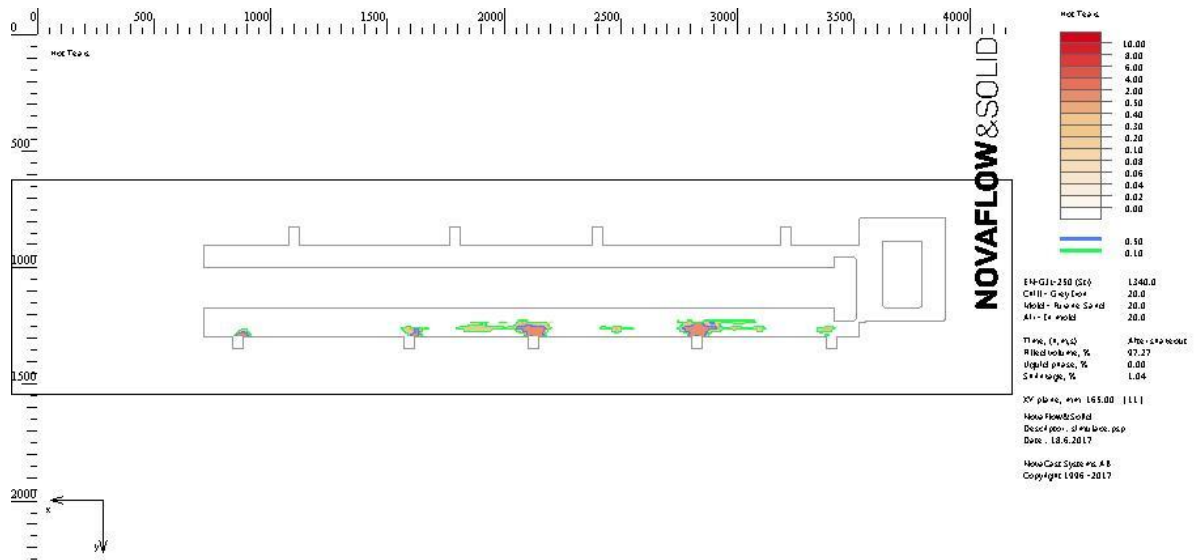
Obrázek 6.45 – tepelné uzly, řez rovinou X skrz zářez



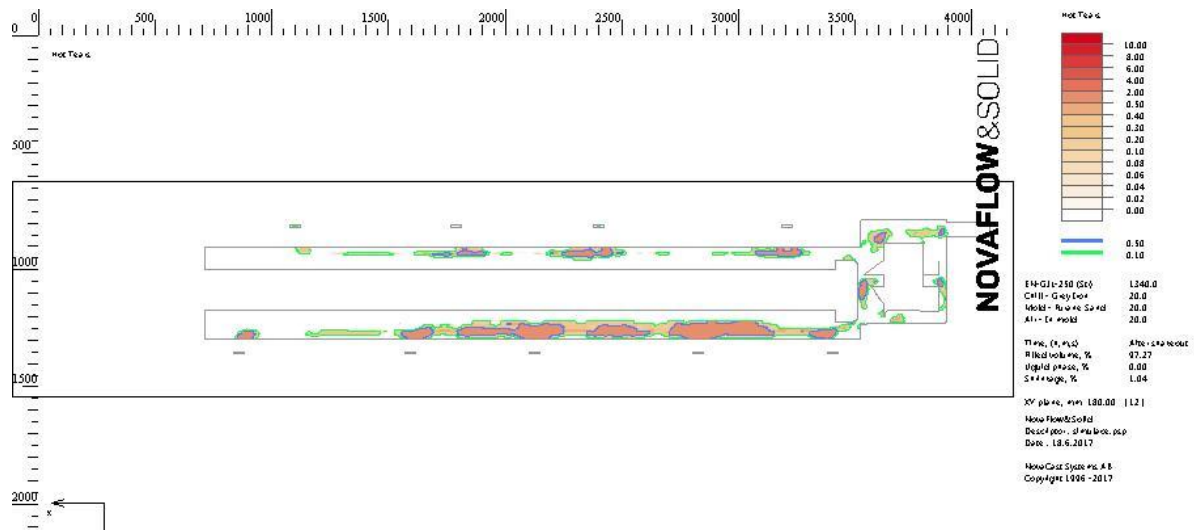
Obrázek 6.46 – tepelné uzly, řez rovinou X, nejkritičtější místo



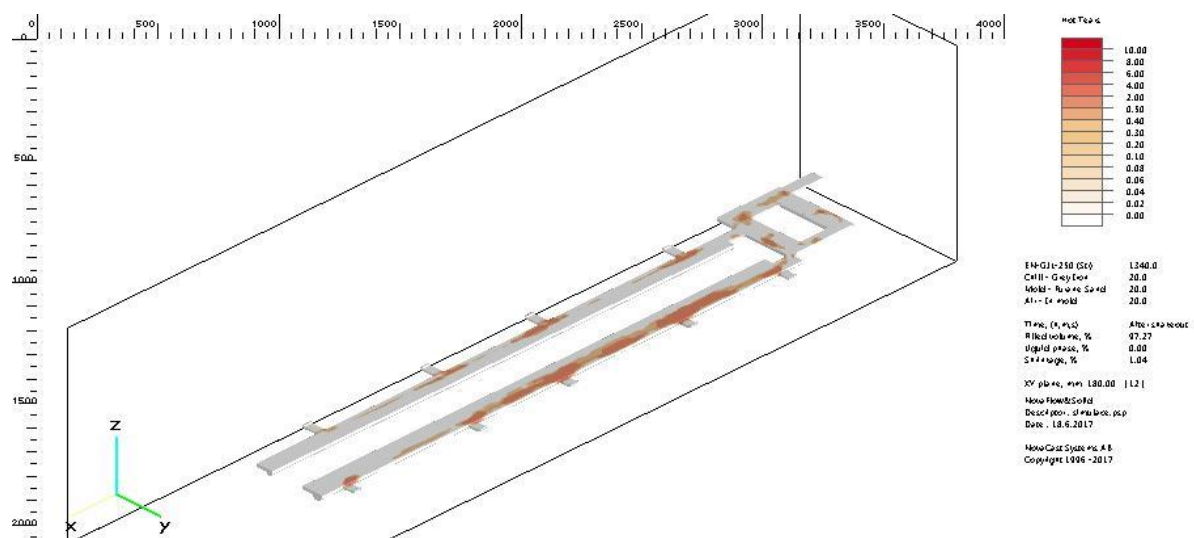
Obrázek 6.47 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 15 mm



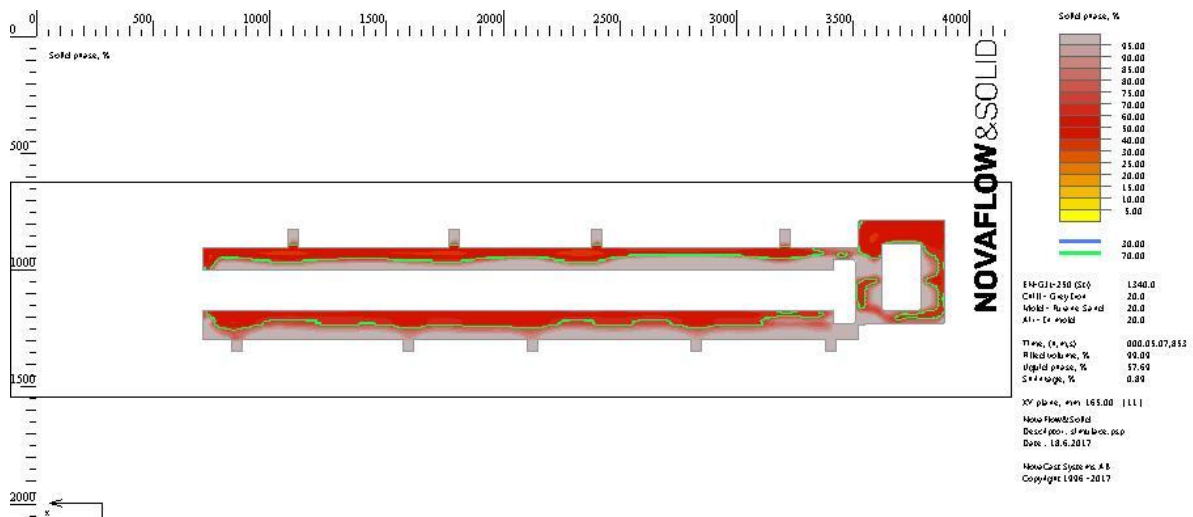
Obrázek 6.48 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 30 mm



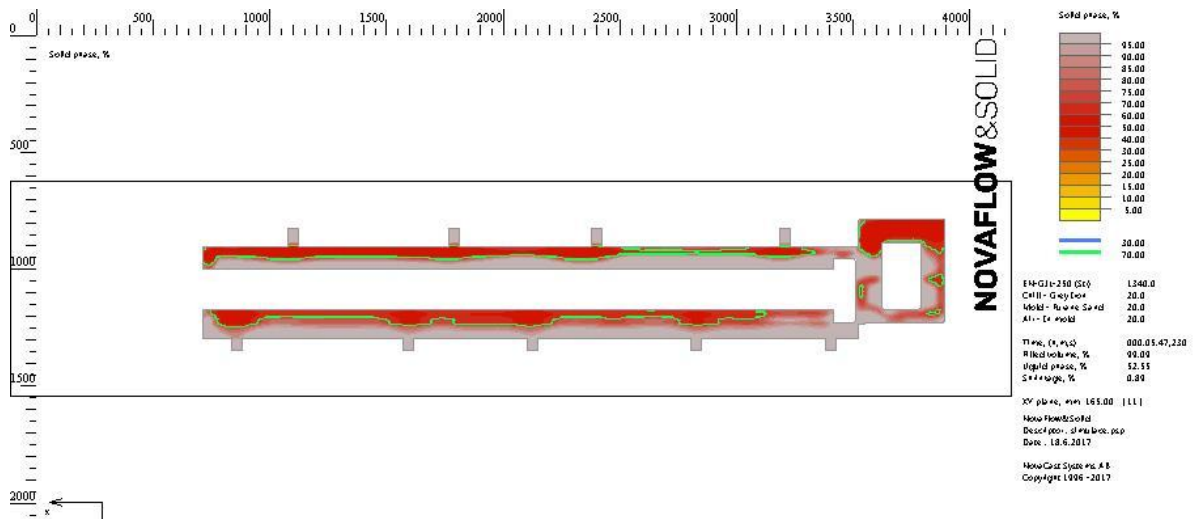
Obrázek 6.49 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 45 mm



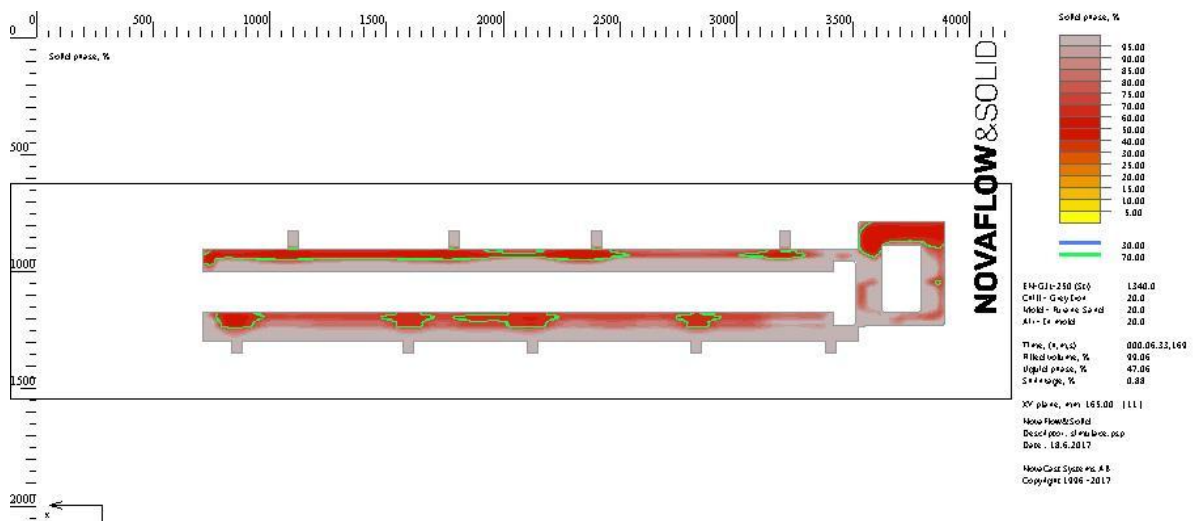
Obrázek 6.50 – izometrické zobrazení obrázku 6.49



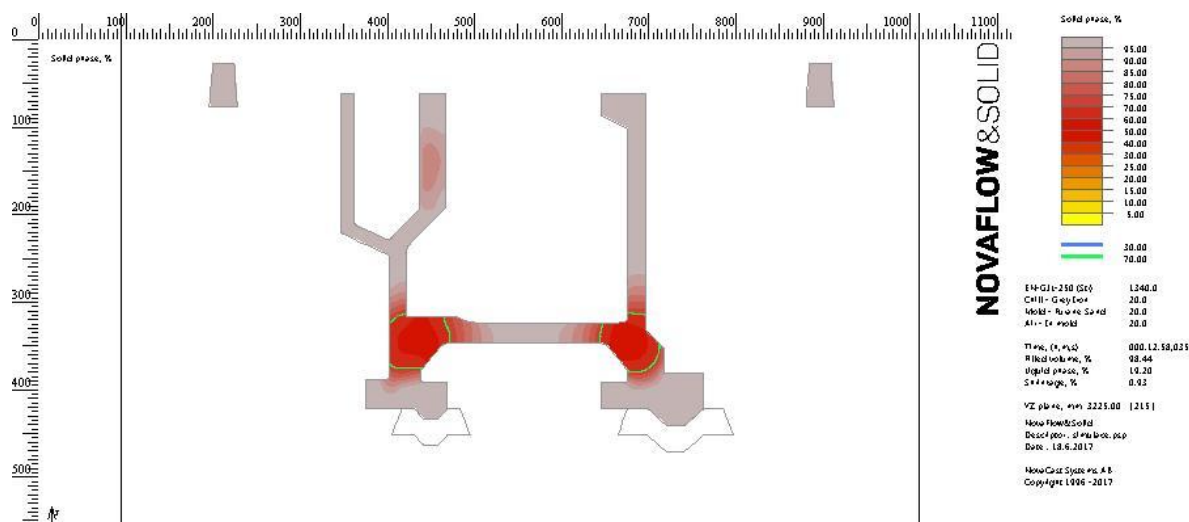
Obrázek 6.51 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 57 %



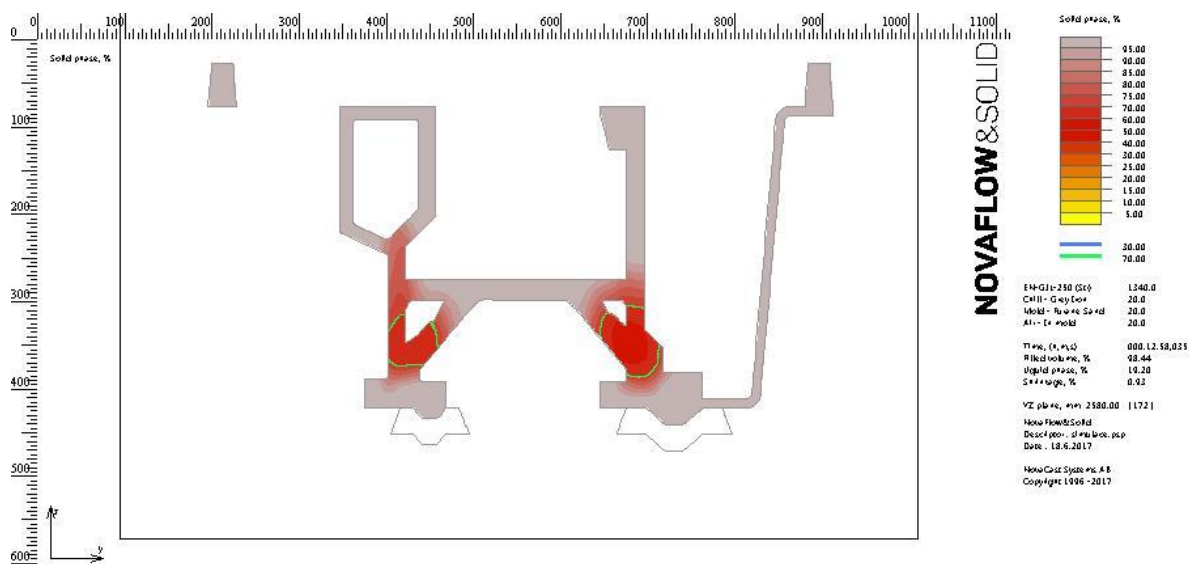
Obrázek 6.52 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 53 %



Obrázek 6.53 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 47 %



Obrázek 6.54 – tuhnutí odlitku, řez rovinou X bez zářezů, likvid 19 %



Obrázek 6.55 – tuhnutí odlitku, řez rovinou X skrz zářez, likvid 19 %

Shrnutí výsledků simulace:

V této simulační variantě byla chladítka umístěna v celé délce vodících ploch odlitku. Jak můžeme vidět z výsledků tepelných uzlů, jejich výskyt začíná až ve výšce 75 mm od spodní plochy odlitku. V řezu rovinou X můžeme vidět výrazný posun uzlů směrem do odlitku a to i v nejkritičtějších místech odlitku. To je zatím nejlepší výsledek v oblasti tepelných uzlů.

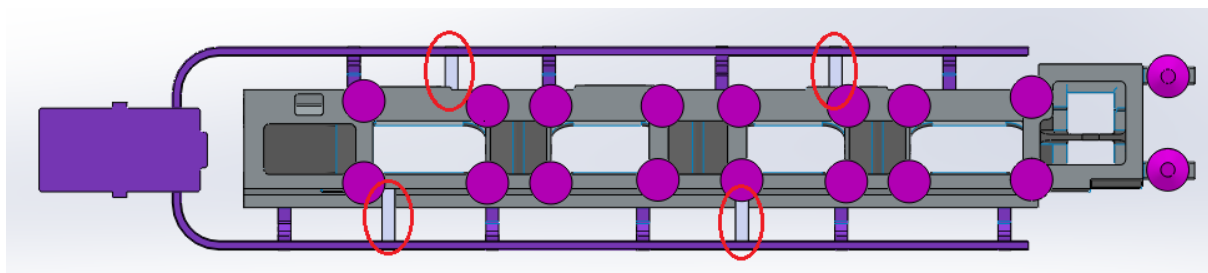
Riziko trhlin za tepla se mírně objevuje v podpovrchové části vodících ploch. Toto riziko lehce vzrůstá směrem dále do odlitku, nicméně nejedná se o kritické nebezpečí. Trhliny za tepla jsou opět dány umístěním chladítek, avšak v této variantě je riziko přijatelnější než v předchozí variantě. To je dáno rovnoměrným ochlazováním taveniny v celé délce vodících ploch.

Tuhnutí odlitku opět probíhá usměrněně směrem nahoru od vodících ploch. Vodící plochy tuhnou v celé délce rovnoměrně a stejně rychle, nedochází k uzavírání taveniny mimo chladítka jako v předchozí variantě. To má příznivý vliv právě na výsledné riziko trhlin za tepla.

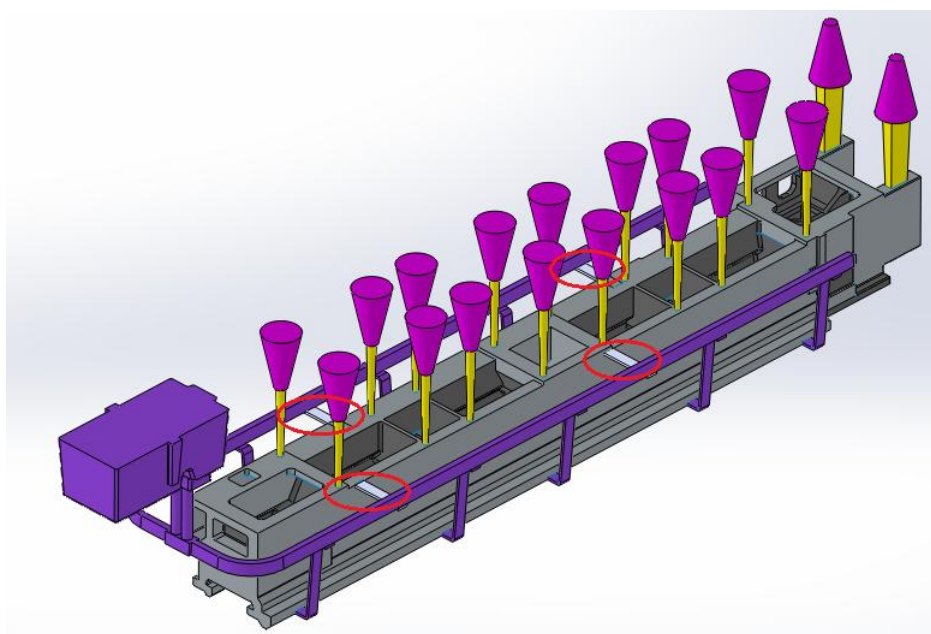
Tento způsob umístění chladítek se jeví jako technologicky nejpříznivější.

