

Experimentální Analýza Napětí 2007

TRANSIENT THERMAL STRESS-STRAIN STATES IN THE MOLD FOR CONTINUOUS CASTING

TRANSIENTNÍ TEPLITNÍ NAPĚŤOVĚ DEFORMAČNÍ STAVY V KRYSTALIZÁTORU PRO PLYNULÉ ODLÉVÁNÍ

Karel Frydryšek¹, René Pyszko², Zdeněk Fojtík³, Lubomír Lacina⁴

Abstract: *There is a considerable temperature difference in the continuous casting mold wall between inner and outer surfaces as a consequence of high heat flux. Thermal stresses and consequently deformations occur even if they are undesirable from technological point of view. Dimensions stability as well as wear resistance of molds for continuous casting of steel is required together with high heat conductivity, while mold walls are exposed to both thermal and mechanical loads. The paper deals with two dimensional modelling of rectangular mold walls loaded by transient temperature fields, stresses and deformations and their comparing with experiments. In this case the thermal loads cause plastic deformations near the contact between the copper walls and the supporting steel wall and near the neighbour copper wall and bolts. During a process of continuous casting is impossible to measure the deformations of the inner walls of molds (gaps, pastic deformations, stress-strain states, etc.). These deformations etc. are possible to measure only when the mold is cold! The thermal loads also cause an undesirable misalignment and a gap forms in the corners. For the numerical solutions was used Finite Element Method (dynamic transient coupled analyses with mechanical and thermal contacs, heat transfers, material nonlinearities etc.).*

Keywords: *continuous casting, rectangular mold, transient analyses, temperature fields, plastic deformations, heat tranfer, coupled analyses, measurements in combination with FEM.*

1. Úvod

Plynulé odlévání (kontilití) představuje v současné době vysoce vyspělou technologii zpracování tekutých kovů, která zcela převládla nad klasickými výrobními postupy liti do kokil. Proces plynulého odlévání se významnou měrou podílí na snižování předváhy a spotřeby energie v ocelárnách s příznivým dopadem na ekologii.

Tekutá ocel, která je přistavena na zařízení plynulého odlévání (ZPO) v pánvi, vytéká do mezipánve, odkud je rozdělována do jednotlivých licích proudů. Prvním a nejdůležitějším uzlem licího proudu je krystalizátor, kde se vytváří první tuhá fáze ve formě licí kůry. Z krystalizátoru je plynule vytahován tzv. předlitek, který má ještě tekuté jádro. Krystalizátor osciluje v podélném směru a jeho stěny jsou mazány roztaveným licím práškem nebo olejem. Pod krystalizátorem je tzv. sekundární oblast chlazení s vodním ostřikem, kde se odvádí

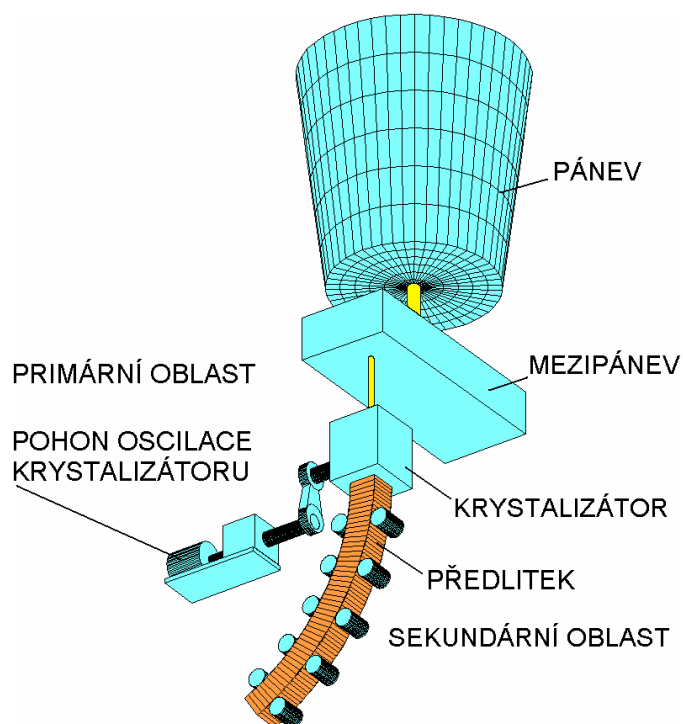
¹ MSc. Karel Frydryšek, Ph.D., ING-PAED IGIP: Department of Mechanics of Materials, Faculty of Mechanical Engineering, VŠB-Technical University of Ostrava, Třída 17. listopadu 15, Ostrava, 708 33, Czech Republic, tel.: +420 597324552, e-mail: karel.frydrysek@vsb.cz

² Ass. Prof. MSc. René Pyszko, Ph.D.: Department of Thermal Engineering, Faculty of Metallurgy and Material Engineering, VŠB-Technical University of Ostrava, Třída 17. listopadu 15, Ostrava, 708 33, Czech Republic, tel.: +420 597325170, e-mail: rene.pyszko@vsb.cz