6.4 SIMULACE Č.: 4

V této simulační variantě byly přidány pomocné zářezy umístěné do horní části odlitku. Důvod tohoto umístění je plynulejší a rovnoměrnější plnění odlitku, s ohledem na následné umístění chladítek v další variantě (dosazování dostatečně teplé taveniny). V této variantě se uvažují pouze přidané zářezy, bez chladítek. Pomocné vtoky jsou umístěny po dvou na každé straně, doprostřed mezi jednotlivé stávající zářezy. Tyto vtoky jsou červeně znázorněny na obrázku 6.56 a 6.57.



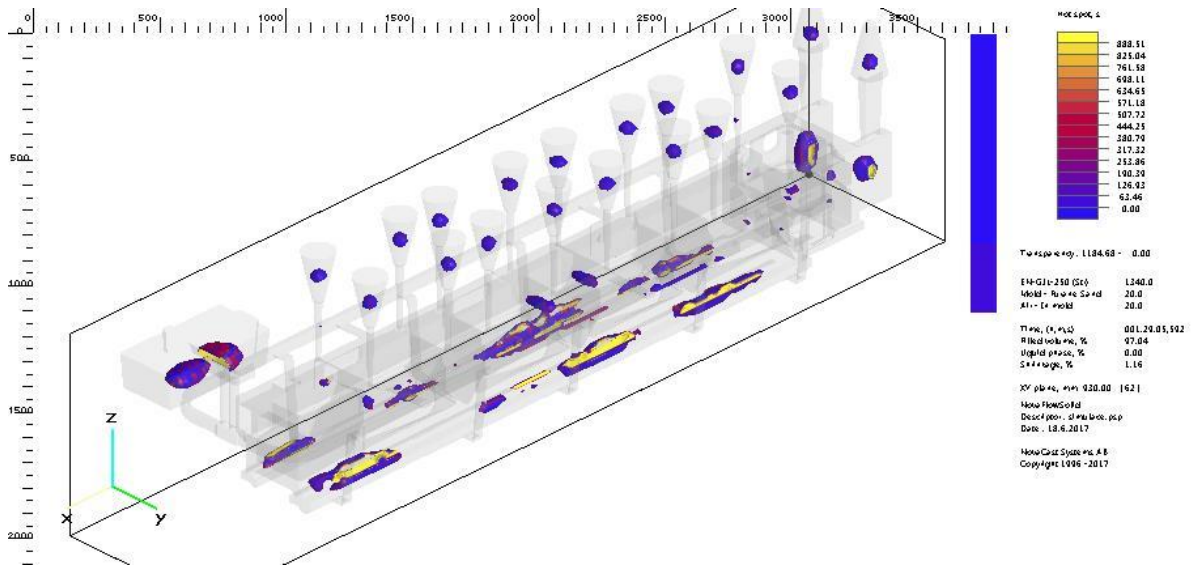
Obrázek 6.56 – vstupní model pro simulaci, pomocné horní vtoky, pohled shora



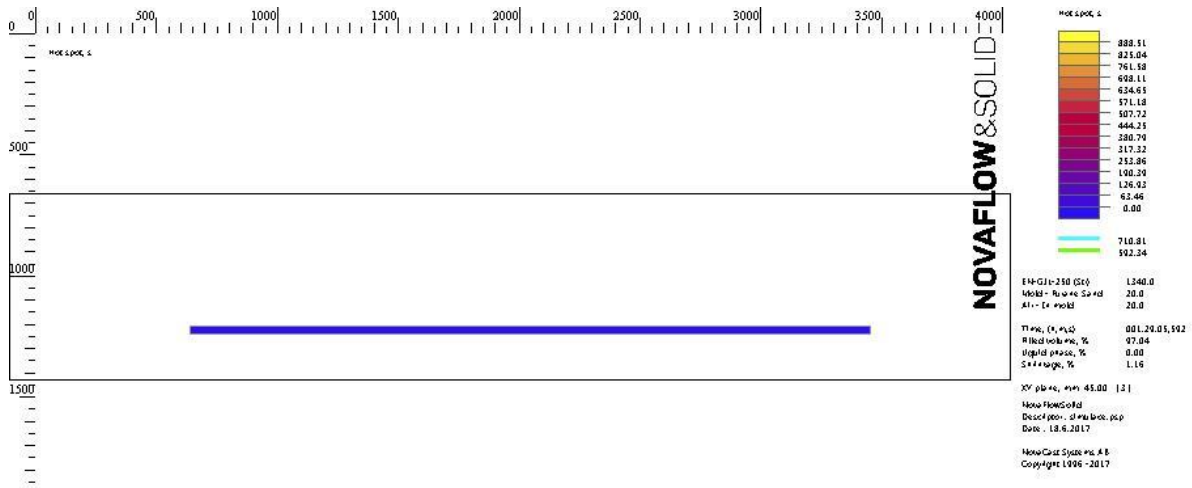
Obrázek 6.57 – vstupní model pro simulaci, pomocné horní vtoky, izometrický pohled

Tabulka 11: Technologické parametry procesu

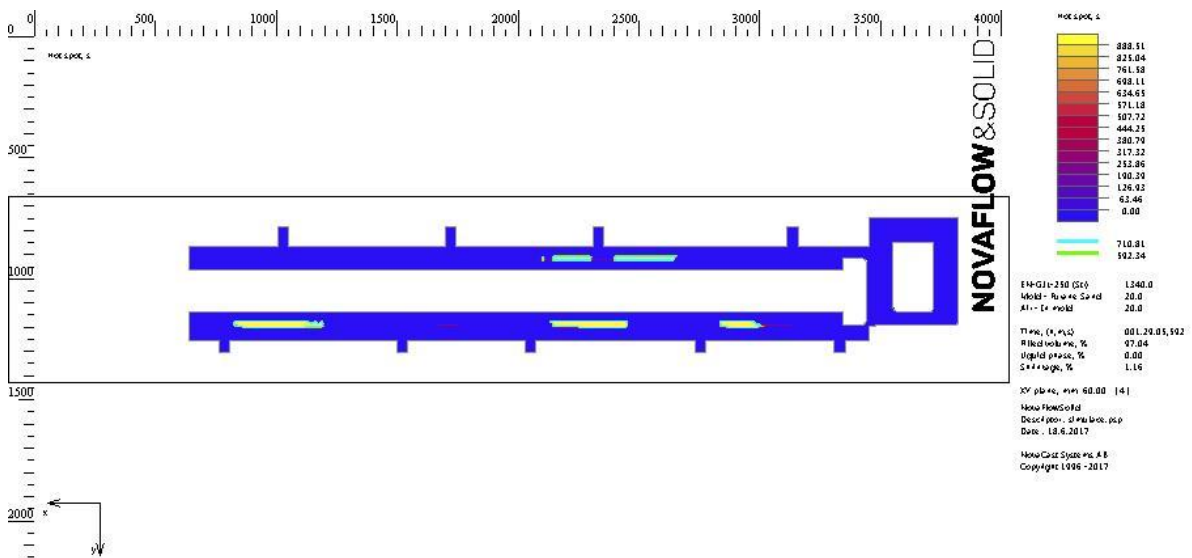
Licí teplota	1340 °C
Okolní teplota	20 °C
Doba lití	40 s
Chladítka	Ne
Jádra	Ano, furanová směs



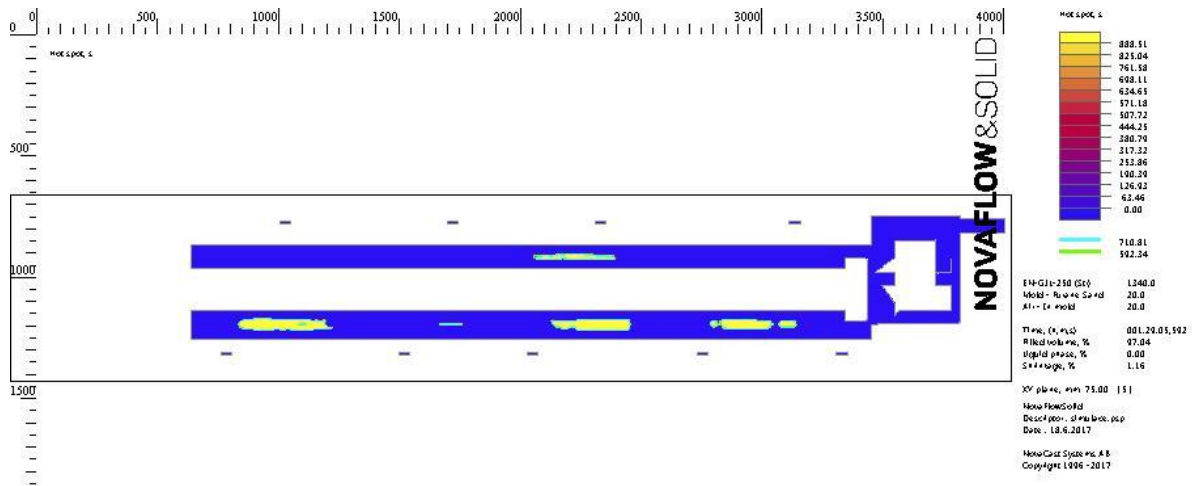
Obrázek 6.58 – tepelné uzly, transparentní model



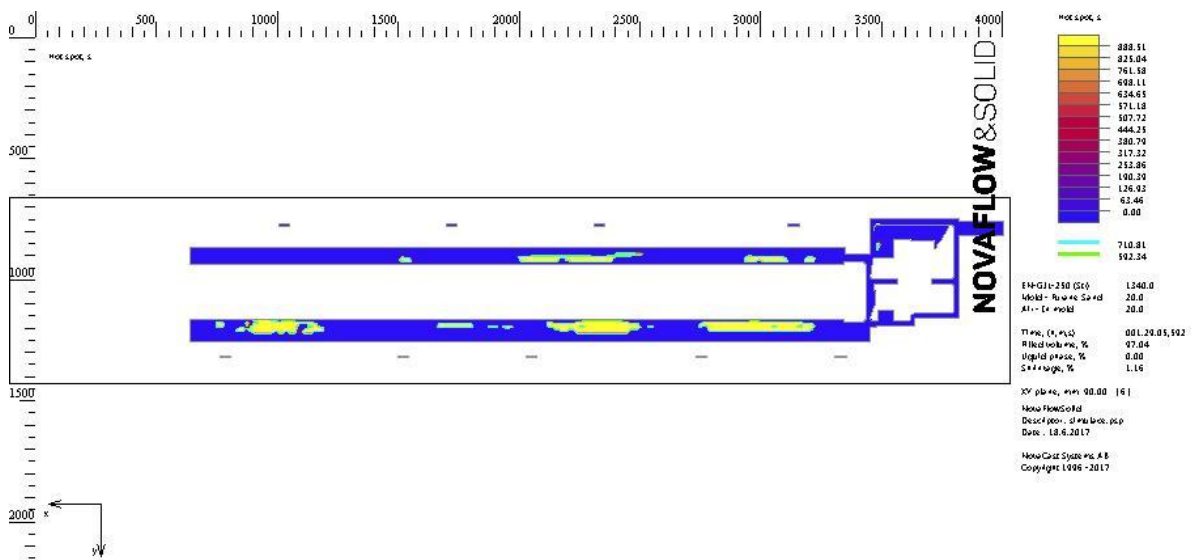
Obrázek 6.59 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 15 mm



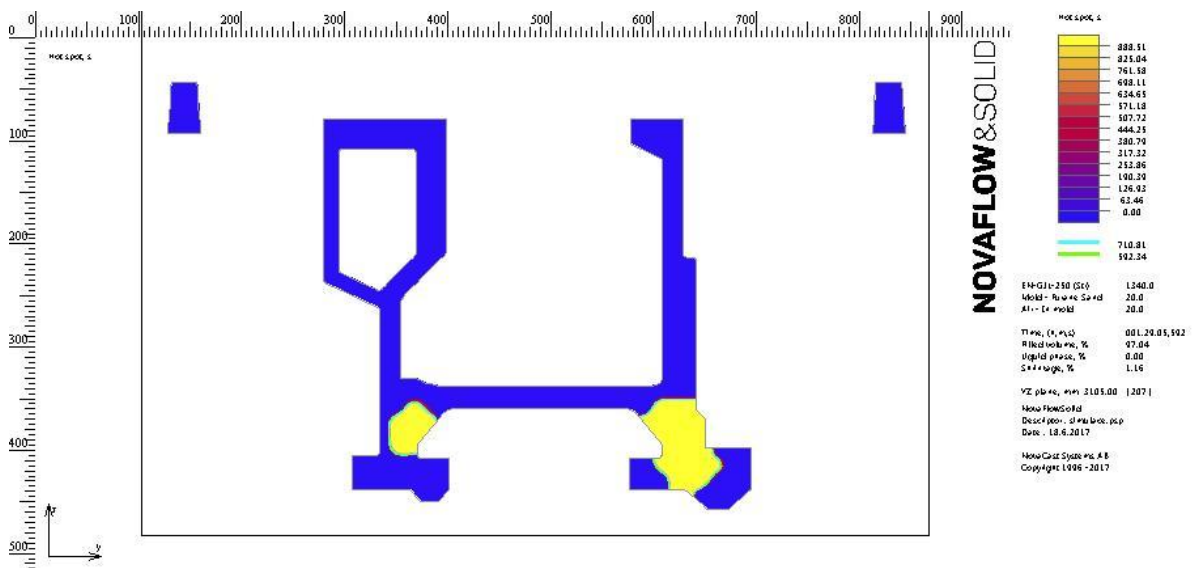
Obrázek 6.60 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 30 mm



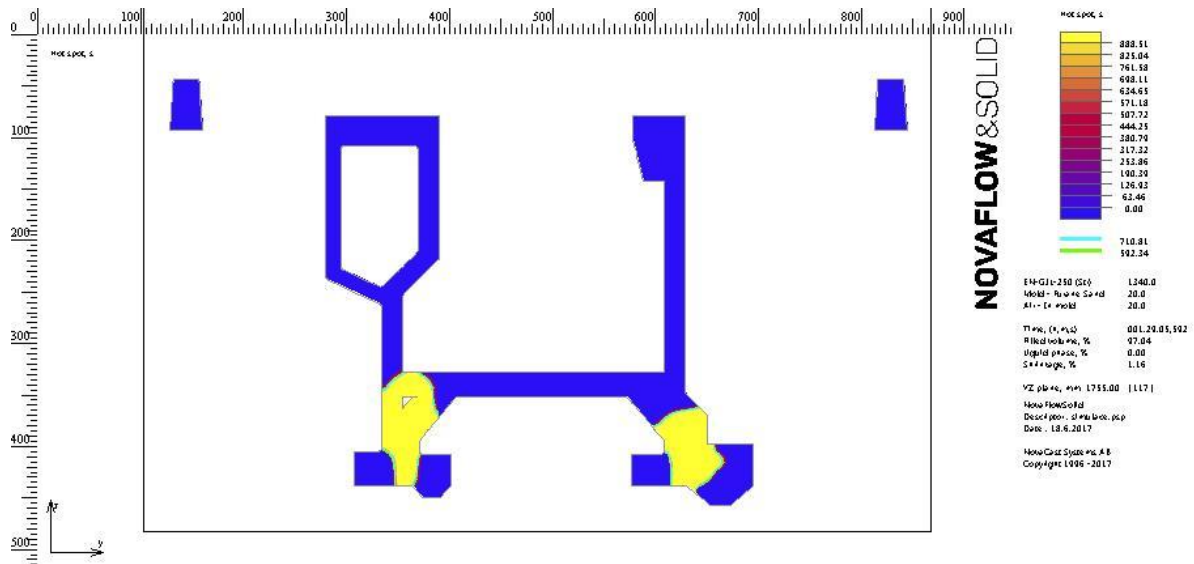
Obrázek 6.61 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 45 mm



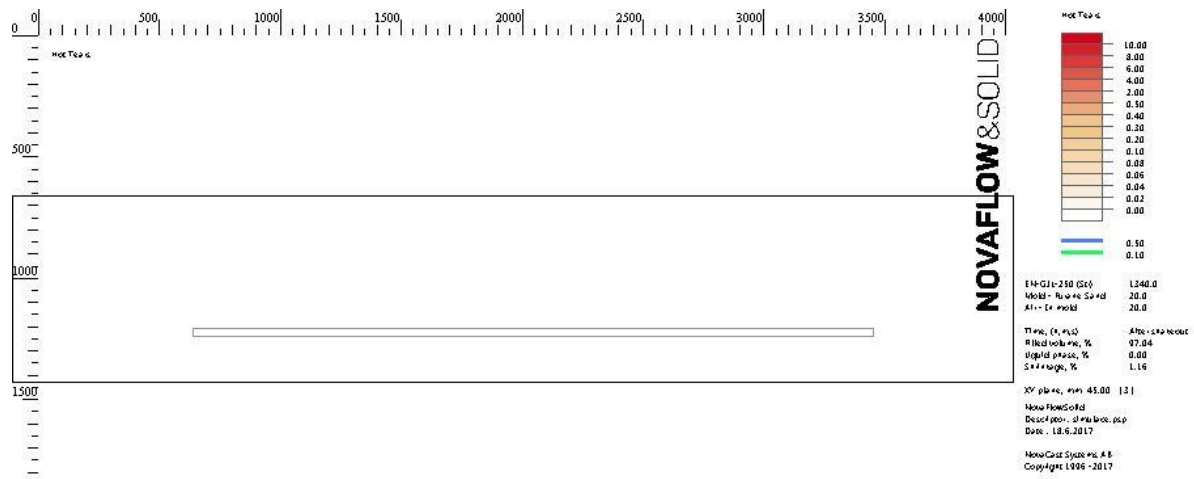
Obrázek 6.62 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 60 mm



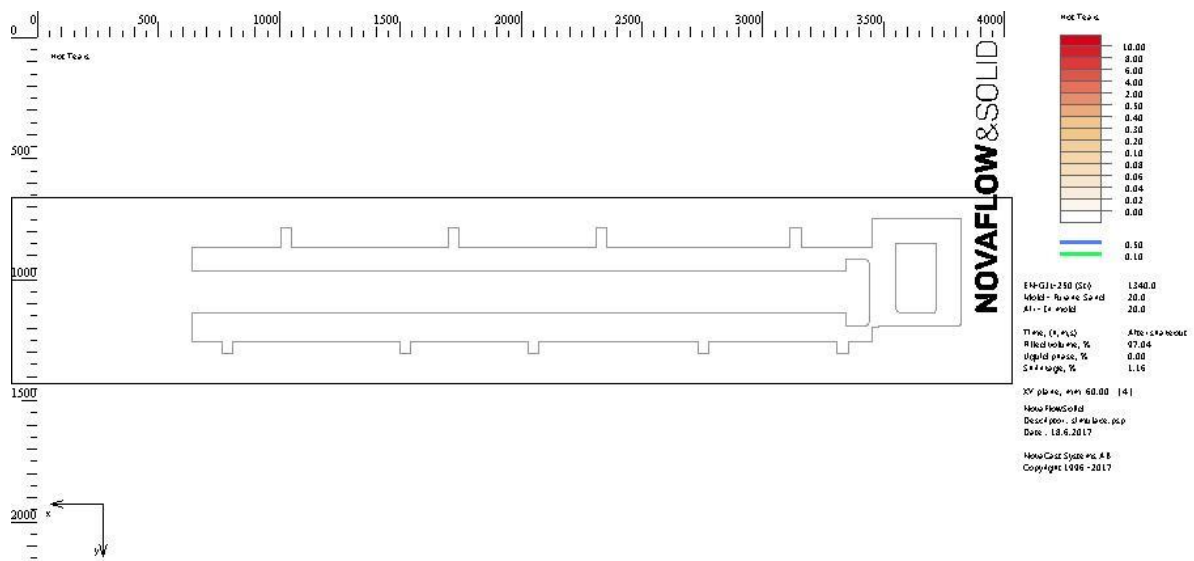
Obrázek 6.63 – tepelné uzly, řez rovinou X, kritické místo 1



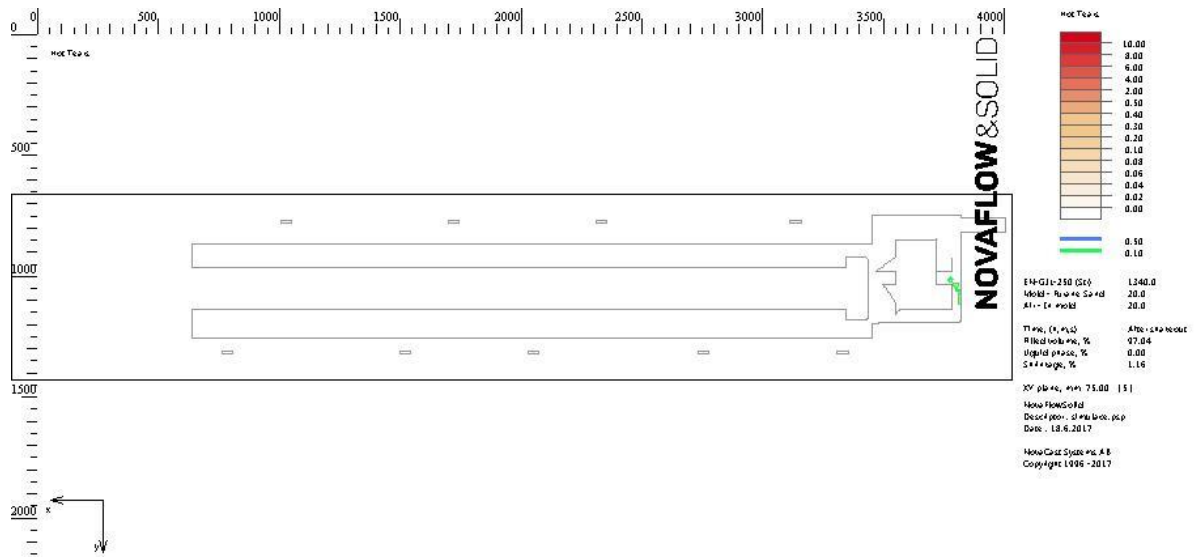
Obrázek 6.64 – tepelné uzly, řez rovinou X, kritické místo 2



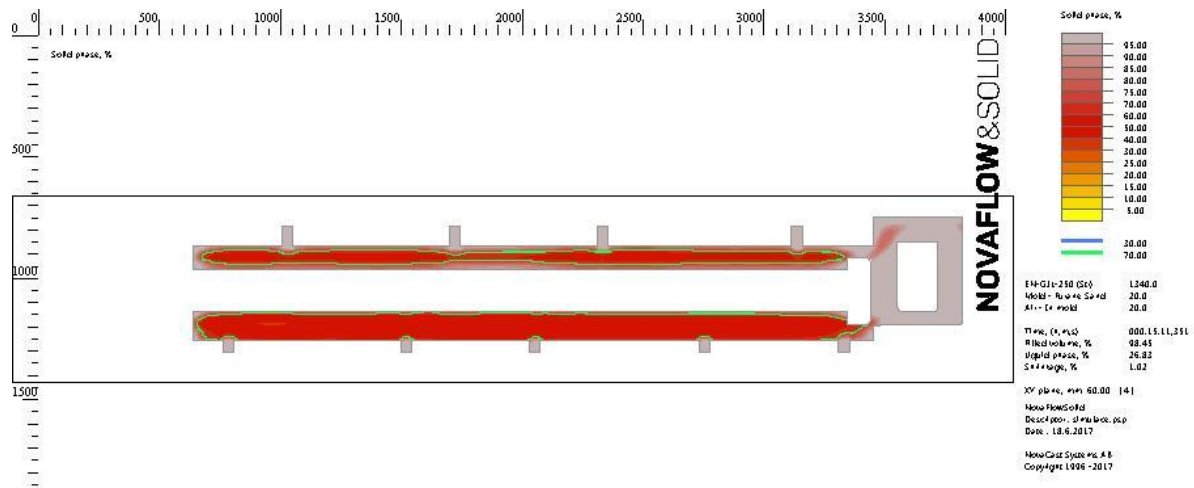
Obrázek 6.65 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 15 mm



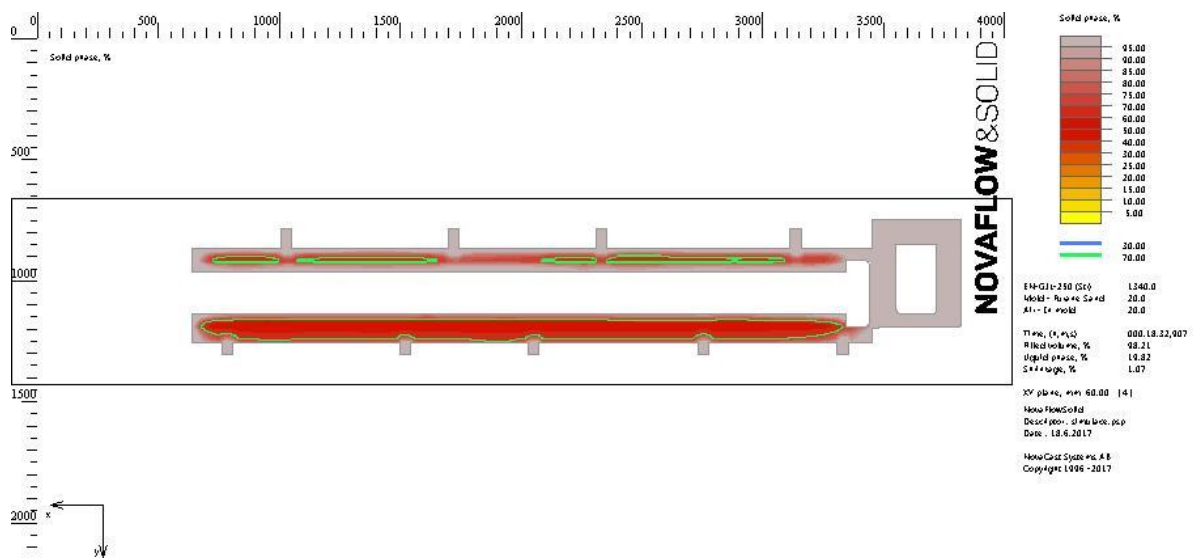
Obrázek 6.66 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 30 mm



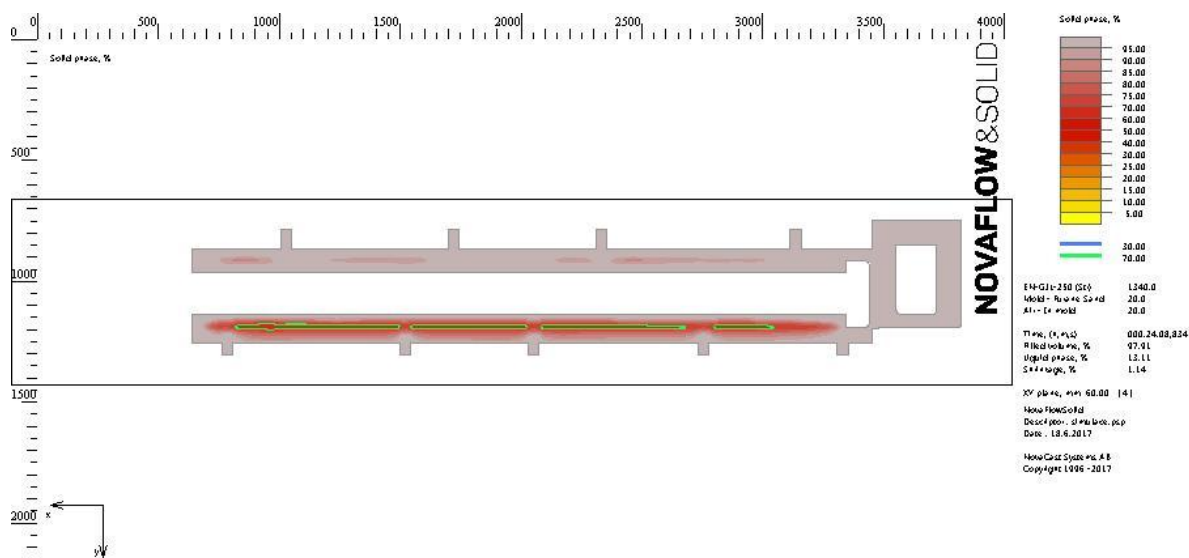
Obrázek 6.67 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 45 mm



Obrázek 6.68 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 27 %



Obrázek 6.69 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 19 %



Obrázek 6.70 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 13 %

Shrnutí výsledků simulace:

Z výsledků simulace můžeme vidět tvorbu tepelných uzlů výrazně níže než v předchozích variantách. V této variantě se tepelné uzly vyskytují v řezu už pouhých 30 mm od spodní plochy odlitku. V řezu rovinou X tepelné uzly zasahují výrazně do vodících ploch odlitku.

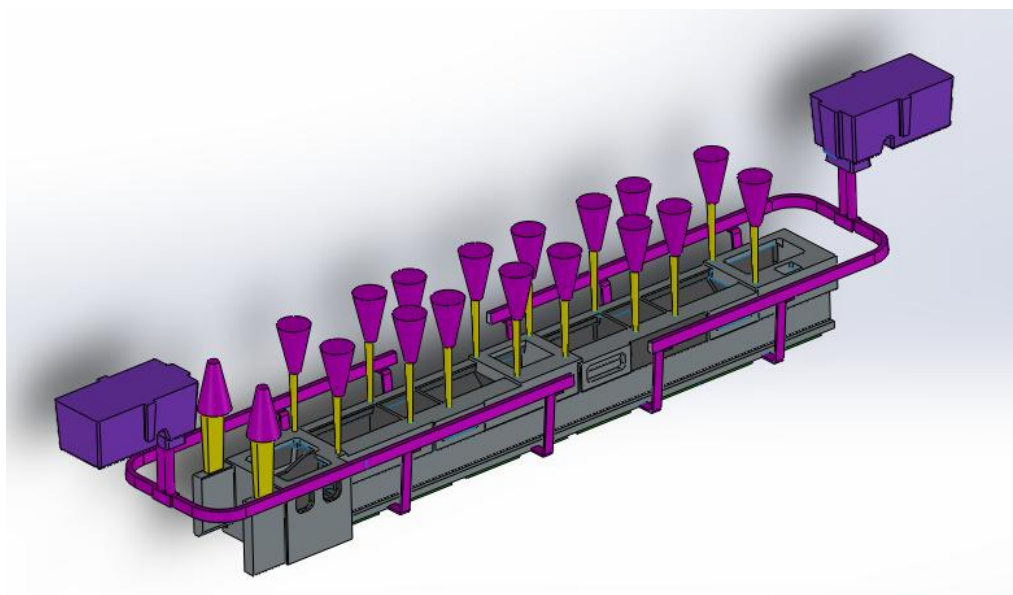
Absence chladítek má však příznivý vliv na výsledné trhliny. Trhliny za tepla v této technologické variantě vůbec nehrozí.

Tuhnutí probíhá usměrněně od spodních ploch, nicméně zde dochází k opačnému jevu tuhnutí. Okolí spodních zářezů tuhne jako první a tavenina je postupně uzavírána od zářezů směrem do středu. To je dáno umístěním pomocných horních zářezů.

Ačkoliv se tato varianta jeví jako nepříznivá, pro další simulace ponechám stávající pomocné horní zářezy a na vodící plochy budou umístěna chladítka. Jedna simulace bude s chladítky s rozestupy jako varianta č.: 2, druhá simulace bude s chladítky v celé délce vodících ploch.

6.5 SIMULACE Č.: 5

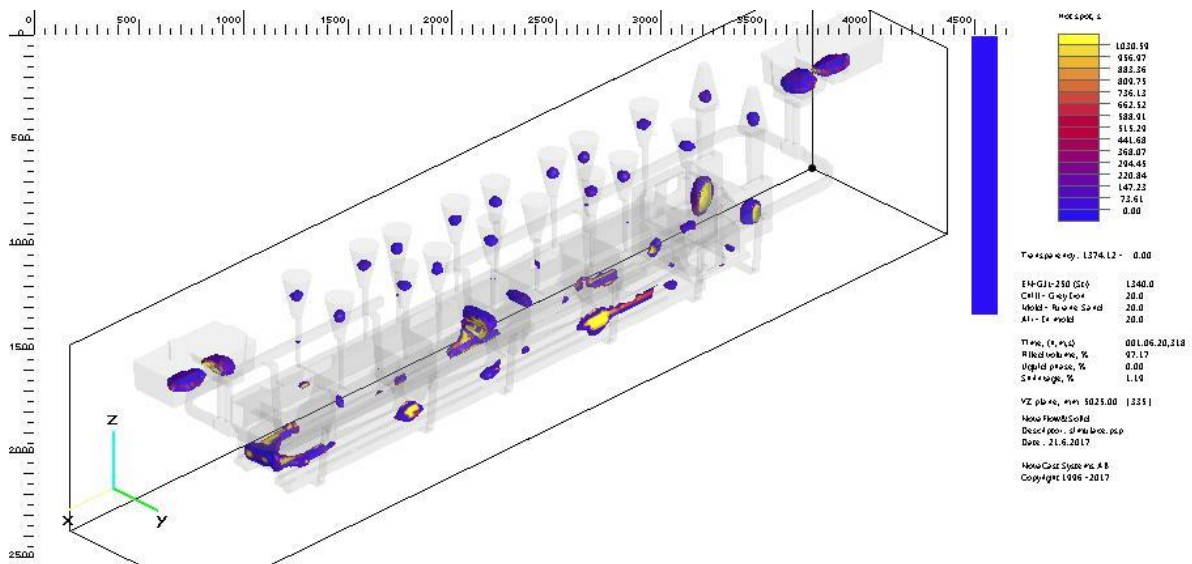
V této simulační variantě jsou uvažovány dva separátní vtoky z každé strany. Struskovák je rozdělen na dvě části pro každý vtok. Pro vtoky se uvažuje plnění ze dvou samostatných pánví. Chladítka jsou umístěna na vodících plochách s rozestupy mezi zářezy vstupujících do odlitku. Nicméně tato varianta je pouze informativní a to z toho důvodu, že slévárna není tuto variantu schopna provést z důvodu nedostatečného místa pro dvě kočky jeřábu. Slévárna je limitována jednak prostorem (odlitek není dostatečně dlouhý) a jednak kapacitou taveniny. Slévárna by musela natavit obrovské množství kovu pro rozdělení do dvou pánví a mít dostatek zaformovaných odlitků pro spotřebu taveniny.



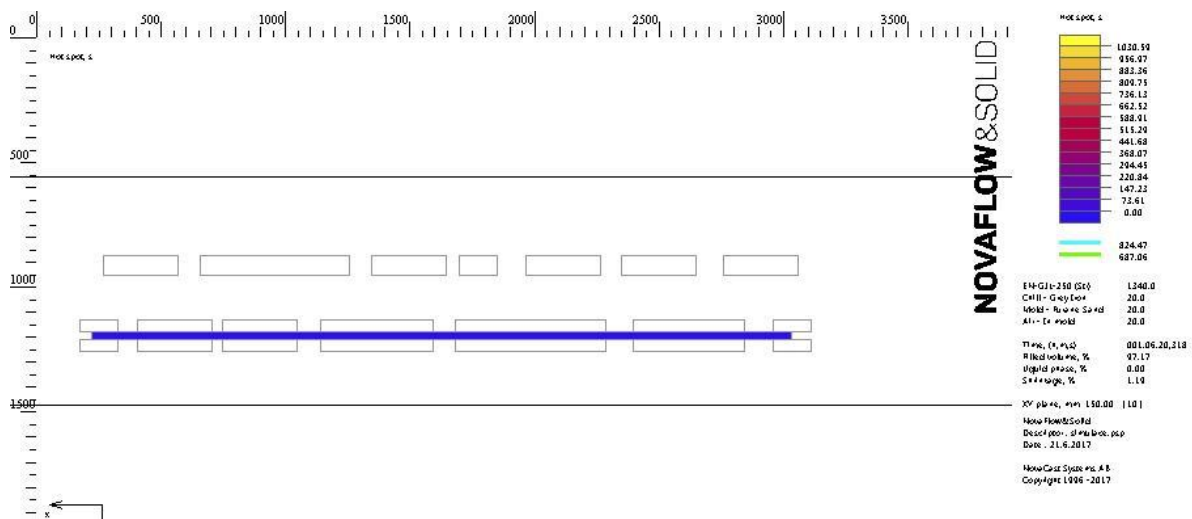
Obrázek 6.71 – vstupní model pro simulaci, dva vtoky, izometrický pohled

Tabulka 12: Technologické parametry procesu

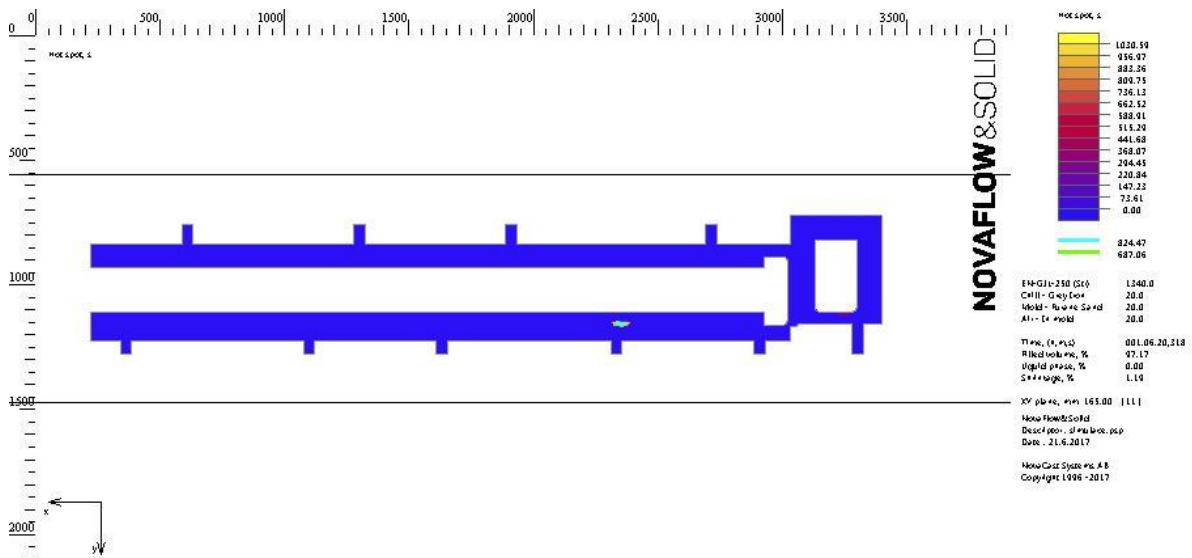
Licí teplota	1340 °C
Okolní teplota	20 °C
Doba lití	40 s
Chladítka	Ano, litinová, 20 °C
Jádra	Ano, furanová směs



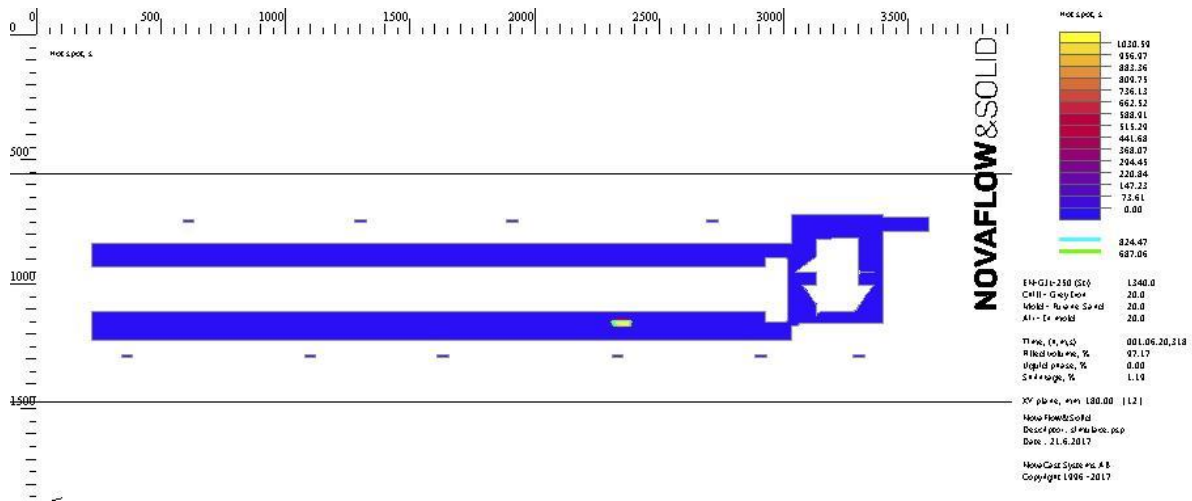
Obrázek 6.72 – tepelné uzly, transparentní model