³ MSc. Zdeněk Fojtík, Ph.D., DASFOS v.o.s., Božkova 45/914, 702 00 Ostrava 2 - Přívoz, Czech Republic, tel.: +420 596612092, fax: +420 596612094, e-mail: dasfos@mbox.vol.cz

⁴ MSc. Lubomír Lacina, Třinecké železářny a.s., Průmyslová 1000, 739 70, Třinec - Staré Město, Czech Republic, tel.: +420 558535265.

latentní teplo tuhnutí a celý průřez předlitku postupně tuhne, viz obr.1.1. Následuje terciární oblast chlazení, kde předlitek chladne volně na vzduchu při odvodu tepla konvekcí a sáláním.



Obr. 1.1 - Schéma technologického procesu kontilití.

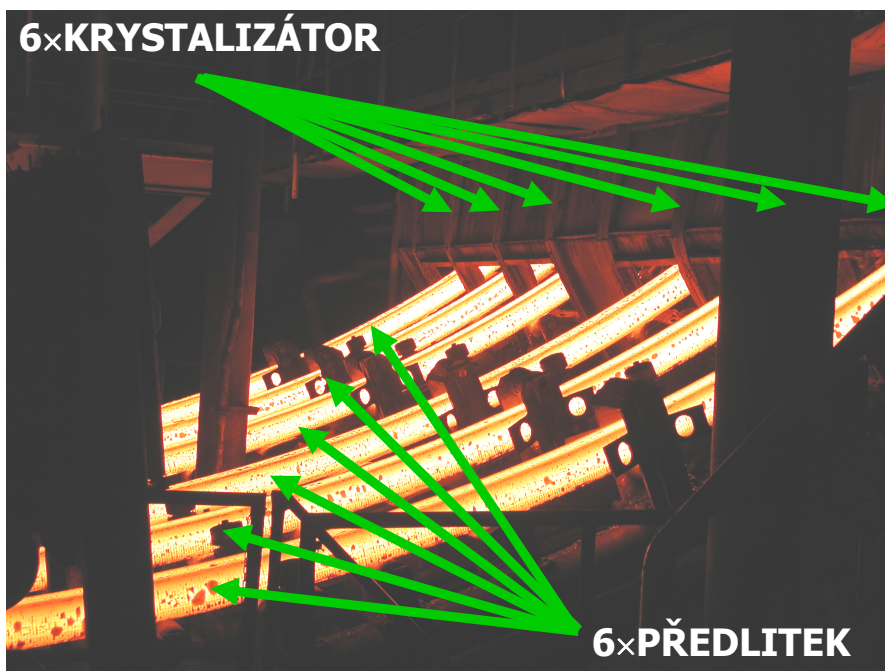
Hlavním předpokladem jakostní výroby je dokonalá tepelná práce krystalizátoru. Vady předlitků typu nerovnoměrného chemického složení, vnitřní i vnější trhliny, povrchové vady typu zatavených hnízd licího prášku, chyby tvaru a další mají svou prvotní příčinu v krystalizátoru.

Krystalizátor má tedy zásadní vliv na kvalitu předlitku, zejména na povrchovou kvalitu a možný vznik trhlín. Zvláště nežádoucí jsou trhliny v licí kůře, způsobené teplotním pnutím a mechanickým namáháním, které mohou vést až k přetržení kůry a průvalu. Průval je situace kdy kůra předlitku praskne a tekutý kov přímo vytéká z poškozeného předlitku a výroba musí být okamžitě zastavena, což je vždy spojeno s poměrně vysokými ekonomickými ztrátami. Teplotní pnutí v kůře je vyvoláno nerovnoměrným smrštěním při nesymetrickém a nadměrně

intenzivním chlazením. Hlavní příčinou mechanického namáhání kůry je tření v krystalizátoru. Deformace a opotřebení stěn krystalizátoru mohou mít vliv na tvarové chyby předlitku, vznik podélných rýh v licí kůře, nadměrných oscilačních vrásek apod. Nebezpečný je také vliv tvarových změn krystalizátoru na snížení odvodu tepla z důvodu vzniku nadměrné mezery mezi licí kůrou a stěnou krystalizátoru.

Kvalita produkce a bezpečnost výroby z hlediska vzniku průvalů souvisí jednak s technologií odlévání, ale také s celou konstrukcí a seřízením licího stroje. Oba aspekty jsou stále předmětem častého vývoje a zdokonalování. **Složitost procesů při plynulém lití oceli téměř nedovoluje zobecňování a přenositelnost výsledků z jednoho zařízení na druhé, dokonce na tomtéž licím stroji jsou zcela jiné podmínky při odlévání různých formátů nebo různých značek ocelí !**

Experimentální výzkum je velmi obtížný a to z důvodu vysokých teplot a nebezpečí plynoucího z přítomnosti tekuté oceli v těsné blízkosti chladicí vody. Konstrukční úpravy zařízení před každým experimentem jsou nákladné a mohou zdržovat výrobu. Experimentální výzkum proto musí vždy probíhat v součinnosti výrobního podniku s experimentátorským pracovištěm, které se musí podřídít prioritám výroby. **Vedle experimentálního výzkumu má svou nezastupitelnou pozici také matematické modelování (MKP atp.).**



Obr. 1.2 - Plynulé odlévání v průmyslovém podniku.