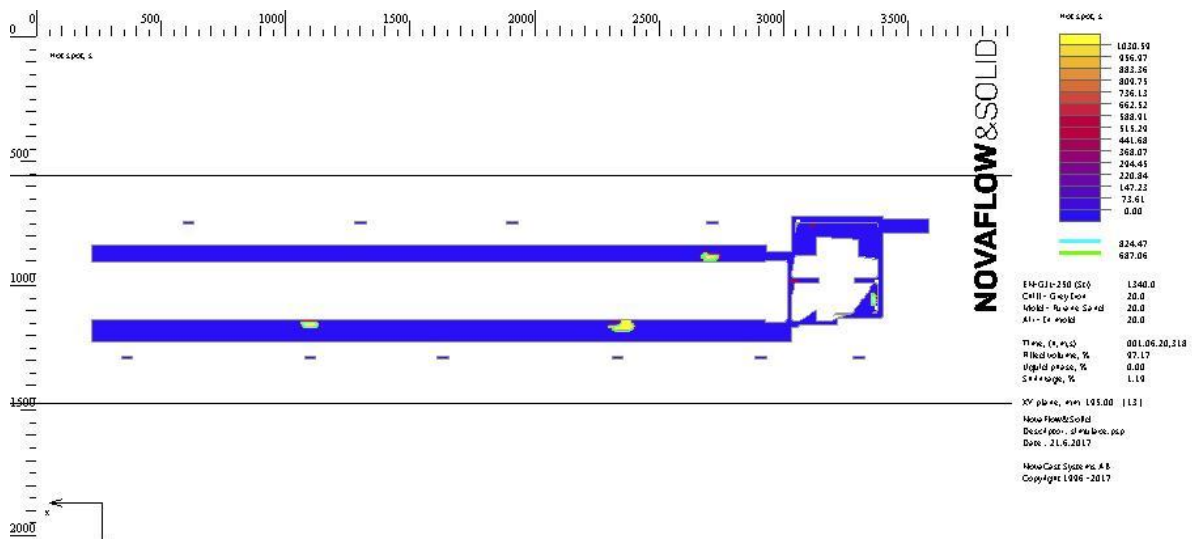
Obrázek 6.73 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 15 mm



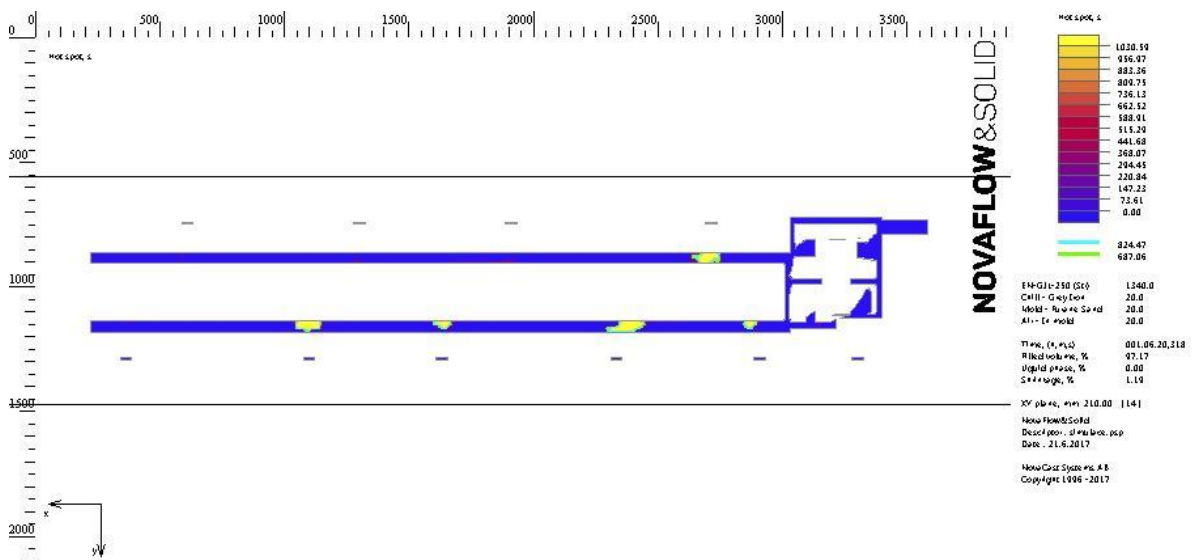
Obrázek 6.74 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 30 mm



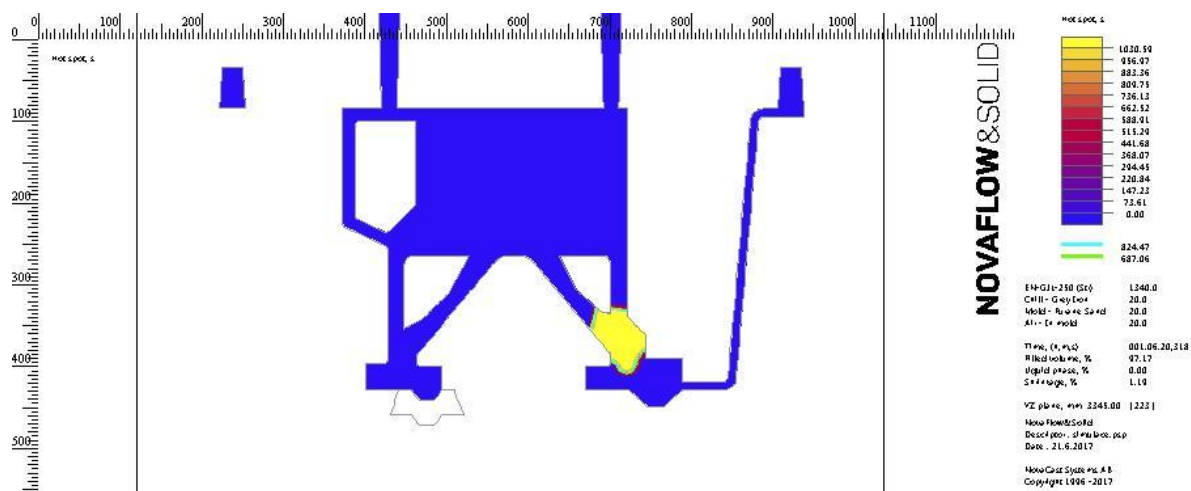
Obrázek 6.75 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 45 mm



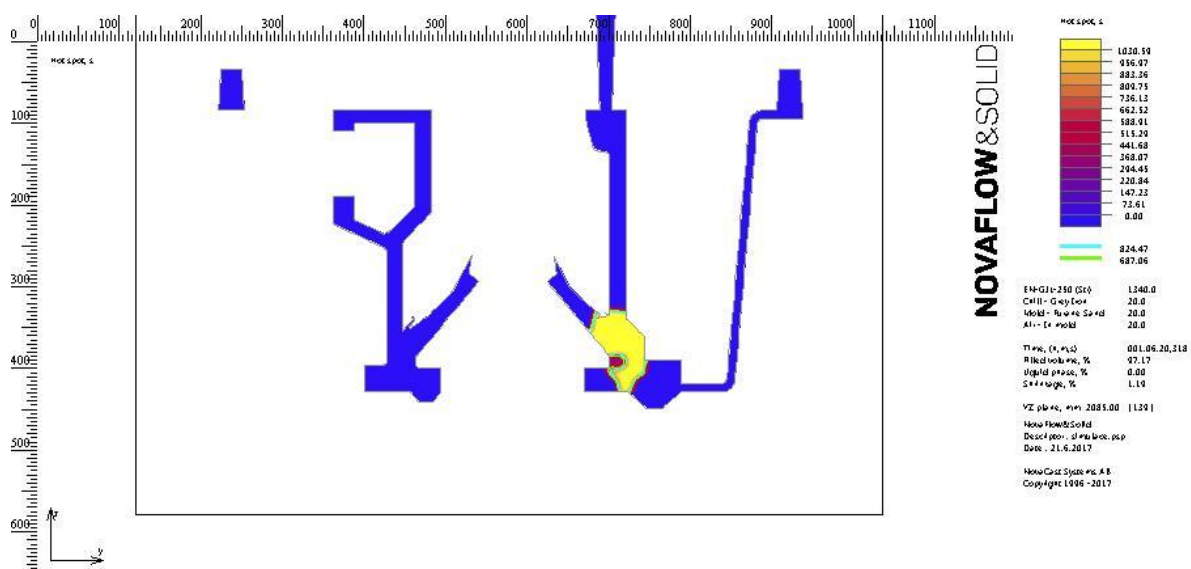
Obrázek 6.76 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 60 mm



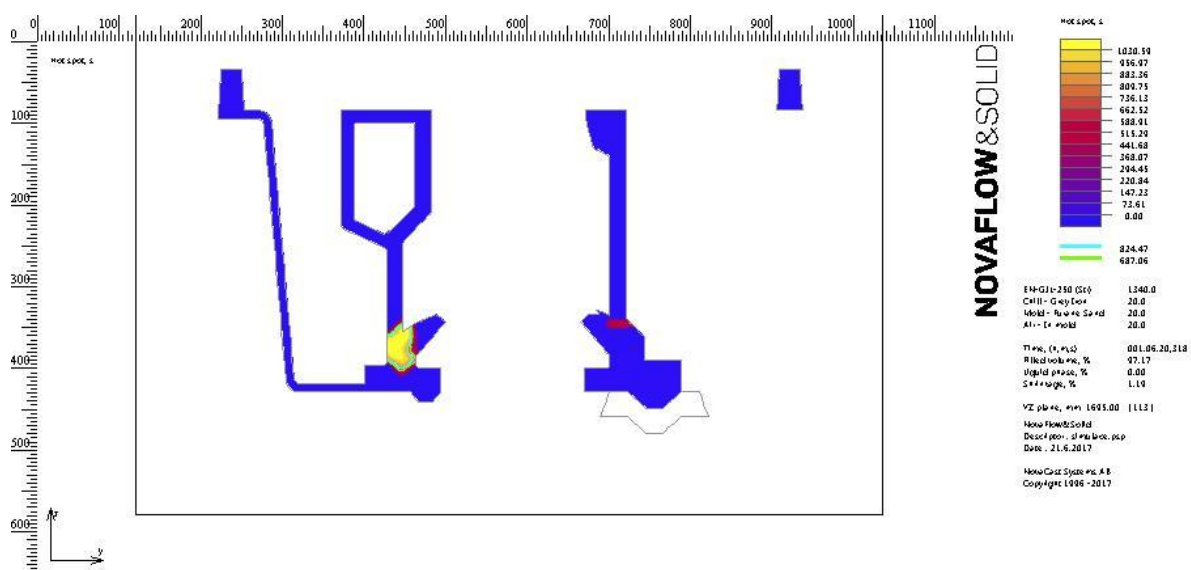
Obrázek 6.77 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 75 mm



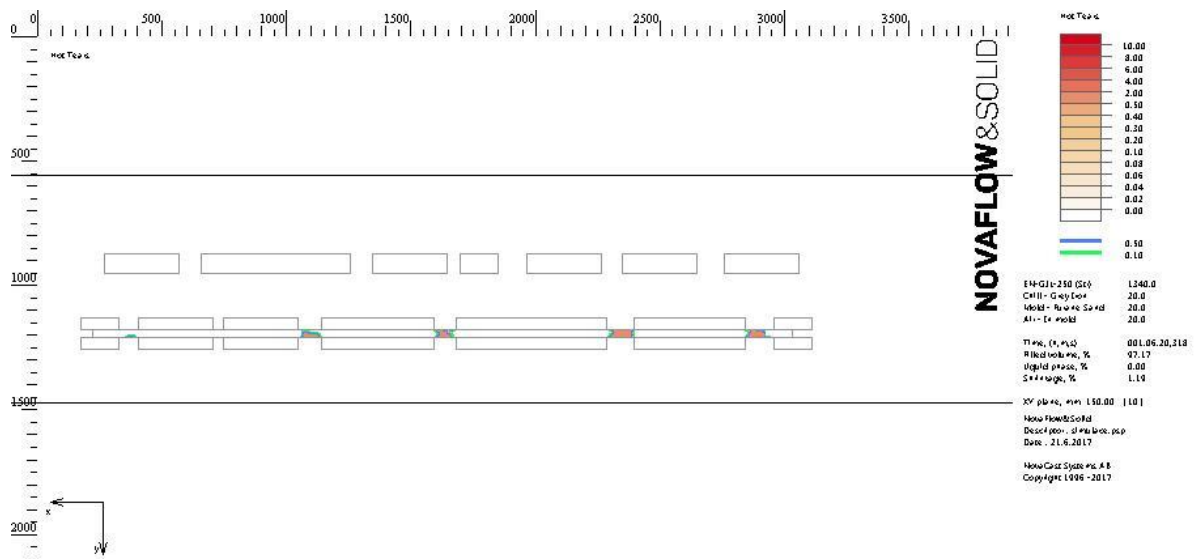
Obrázek 6.78 – tepelné uzly, řez rovinou X, kritické místo 1



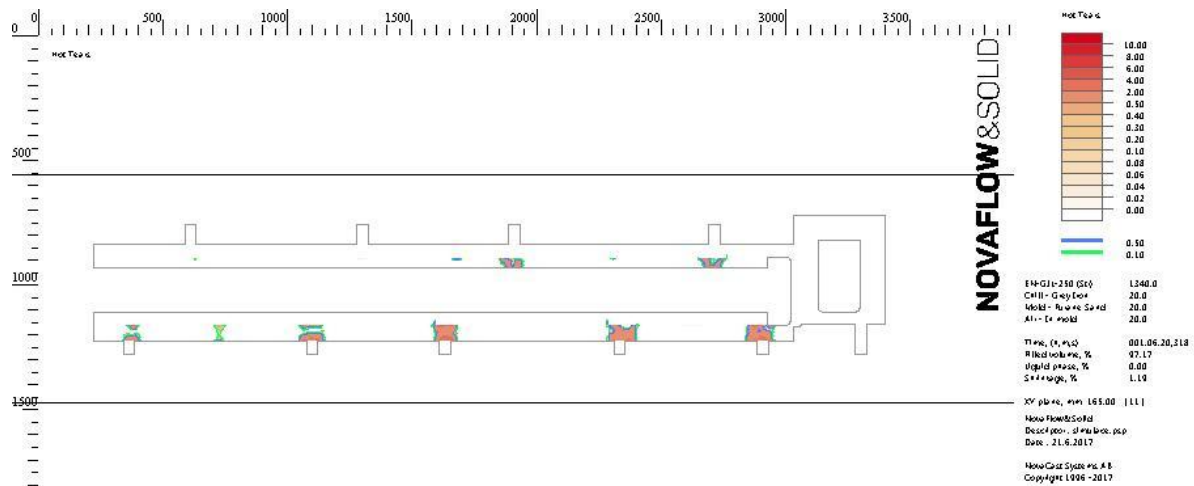
Obrázek 6.79 – tepelné uzly, řez rovinou X, kritické místo 2



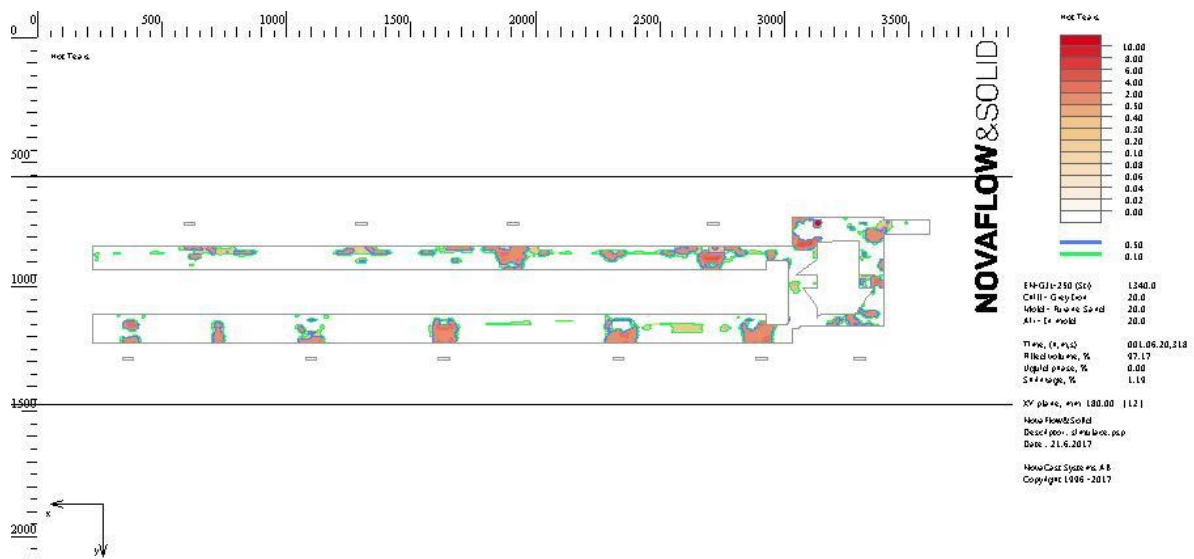
Obrázek 6.80 – tepelné uzly, řez rovinou X, kritické místo 3



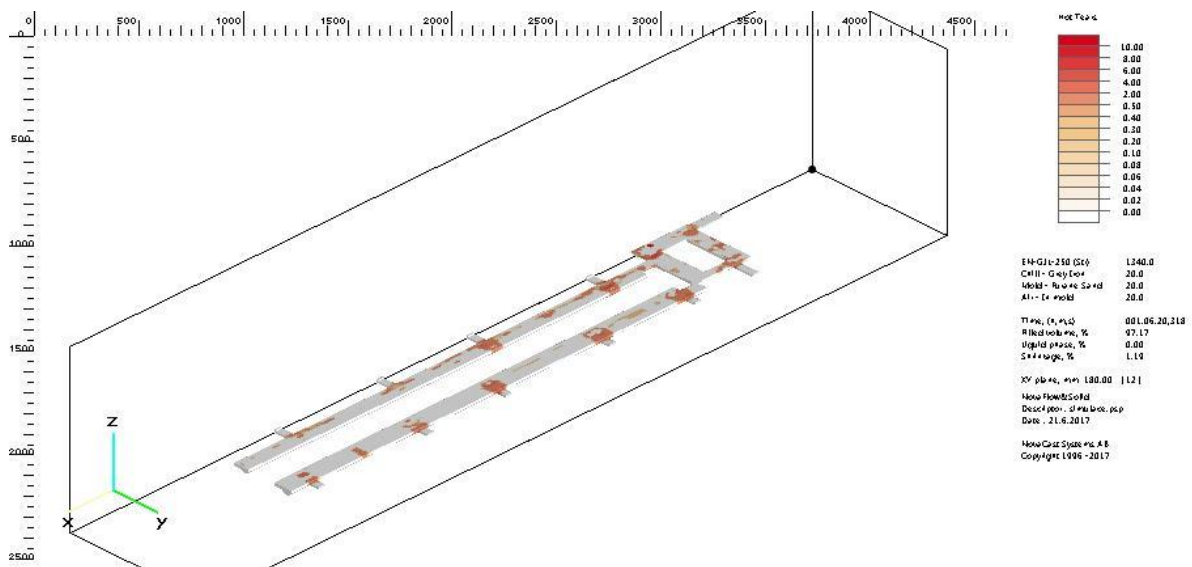
Obrázek 6.81 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 15 mm



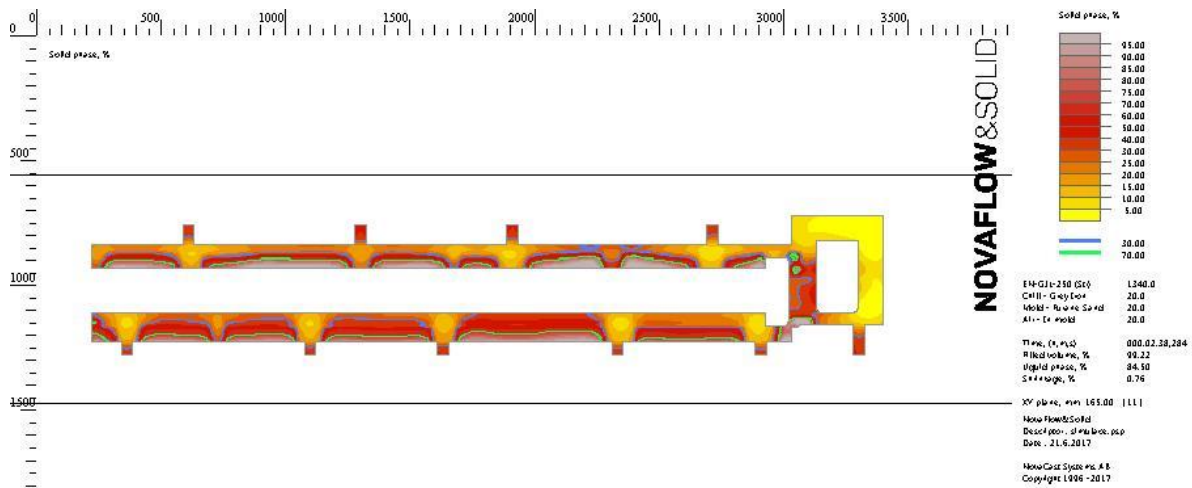
Obrázek 6.82 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 30 mm



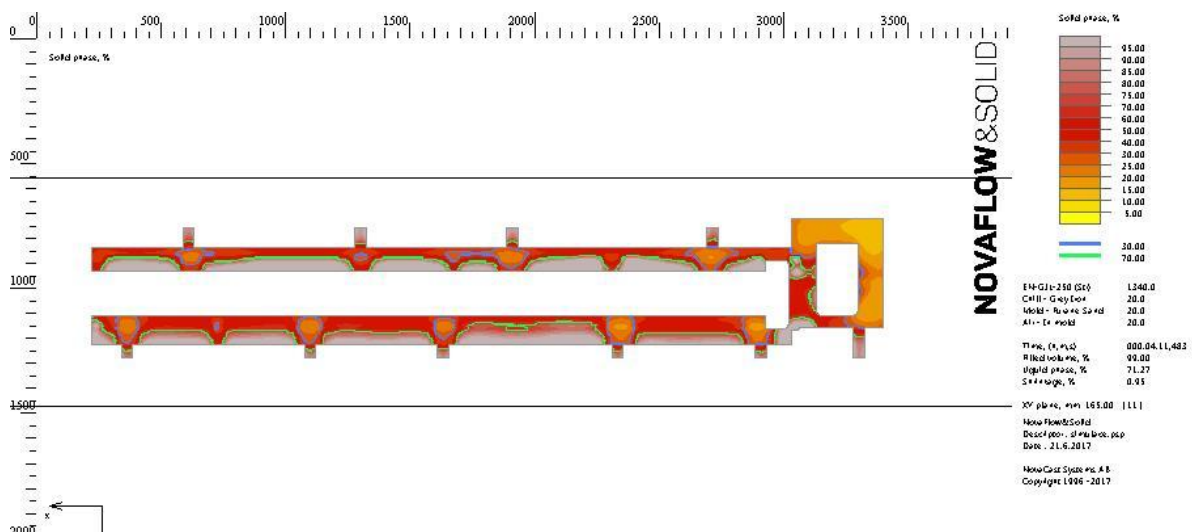
Obrázek 6.83 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 45 mm



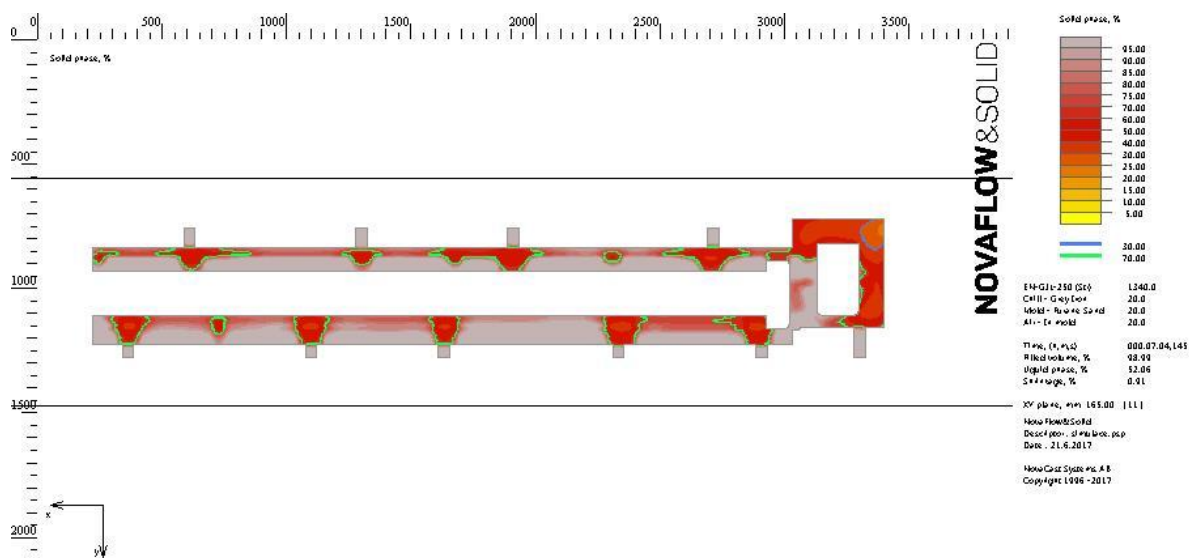
Obrázek 6.84 – izometrické zobrazení obrázku 6.83



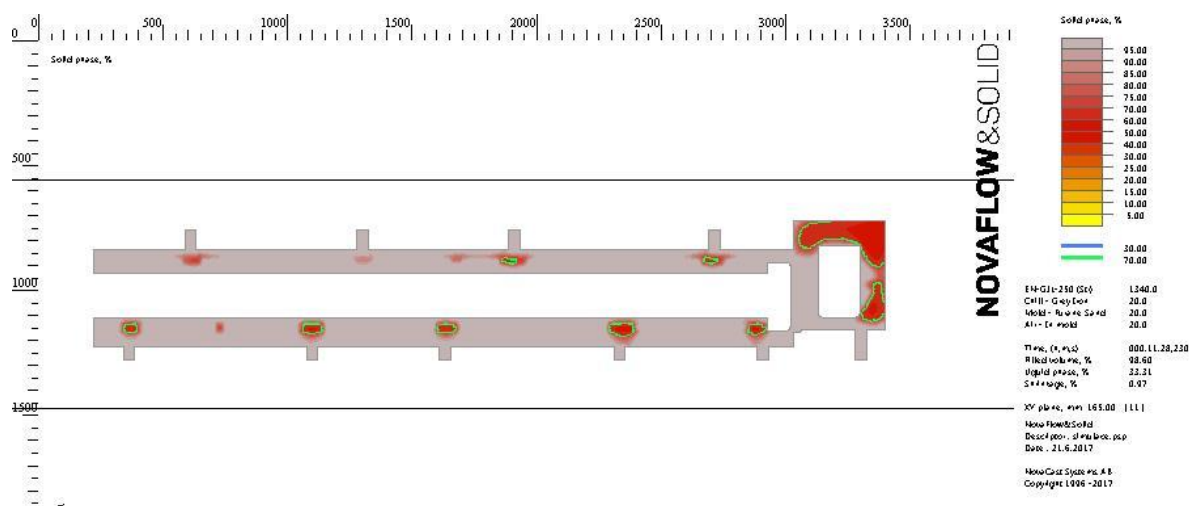
Obrázek 6.85 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 85 %



Obrázek 6.86 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 71 %



Obrázek 6.87 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 52 %



Obrázek 6.88 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 33 %

Shrnutí výsledků simulace:

Tato simulační varianta pracuje s dvěma samostatnými vtokovými soustavami. Tuto technologickou možnost jsem zvolil z důvodu lepší distribuce taveniny po odlitku na rozdíl od vtoku z jedné strany. Nicméně během simulace bylo zjištěno, že pro slévárnu je tato varianta nemožná. Chladítka jsou umístěna z důvodu posunutí tepelných uzlů výše do odlitku.

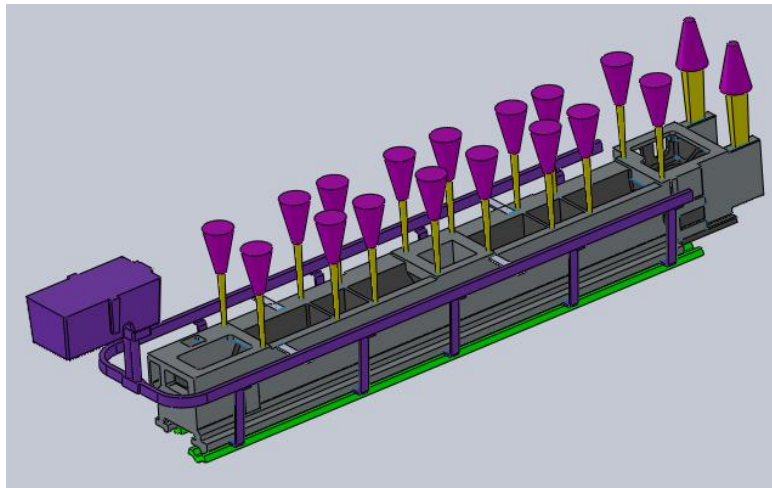
Z výsledků můžeme vidět, že tepelné uzly se začínají tvořit od výšky 30 mm od spodní plochy odlitku. Celkem jsou zde 3 kritická místa, kde tepelné uzly zasahují do vodících ploch. Můžeme vidět, že jejich pozice jsou právě v místech zářezů. Pro dosažení lepších výsledků bych umístil chladítka v celé délce, nicméně tuto variantu zde nebudu zahrnovat.

S chladítky souvisí riziko trhliny za tepla, které se vyskytuje opět v místech zářezů vstupujících do odlitku. Riziko trhlín je srovnatelné jako ve verzi s jedním vtokem a chladítka s rozestupy.

Tuhnutí odlitku probíhá opět usměrněně od chladítek směrem nahoru dále do odlitku. Podle snímků tuhnutí vidíme jak solid postupně uzavírá taveninu u zářezů, což je také iniciátorem právě tepelných uzlů v odlitku. Pro lepší tuhnutí bych opět volil chladítka v celé délce odlitku.

6.6 SIMULACE Č.: 6

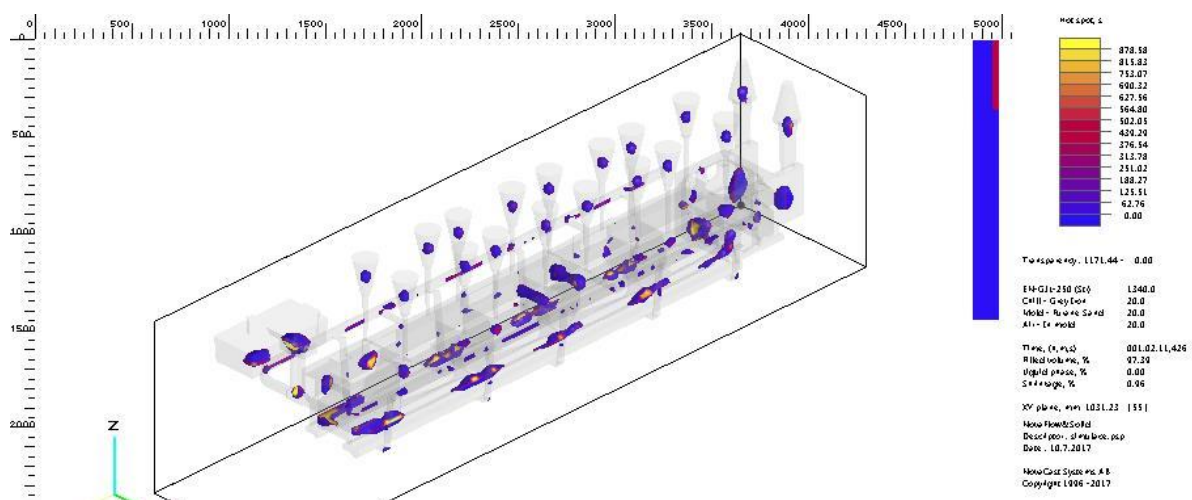
V této technologické variantě uvažují kombinaci pomocných horních zářezů a chladítek rozmístěných v celé délce vodících ploch (totožné s variantou č.: 3). Snaha je docílit rovnoměrnější plnění taveninou s kombinací co nejvýše položených tepelných uzlů.



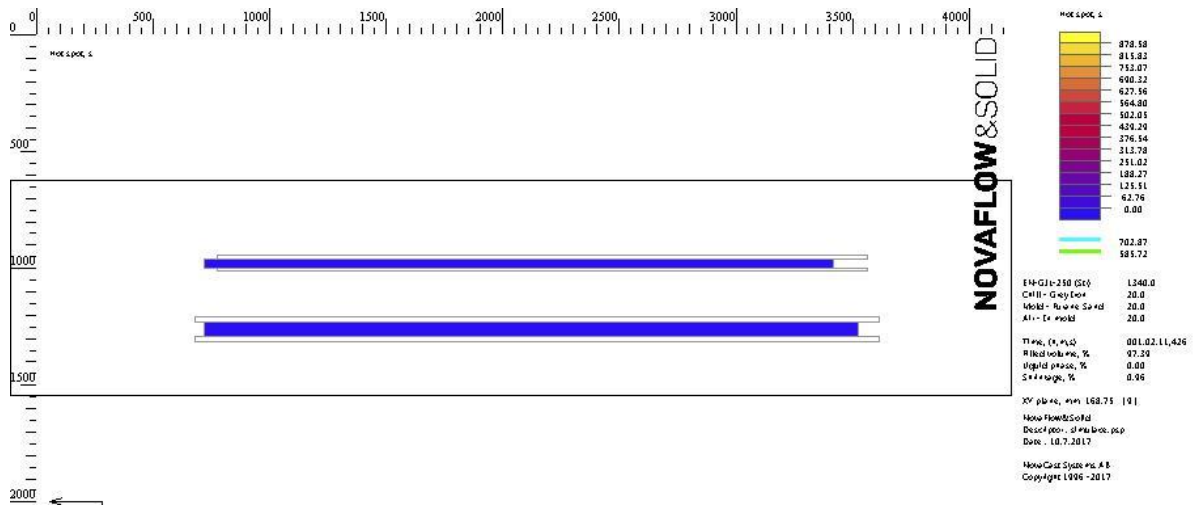
Obrázek 6.89 – vstupní model pro simulaci, pomocné horní zářezy, chladítka v celé délce, izometrický pohled

Tabulka 13: Technologické parametry procesu

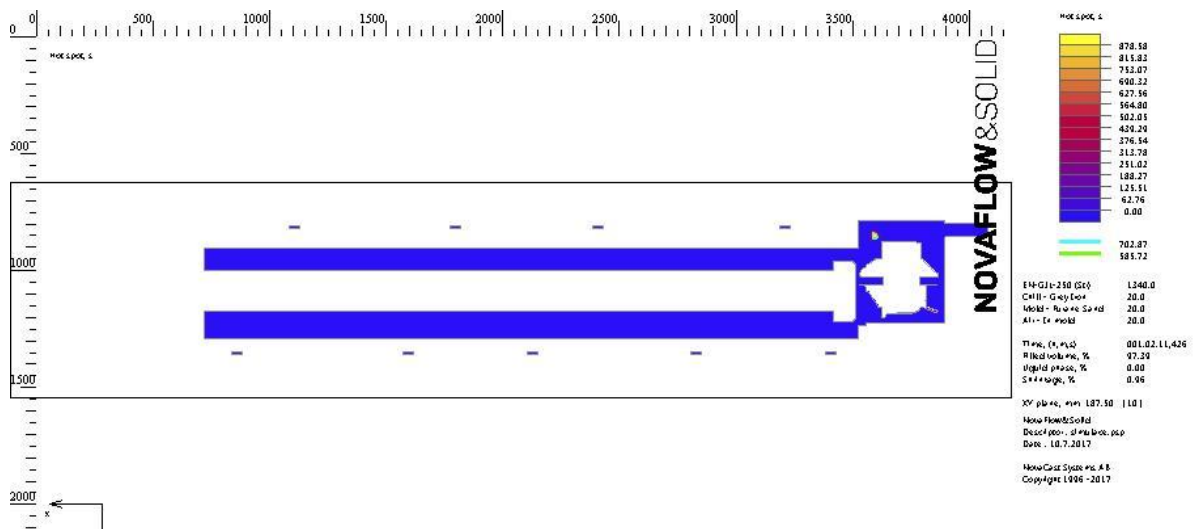
Licí teplota	1340 °C
Okolní teplota	20 °C
Doba lití	40 s
Chladítka	Ano, litinová, 20 °C
Jádra	Ano, furanová směs



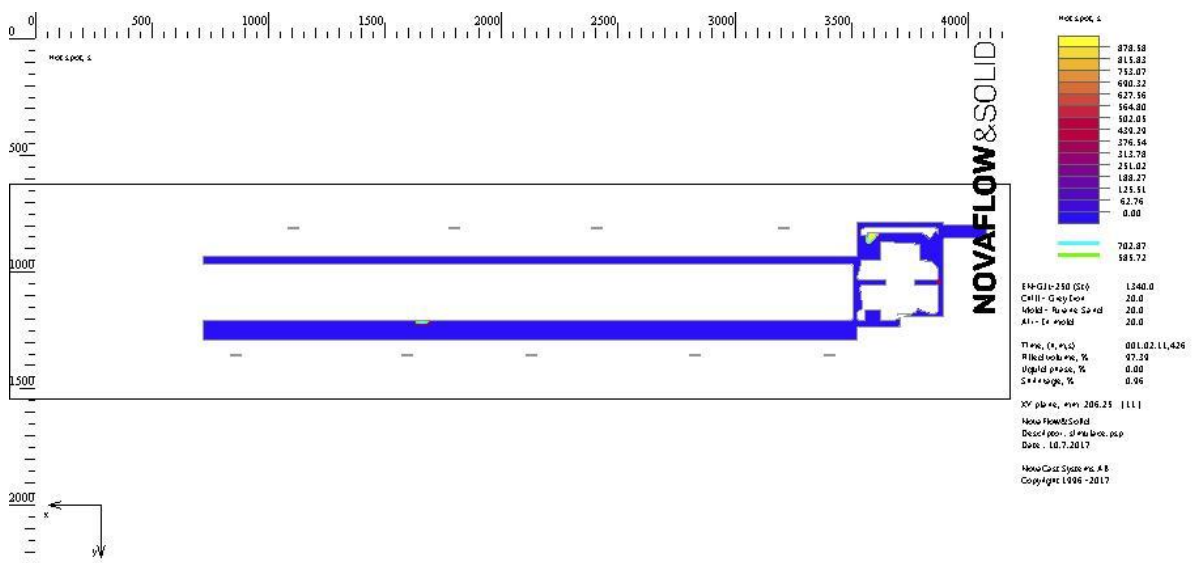
Obrázek 6.90 – tepelné uzly, transparentní model



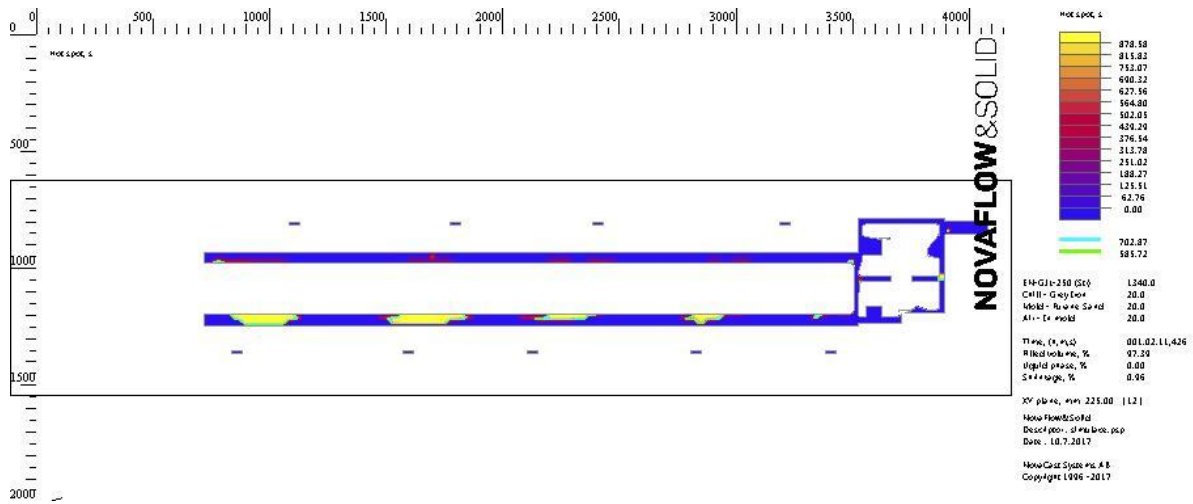
Obrázek 6.91 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 20 mm



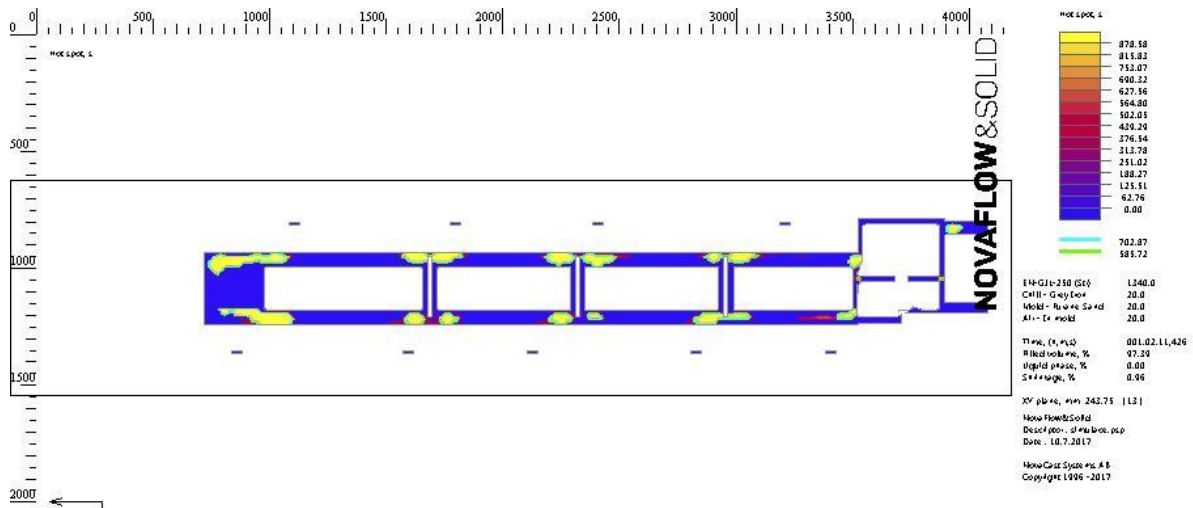
Obrázek 6.92 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 35 mm



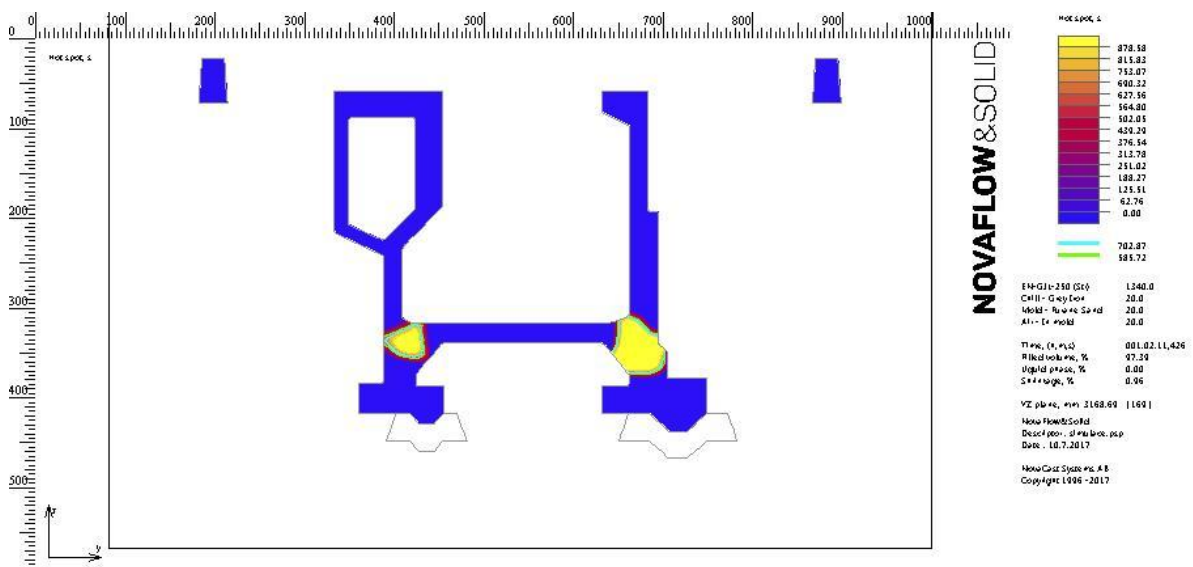
Obrázek 6.93 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 50 mm



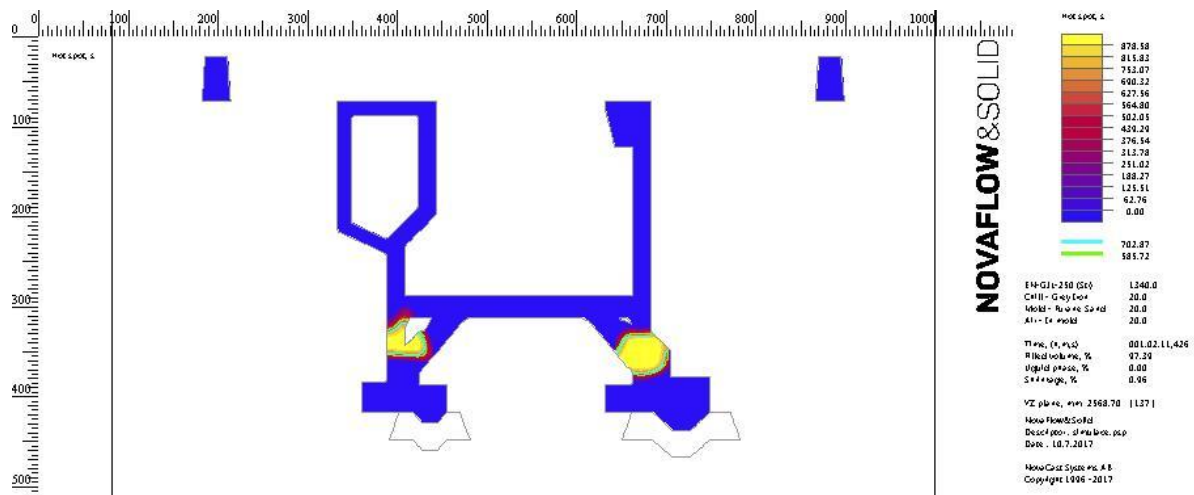
Obrázek 6.94 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 65 mm



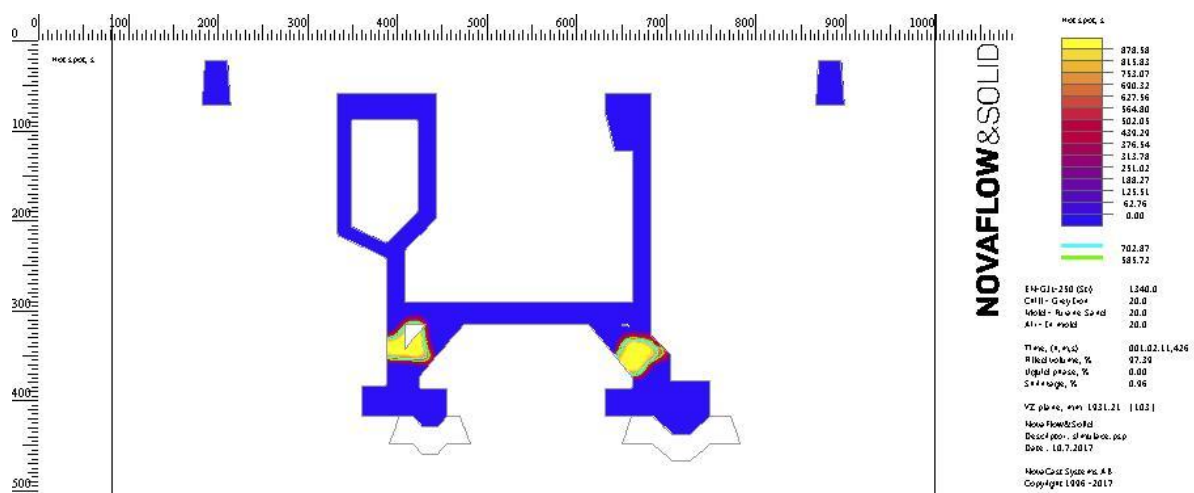
Obrázek 6.95 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 80 mm



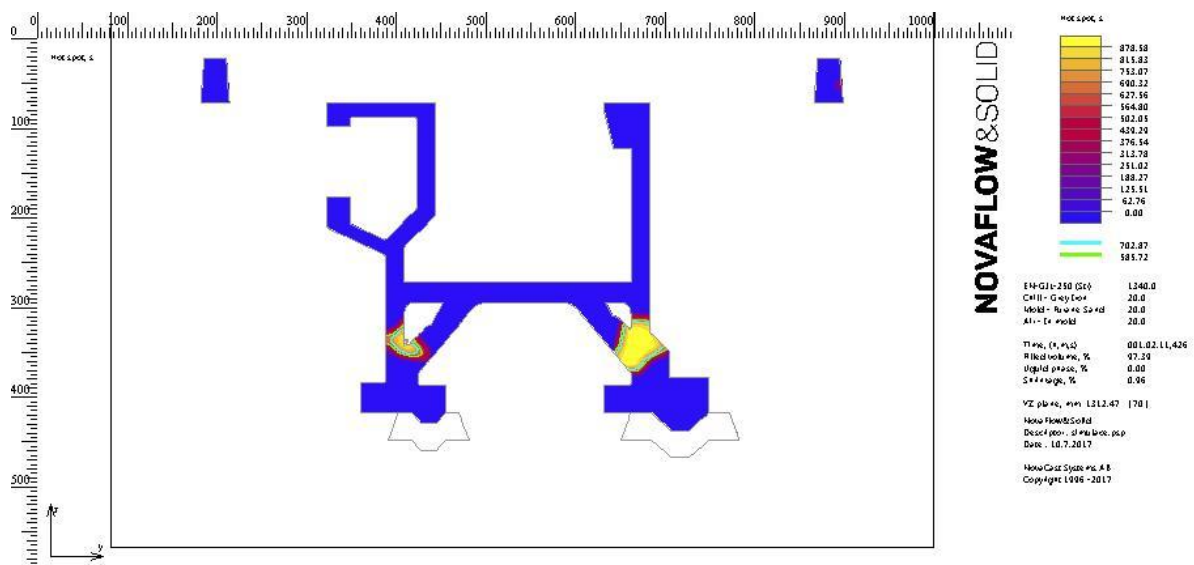
Obrázek 6.96 – tepelné uzly, řez rovinou X, kritické místo 1



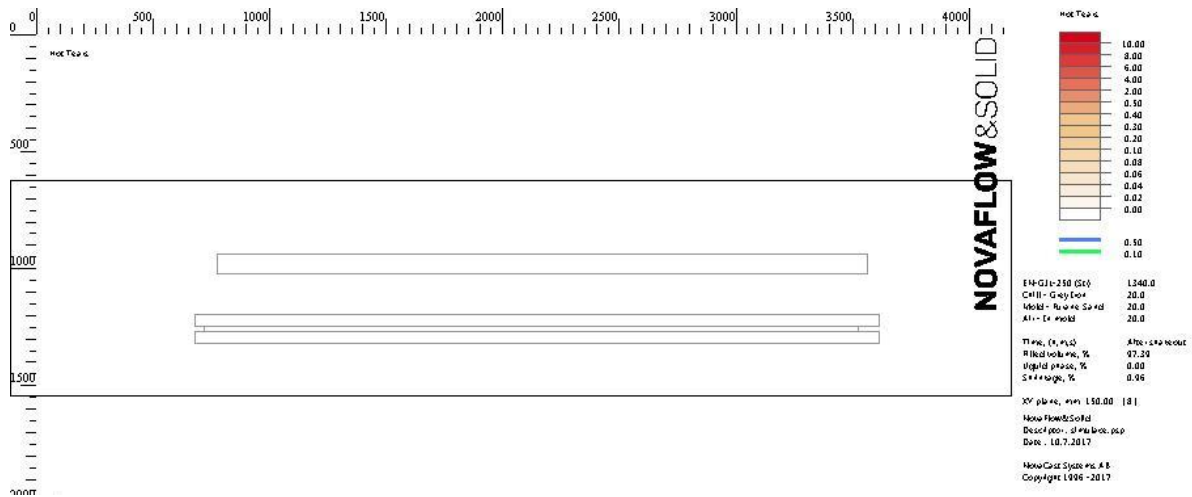
Obrázek 6.97 – tepelné uzly, řez rovinou X, kritické místo 2



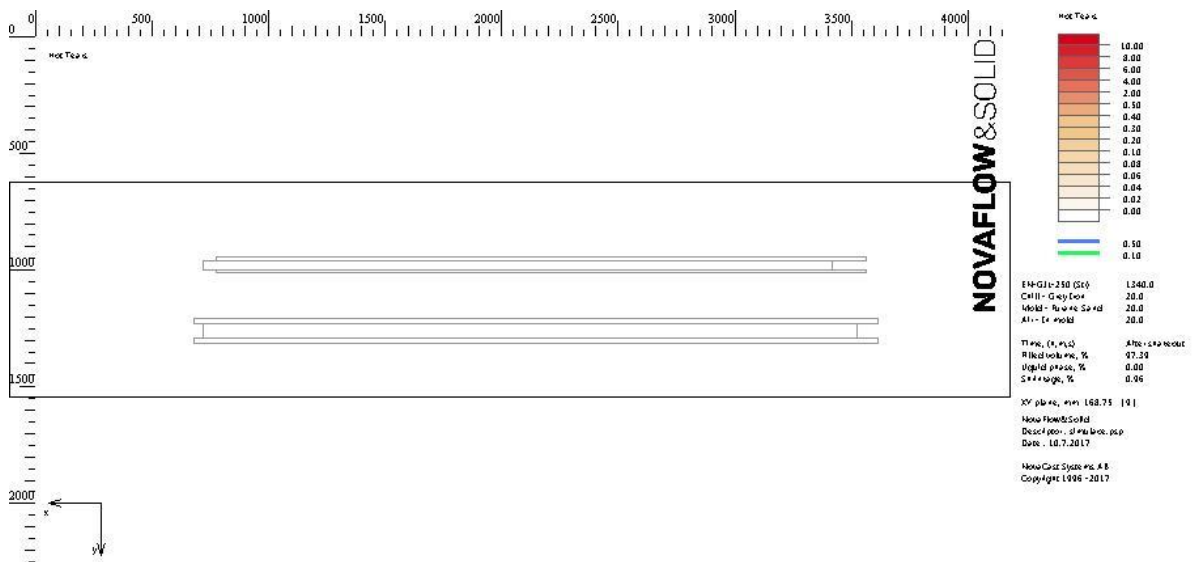
Obrázek 6.98 – tepelné uzly, řez rovinou X, kritické místo 3



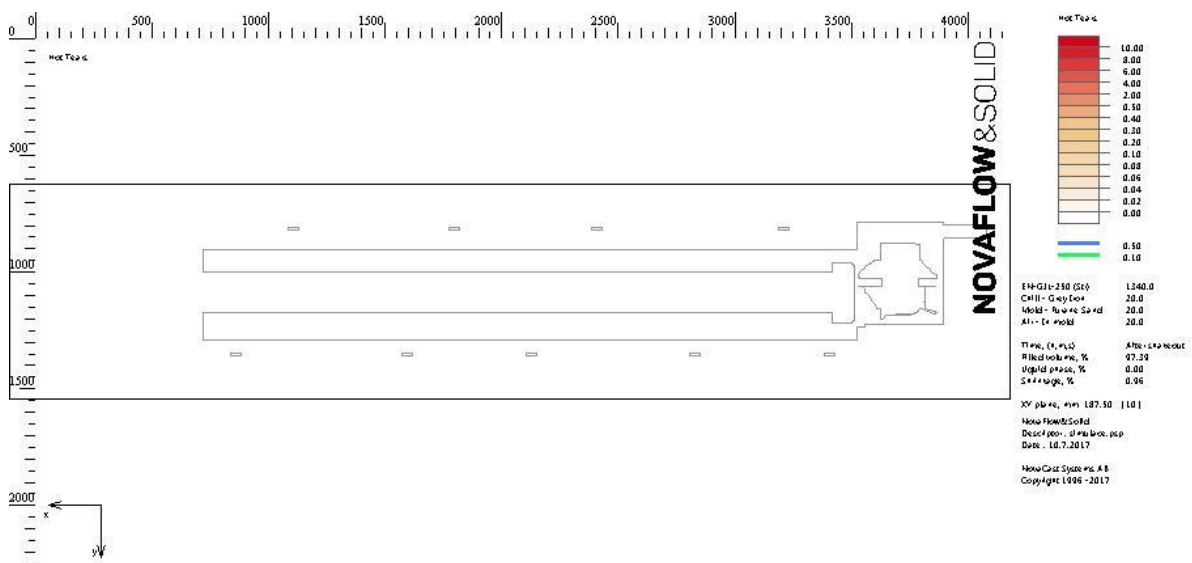
Obrázek 6.99 – tepelné uzly, řez rovinou X, kritické místo 4



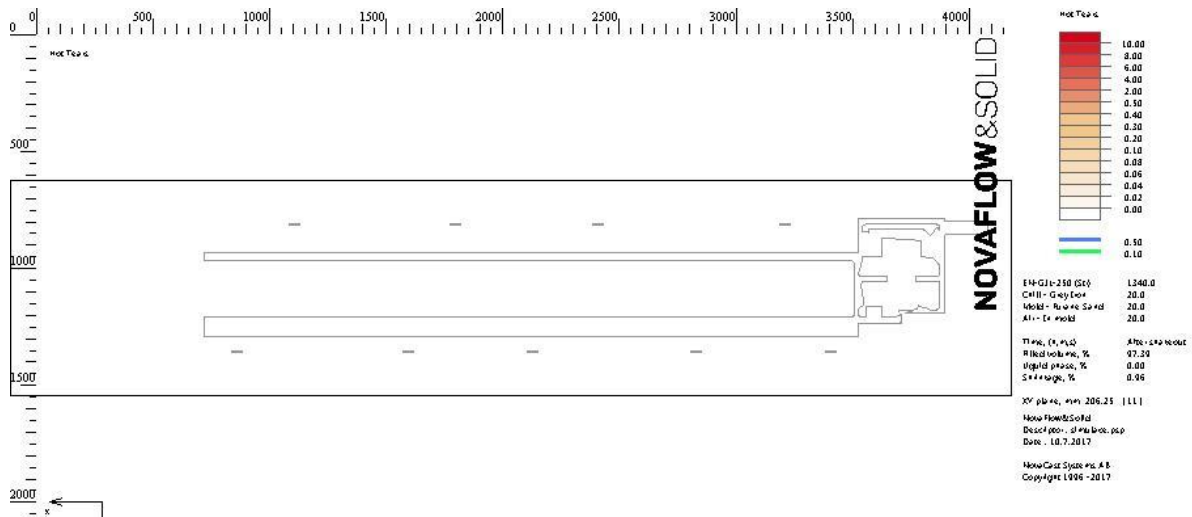
Obrázek 6.70 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 5 mm



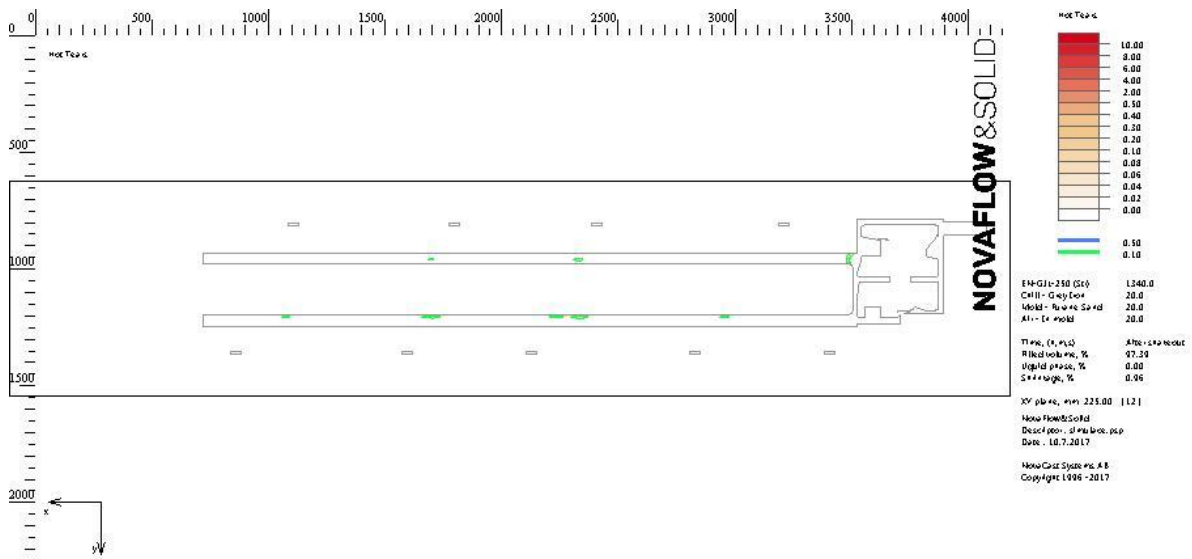
Obrázek 6.71 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 20 mm



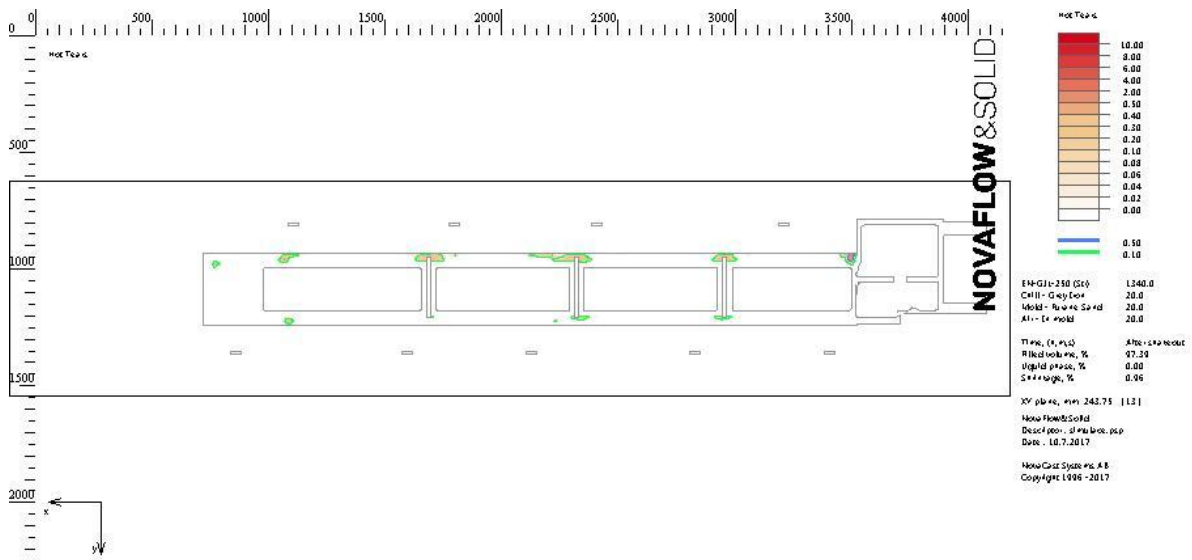
Obrázek 6.72 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 35 mm



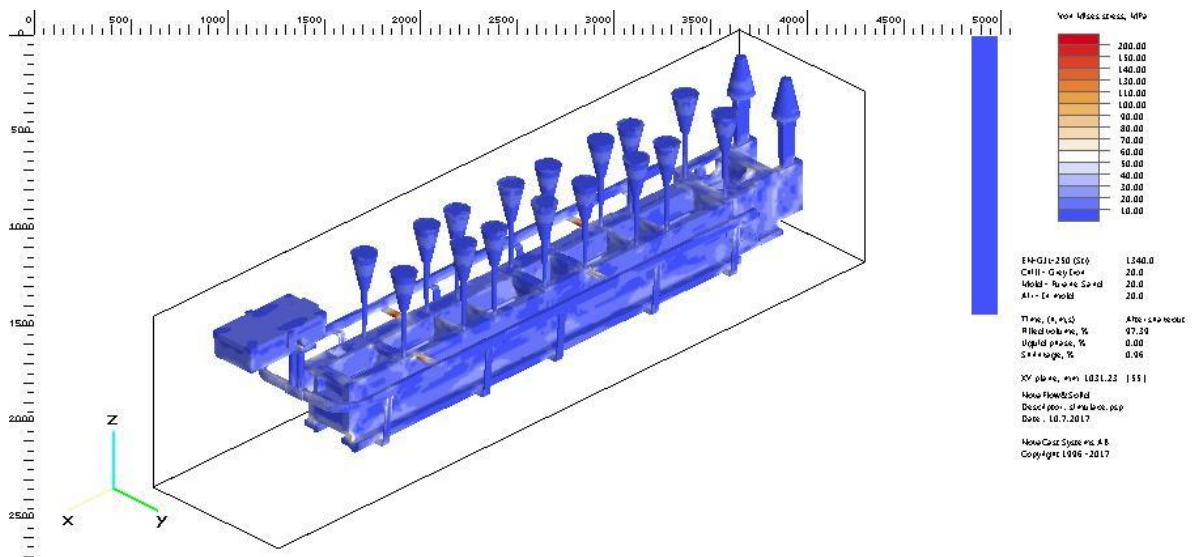
Obrázek 6.73 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 50 mm



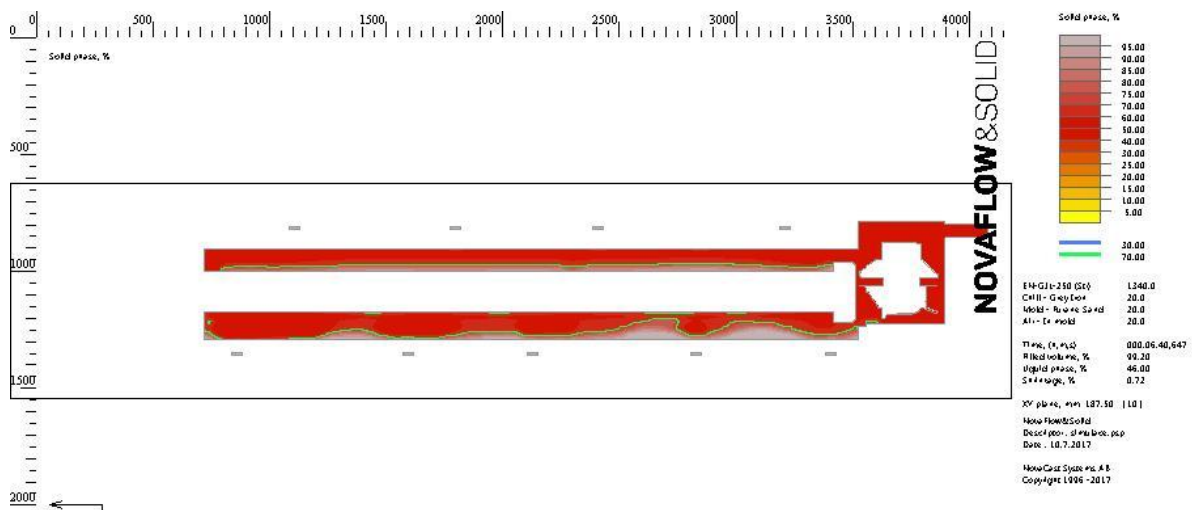
Obrázek 6.74 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 65 mm



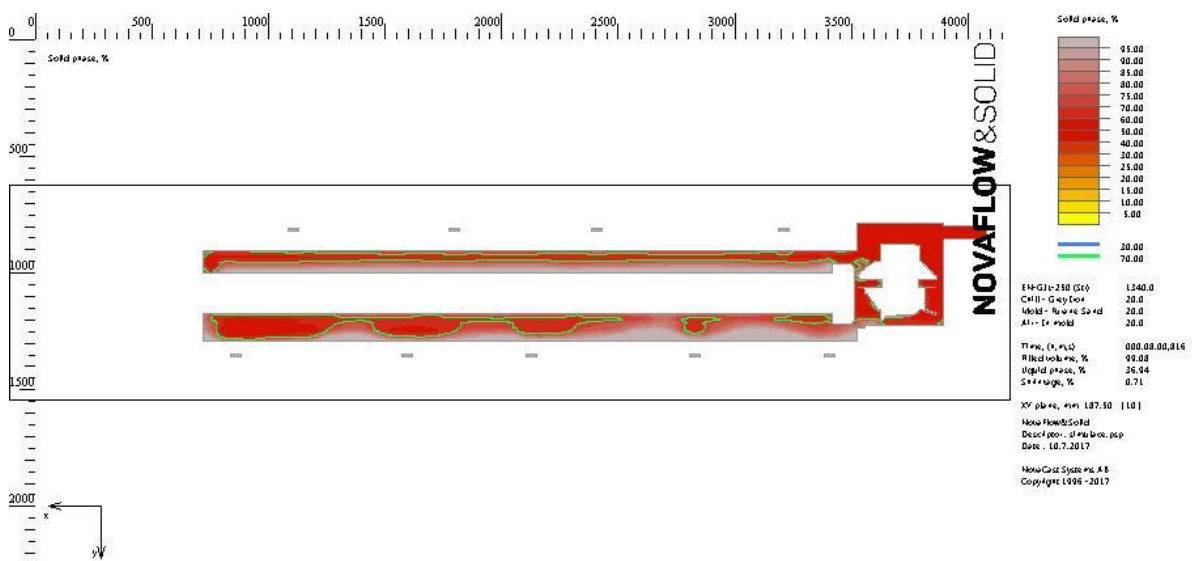
Obrázek 6.75 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 80 mm



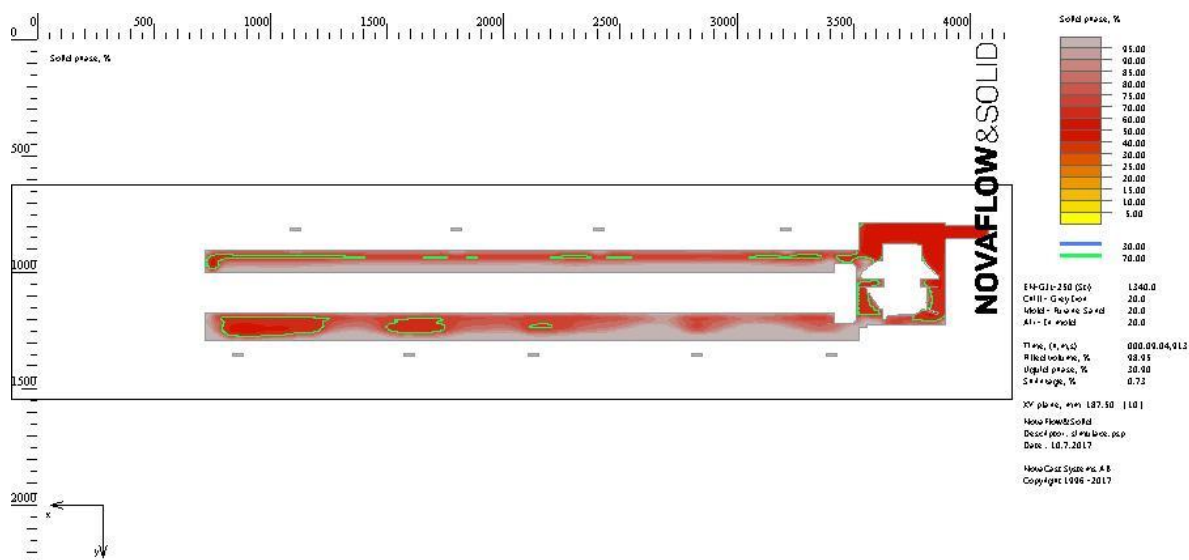
Obrázek 6.76 – celkové zbytkové pnutí v celém odlitku



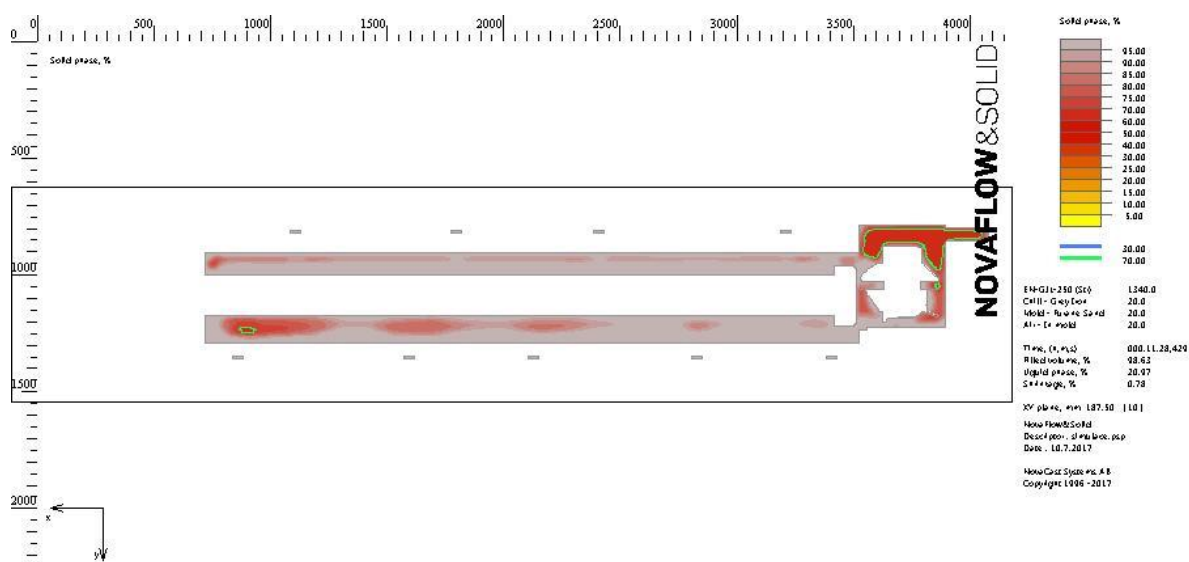
Obrázek 6.77 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 46 %



Obrázek 6.78 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 37 %



Obrázek 6.79 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 31 %



Obrázek 6.80 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 21 %

Shrnutí výsledků simulace:

Tato technologická varianta pracuje s kombinací pomocných horních vtoků a chladítek v celé délce vodících ploch. Pomocné vtoky jsou zde kvůli lepšímu dosazování taveniny do odlitku vzhledem k chladítkům. Chladítka jsou zde z důvodu usměrněnějšího tuhnutí a posunutí tepelných uzlů výše do odlitku.

Tepelné uzly se v odlitku začínají vyskytovat od výšky 65 mm od spodní plochy odlitku, opět v okolí spodních zářezů jdoucích do odlitku. V řezech rovinou X můžeme vidět, že uzly v podstatě už vůbec nezasahují do samotné části vodících ploch.

Riziko vzniku trhlin za tepla je v této variantě naprosto minimální, a to pouze v části, která je již dostatečně vzdálena od problematických ploch. Chladítka umístěná v celé délce ochlazují taveninu rovnoměrněji, než chladítka s rozestupy. To má příznivý vliv na výsledné riziko trhlin.

Zbytková pnutí v odlitku jsou minimální, pouze v oblasti horních zářezů vtokové soustavy můžeme pozorovat mírné zvýšení.

Tuhnutí odlitku postupuje usměrněně od spodní části směrem nahoru. Vznikají zde místa uzavírající likvid v okolí spodních zářezů, nicméně tento jev částečně kompenzují umístěna chladítka. Tento jev v této variantě není natolik výrazný jako v předchozích variantách.

7 ZÁVĚR

Tato diplomová práce podává ve své teoretické části ucelený přehled o LLG. V první části se věnuje nejběžnějším vadám v odlitcích. Dále práce rozebírá jednotlivé typy LLG, vliv prvků na slitinu a její mechanické vlastnosti a technologické možnosti. V poslední kapitole se věnuje přehledu nejpoužívanějších simulačních software v oblasti slévárenství. Praktická část se zabývá racionalizací odlitku lože soustruhu (reálný odlitek) pomocí numerické simulace. Hmotnost surového odlitku je 1486 kg, na délku dosahuje téměř 3,5 m. Cílem je ověřit stávající technologii, která vedla ke vzniku vad, navrhnout optimální technologickou variantu a tu následně ověřit opět pomocí simulace. Celkem bylo provedeno šest simulačních variant. První vstupní analýza a pět dalších technologických variant.

Na odlitku se při obrábění vodících ploch vyskytly vady neslučitelné s předávkou zákazníkovi. Prvotní domněnka byla, že se jedná o miktrhlíny způsobené vlivem vnitřního pnutí v odlitku. Nicméně po provedení vstupní simulace bylo zjištěno, že v odlitku je zbytkové pnutí minimální. Po dodání metalografických snímků slévárnou a následnou konzultací se přešlo na variantu vyplaveného volného grafitu a mikroporozitu. Proto jsem se v dalším postupu zaměřil na tepelné uzly v odlitku a jeho tuhnutí. Procesní parametry v simulacích (licí teplota, čas lití) nebyly měněny. Pouze technologické parametry (chladítka, vtoková soustava, zářezy) byly upravovány.

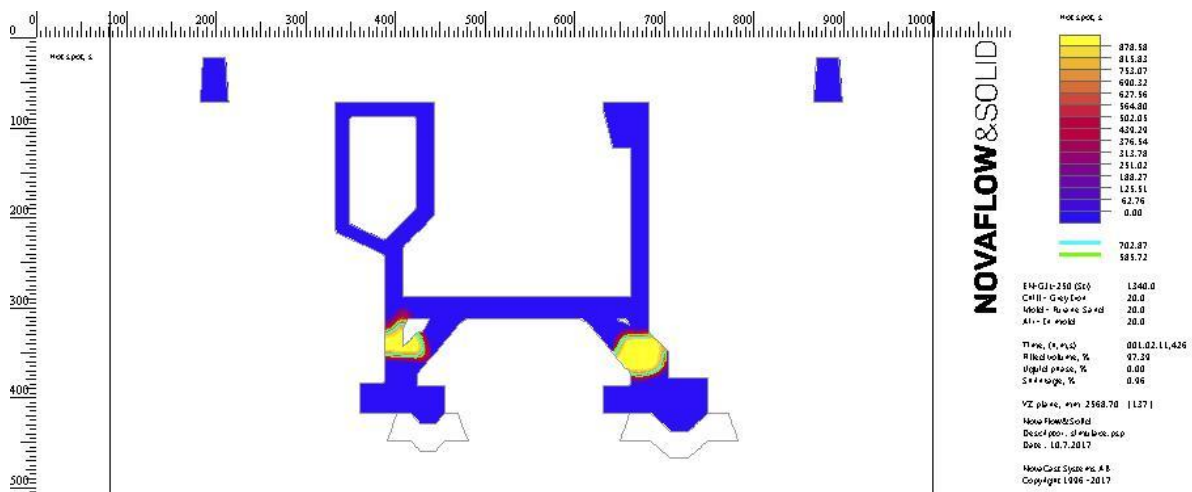
V první simulační variantě byla přidána chladítka na vodící plochy s rozestupy mezi zářezy. To mělo vést usměrnění tuhnutí a posunutí tepelných uzlů výše do odlitku, nicméně tato varianta je spojena se zvýšeným rizikem vzniku trhlin za tepla.

Druhá simulační varianta pracuje s chladítky v celé délce vodících ploch. Tato varianta byla zvolena z důvodu menšího tepelného šoku pro taveninu v oblasti zářezů vstupujících do odlitku. Tato varianta se jeví dobře, nicméně může se vyskytnout problém s dosazováním taveniny, kvůli chladítkům v oblasti zářezů.

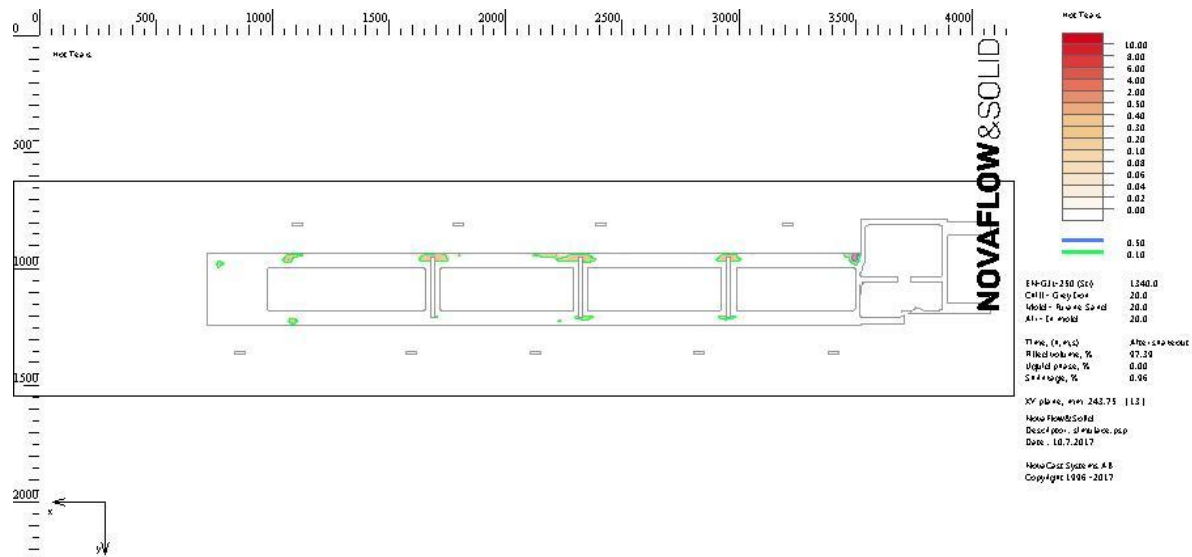
Třetí simulační varianta pracuje s pomocnými horními zářezy vstupující do odlitku. Ty mají za cíl dosazovat dostatečně horkou taveninu i do horní části odlitku. Na tvorbu tepelných uzlů má však tato varianta negativní vliv.

Čtvrtá simulační varianta pracuje s dvěma samostatnými vtokovými soustavami z každé strany odlitku. Tato varianta je však pouze informativní z důvodů nedostatečného prostoru ve slévárně pro dvě pánve zavěšené naproti sobě na dvou samostatných jeřábech.

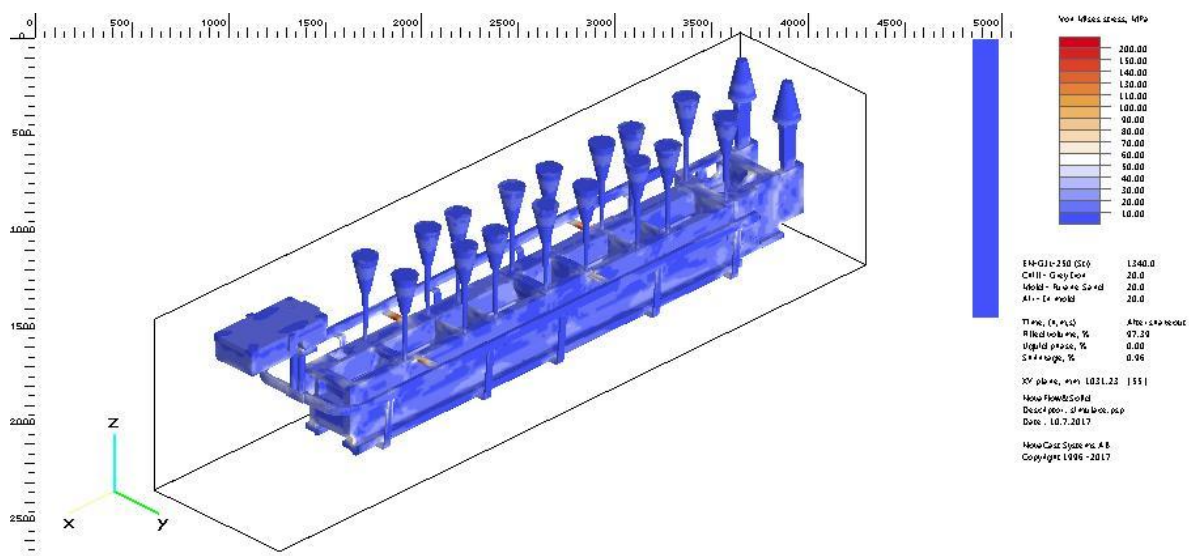
V páté simulační variantě byla zvolena kombinace pomocných horních vtoků a chladítek umístěných v celé délce vodících ploch. Riziko vzniku trhlin za tepla je naprosto minimální, tuhnutí usměrněné a tepelné uzly položené mimo vodící plochy. Tato varianta se jeví jako nejlepší možná. Na obrázku 7.1 je zobrazen nejnižše položený tepelný uzel začínající ve výšce 65 mm od nejnižše položené plochy odlitku. Na obrázku 7.2 je zobrazeno riziko vzniku trhlin za tepla začínající 80 mm od nejnižše položené plochy odlitku. Obrázek 7.3 demonstruje zbytkové pnutí v odlitku. Lze vidět, že odlitek je uklidněný a nehrozí žádné velké deformace odlitku vlivem zbytkového pnutí.



Obrázek 7.1 – nejnižše položený tepelný uzel pro pátou simulační variantu



Obrázek 7.2 – riziko vzniku trhlin za tepla pro pátou simulační variantu



Obrázek 7.3 – zbytkové pnutí v odlitku pro pátou simulační variantu

Tato práce se sice zaměřuje na jeden konkrétní odlitek, nicméně Metalurgie Rumburk vyrábí tento typ odlitku v několika rozměrových verzích. Tuto technologickou racionalizaci lze tak použít i na ostatní druhy.

8 ZDROJE

- [1] ČSN 42 1240. *Vady odlitků. Názvosloví a třídění vad*. 1964.
- [2] ECOB, C.M., C. HARTUNG a S-O. OLSEN. *Common Metallurgical Defects in Grey Cast Irons* [online]. , 9 [cit. 2017-02-03]. Dostupné z: www.elkemfoundry.com.cn/pdf/91fd9f9cb8.pdf
- [3] OTÁHAL, Vlastislav. *Šedá litina litina s lupínkovým grafitem monografie* [online]. 2007. Brno, 2007 [cit. 2017-02-15]. Dostupné z: http://otahalconsult.cz/soucasne-produkty/litiny/seda_litna_lupinekovy_grafit/
- [4] DAVIS, J.R. *Classification and Basic Metallurgy of Cast Irons* [online]. **1996**, 10 [cit. 2017-03-10]. Dostupné z: http://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/06613G_Sample.pdf/72e896e0-bc0f-44d0-96c5-02065daa38f4
- [5] BEŇO, Jaroslav a Nikol ŠPIRUTOVÁ. *Počítačová podpora lití a tuhnutí odlitků* [online]. Ostrava, 2013, **2013**, 91-99 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: https://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/pocitacova-podpora-liti-a-tuhnuti-odlitku/Beno_Pocitacova-podpora-liti-a-tuhnuti-odlitku.pdf
- [6] GALLERNE, Céline. *ESI Presents Leading Casting Simulation Software ProCAST at CastExpo 2016* [online]. 2016 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <https://www.esi-group.com/cz/spolecnost/tisk/tiskove-zpravy/esi-presents-leading-casting-simulation-software-procast-castexpo-2016>
- [7] MAGMASOFT. *MAGMASOFT® – autonomous engineering* [online]. [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: <https://www.magmasoft.de/en/solutions/magmasoft/>

[8] *NOVAFLOW & SOLID SIMULATE YOUR CASTINGS FASTER, EASIER AND MORE ACCURATE* [online]. , 1-3 [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: https://www.novacast.se/wp-content/uploads/2015/06/Productsheet_NFS-WEB-1.pdf

[9] *EKK, Inc. | Sand Casting* [online]. 2016 [cit. 2017-04-05]. Dostupné z: <http://www.ekkinc.com/sand/>

[10] *SOLID CAST* [online]. , 1-2 [cit. 2017-04-06]. Dostupné z: <https://finite.solutions/wp-content/uploads/2014/07/SOLIDCast-Brochure.pdf>

[11] *FLOW CAST* [online]. , 1-2 [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: <https://finite.solutions/wp-content/uploads/2014/07/FLOWCast-Brochure.pdf>

[12] *OPTI CAST* [online]. , 1-2 [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: <https://finite.solutions/wp-content/uploads/2014/07/OPTICast-Brochure.pdf>

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 2.1 – vada 41, detekce vady při obrábění (vlevo), analýza vady a její zvětšení (vpravo) [2]</i>	5
<i>Obrázek 2.2 – vada 41, detekce vady při obrábění (vlevo), analýza vady a její zvětšení (vpravo) [2]</i>	6
<i>Obrázek 2.3 – vada 41, analýza vady a její zvětšení [2]</i>	7
<i>Obrázek 2.4 – vada 43, příklad staženiny (vlevo). Vada byla zjištěna po obrobení, ve středu odlitku T tvaru. Zvětšení povrchu staženiny ilustrující dendritickou strukturu (vpravo) [2]</i>	8
<i>Obrázek 2.5 – vada 65, příklad vyloučeného mezikrystalického karbidu [2]</i>	9
<i>Obrázek 2.6 – vada 71/72/73, grafitická struktura (vlevo), detail grafitického síťoví (vpravo) [2]</i>	10
<i>Obrázek 2.7 – vada 65, steadit v masivní části odlitku (vlevo), steadit v tenké části odlitku (vpravo) [2]</i>	10
<i>Obrázek 2.8 – vada 51/53, ukázka clusteru strusky v odlitku (vlevo), zvětšení vady pro ukázku různých fází (vpravo) [2]</i>	11
<i>Obrázek 2.9 – vada 52/53, zalité zrno písku (vlevo), zrno písku obalené struskou (vpravo) [2]</i>	12
<i>Obrázek 3.1 – dělení litin a ocelí na odlitky dle obsahu uhlíku a křemíku (vlevo), vliv uhlíkového ekvivalentu na pevnost v tahu (vpravo) [4]</i>	13
<i>Obrázek 3.2 – dělení litin dle způsobu grafitzace uhlíku [4]</i>	14
<i>Obrázek 3.3 – typické uspořádání grafitu v matici [4]</i>	16
<i>Obrázek 3.4 – vliv velikosti lupínku na pevnost litiny [4]</i>	18
<i>Obrázek 3.5 – Charakteristické křivky ochlazování v závislosti na tvaru grafitu. T_E je rovnovážná eutektická teplota [4]</i>	20
<i>Obrázek 3.6 – vliv očkování na pevnost v tahu [4]</i>	21
<i>Obrázek 4.1 – implementační schéma simulačních SW ve výrobě [5]</i>	23
<i>Obrázek 4.2 – cyklus výrobku od CAD dat až po finální analýzu [6]</i>	24
<i>Obrázek 4.3 – výpočet variant nálitků s ohledem na konečné vlastnosti [7]</i>	25
<i>Obrázek 4.4 – ukázka nově používané mesh metody CVM [8]</i>	27
<i>Obrázek 4.5 – ukázka tepelné radiace odlitku (vlevo), predikce staženin odlitku (vpravo); modul SOLIDCast [10]</i>	28
<i>Obrázek 4.6 – teplotní pole Al odlitku, naklápěcí trvalá forma (vlevo), teplotní pole odlitku, vytavitelný model (vpravo) [11]</i>	29
<i>Obrázek 4.7 – nálitok litiny, písková forma před a po optimalizaci, modul OPTICast [12]</i>	29
<i>Obrázek 5.1 – 3D model s technologickými přídávky</i>	30
<i>Obrázek 5.2 - zaformovaný spodní (vlevo) a vrchní díl (vpravo) formy</i>	31
<i>Obrázek 5.3 – detekovaná abnormální mikroporozita vodících ploch, zvětšeno 50x(vlevo), 200x(vpravo)</i>	32
<i>Obrázek 5.4 – snímek z kapilární zkoušky</i>	32
<i>Obrázek 6.1 – rovina Z (horizontální rovina) vedená vodícími plochami, rovina X (vertikální rovina)</i>	33
<i>Obrázek 6.3 – snímek trhlin za tepla (řez 45 mm od spodní plochy)</i>	34
<i>Obrázek 6.2 – vstupní model pro simulaci</i>	34
<i>Obrázek 6.4 – snímek trhlin za tepla (řez 60 mm od spodní plochy)</i>	35
<i>Obrázek 6.5 – zbytkové pnutí v odlitku</i>	35
<i>Obrázek 6.6 – zobrazení tepelných uzlů v transparentním modelu</i>	36

Obrázek 6.7 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 30 mm	36
Obrázek 6.8 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 45 mm	36
Obrázek 6.9 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 60 mm	37
Obrázek 6.10 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 70 mm	37
Obrázek 6.11 – tepelné uzly, řez rovinou X.....	37
Obrázek 6.12 – tepelné uzly, řez rovinou X.....	38
Obrázek 6.13 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 45 mm, likvid 13%.....	38
Obrázek 6.14 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 45 mm, likvid 11%.....	38
Obrázek 6.15 – tuhnutí odlitku, řez rovinou X, likvid 17%.....	39
Obrázek 6.16 – vstupní model pro simulaci, zobrazení rozmístění chladítek na vodících plochách.....	40
Obrázek 6.17 – zobrazení tepelných uzlů v transparentním modelu.....	40
Obrázek 6.18 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 30 mm	41
Obrázek 6.19 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 45 mm	41
Obrázek 6.20 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 60 mm	41
Obrázek 6.21 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 75 mm	42
Obrázek 6.22 – tepelné uzly, kritické místo č.:1, řez rovinou X.....	42
Obrázek 6.23 – tepelné uzly, kritické místo č.: 2, řez rovinou X.....	42
Obrázek 6.24 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 15 mm.....	43
Obrázek 6.25 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 30 mm.....	43
Obrázek 6.26 – izometrické zobrazení obrázku 6.25.....	43
Obrázek 6.27 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 45 mm.....	44
Obrázek 6.28 – izometrické zobrazení obrázku 6.27.....	44
Obrázek 6.29 – zbytkové pnutí v okolí vodících ploch	44
Obrázek 6.30 – zbytkové pnutí v celém odlitku	45
Obrázek 6.31 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30mm, likvid 73 %.....	45
Obrázek 6.32 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 63 %.....	45
Obrázek 6.33 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 45 mm, likvid 41 %.....	46
Obrázek 6.34 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 45 mm, likvid 23 %.....	46
Obrázek 6.35 – tuhnutí odlitku, řez rovinou X s chladítky, likvid 23 %.....	46
Obrázek 6.36 – tuhnutí odlitku, řez rovinou X mimo chladítko, likvid 14%.....	47
Obrázek 6.37 – vstupní model pro simulaci, zobrazení chladítek na vodících plochách	48
Obrázek 6.38 – tepelné uzly, transparentní model.....	48
Obrázek 6.39 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 15 mm	49
Obrázek 6.40 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 30 mm	49
Obrázek 6.41 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 45 mm	49
Obrázek 6.42 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 60 mm	50
Obrázek 6.43 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 75 mm	50
Obrázek 6.44 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 90 mm	50
Obrázek 6.45 – tepelné uzly, řez rovinou X skrz zářez.....	51
Obrázek 6.46 – tepelné uzly, řez rovinou X, nejkritičtější místo	51

<i>Obrázek 6.47 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 15 mm.....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 6.48 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 30 mm.....</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 6.49 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 45 mm.....</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 6.50 – izometrické zobrazení obrázku 6.49.....</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 6.51 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 57 %.....</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 6.52 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 53 %.....</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 6.53 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 47 %.....</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 6.54 – tuhnutí odlitku, řez rovinou X bez zářezů, likvid 19 %.....</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 6.55 – tuhnutí odlitku, řez rovinou X skrz zářez, likvid 19 %.....</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 6.56 – vstupní model pro simulaci, pomocné horní vtoky, pohled shora.....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 6.57 – vstupní model pro simulaci, pomocné horní vtoky, izometrický pohled.....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 6.58 – tepelné uzly, transparentní model.....</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 6.59 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 15 mm.....</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 6.60 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 30 mm.....</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 6.61 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 45 mm.....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 6.62 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 60 mm.....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 6.63 – tepelné uzly, řez rovinou X, kritické místo 1.....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 6.64 – tepelné uzly, řez rovinou X, kritické místo 2.....</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 6.65 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 15 mm.....</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 6.66 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 30 mm.....</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 6.67 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 45 mm.....</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 6.68 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 27 %.....</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 6.69 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 19 %.....</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 6.70 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 13 %.....</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 6.71 – vstupní model pro simulaci, dva vtoky, izometrický pohled.....</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 6.72 – tepelné uzly, transparentní model.....</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 6.73 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 15 mm.....</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 6.74 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 30 mm.....</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 6.75 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 45 mm.....</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 6.76 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 60 mm.....</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 6.77 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 75 mm.....</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 6.78 – tepelné uzly, řez rovinou X, kritické místo 1.....</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 6.79 – tepelné uzly, řez rovinou X, kritické místo 2.....</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 6.80 – tepelné uzly, řez rovinou X, kritické místo 3.....</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 6.81 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 15 mm.....</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 6.82 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 30 mm.....</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 6.83 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 45 mm.....</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 6.84 – izometrické zobrazení obrázku 6.83.....</i>	<i>67</i>
<i>Obrázek 6.85 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 85 %.....</i>	<i>67</i>
<i>Obrázek 6.86 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 71 %.....</i>	<i>67</i>

<i>Obrázek 6.87 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 52 %</i>	68
<i>Obrázek 6.88 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 33 %</i>	68
<i>Obrázek 6.89 – vstupní model pro simulaci, pomocné horní zářezy, chladítka v celé délce, izometrický pohled</i> .	70
<i>Obrázek 6.90 – tepelné uzly, transparentní model</i>	70
<i>Obrázek 6.91 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 20 mm</i>	71
<i>Obrázek 6.92 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 35 mm</i>	71
<i>Obrázek 6.93 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 50 mm</i>	71
<i>Obrázek 6.94 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 65 mm</i>	72
<i>Obrázek 6.95 – tepelné uzly, řez rovinou Z ve výšce 80 mm</i>	72
<i>Obrázek 6.96 – tepelné uzly, řez rovinou X, kritické místo 1</i>	72
<i>Obrázek 6.97 – tepelné uzly, řez rovinou X, kritické místo 2</i>	73
<i>Obrázek 6.98 – tepelné uzly, řez rovinou X, kritické místo 3</i>	73
<i>Obrázek 6.99 – tepelné uzly, řez rovinou X, kritické místo 4</i>	73
<i>Obrázek 6.70 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 5 mm</i>	74
<i>Obrázek 6.71 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 20 mm</i>	74
<i>Obrázek 6.72 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 35 mm</i>	74
<i>Obrázek 6.73 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 50 mm</i>	75
<i>Obrázek 6.74 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 65 mm</i>	75
<i>Obrázek 6.75 – trhliny za tepla, řez rovinou Z ve výšce 80 mm</i>	75
<i>Obrázek 6.76 – celkové zbytkové pnutí v celém odlitku</i>	76
<i>Obrázek 6.77 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 46 %</i>	76
<i>Obrázek 6.78 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 37 %</i>	76
<i>Obrázek 6.79 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 31 %</i>	77
<i>Obrázek 6.80 – tuhnutí odlitku, řez rovinou Z výška 30 mm, likvid 21 %</i>	77
<i>Obrázek 7.1 – nejnižše položený tepelný uzel pro pátou simulační variantu</i>	80
<i>Obrázek 7.2 – riziko vzniku trhlin za tepla pro pátou simulační variantu</i>	80
<i>Obrázek 7.3 – zbytkové pnutí v odlitku pro pátou simulační variantu</i>	81

10 SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Rozdělení vad odlitků [1].....</i>	<i>3</i>
<i>Tabulka 2: Pevnost litin s lupínkovým grafitem v tahu [3].....</i>	<i>15</i>
<i>Tabulka 3: Rozsah legujících prvků pro běžně legovanou litinu [4].....</i>	<i>18</i>
<i>Tabulka 4: Mechanické vlastnosti na odděleně litych vzorcích Ø30 mm [3].....</i>	<i>18</i>
<i>Tabulka 5: Rozsah prvků pro vztah 3.2 [4].....</i>	<i>19</i>
<i>Tabulka 6: Přehled nepoužívanějších simulačních SW [5].....</i>	<i>22</i>
<i>Tabulka 8: Technologické parametry procesu.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 9: Technologické parametry procesu.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 10: Technologické parametry procesu.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 11: Technologické parametry procesu.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka 12: Technologické parametry procesu.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabulka 13: Technologické parametry procesu.....</i>	<i>70</i>

11 SEZNAM POUŽITÉHO SOFTWARE

SolidWorks 2015

NovaFlow&Solid 6.0r3 / 6.3r1

MS Word 2010