Moderní trend zvyšování lících rychlostí, viz obr.1.2, klade náročné požadavky na stěny krystalizátorů pro plynulé odlévání oceli. U krystalizátorů je vyžadována stálost rozměrů a odolnost vůči opotřebení při použití materiálu o vysoké tepelné vodivosti. Stěny kokil krystalizátorů jsou vystaveny extrémnímu tepelnému a mechanickému namáhání. V kokile je značný teplotní rozdíl mezi vnějším a vnitřním povrchem, který je důsledkem velké hustoty tepelného toku. Tím vznikají teplotní pnutí a deformace, které jsou z hlediska technologie nežádoucí.

Krystalizátory jsou vyřazovány z provozu v podstatě ze dvou důvodů:

1. Vlivem ztráty konicity, která je způsobena opotřebením, zejména ve spodní části krystalizátoru;
2. Vlivem trvalé deformace stěn kokil krystalizátoru. Největší deformace se objevují v oblasti hladiny oceli a těsně pod ní.

Materiálem pro výrobu krystalizátorů je měď, obvykle legovaná malým množstvím přísad zejména pro zvýšení tvrdosti povrchu a odolnosti vůči opotřebení, současně se dosahuje také zvýšení rekrystalizační teploty. Jedná se zejména o legující prvky P, Ag, Cr, Zr, Co a Be.

Legování mědi s cílem zvýšení odolnosti vůči opotřebení a zvýšení rekrystalizační teploty je opodstatněno snahou o prodloužení životnosti krystalizátorové vložky a snižování finančních nákladů, které jsou v případě měděných krystalizátorů nemalé. Legováním mědi se zpomaluje opotřebení stěn vlivem abrazivních účinků lící kůry a lícího prášku. Současně se legováním mědi zvýší modul pružnosti, mez kluzu a mez pevnosti materiálu. Legování mědi na druhé straně významně snižuje součinitel tepelné vodivosti, zatímco vliv legujících přísad na koeficient teplotní roztažnosti materiálu je minimální.

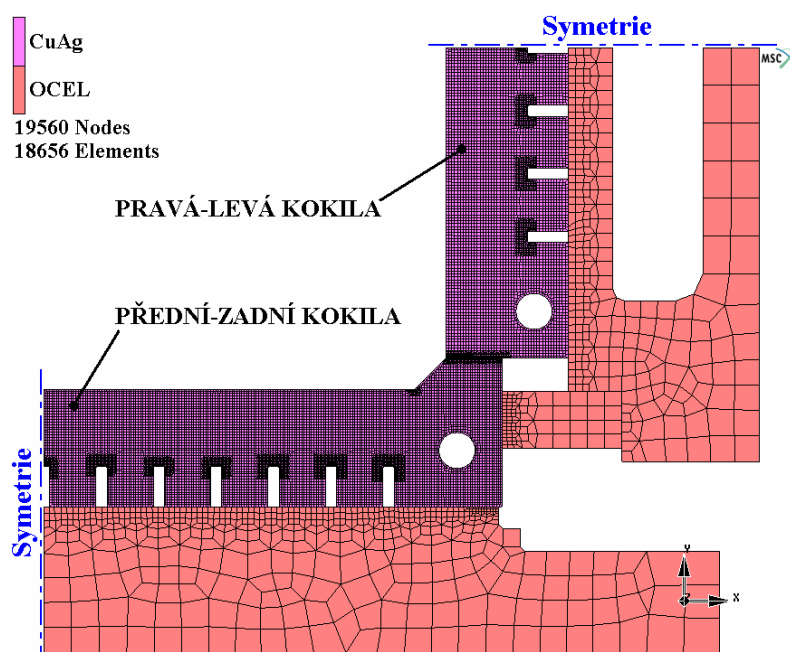
Legováním vzroste teplotní gradient ve stěně (při stejné hodnotě hustoty tepelného toku), a to z důvodu snížení součinitele tepelné vodivosti. Jelikož součinitel teplotní roztažnosti se významně nemění, při větším teplotním gradientu vzniká větší teplotní pnutí a větší deformace, než v případě stěny z nelegované mědi. Ačkoli legovaný materiál má vyšší mez kluzu, neznamená to, že jádro z legovaného materiálu bude odolnější vůči trvalým deformacím, než v případě použití nelegovaných měděných stěn.

Příspěvek se zabývá modelováním pnutí a deformací celého jádra pravoúhlého (deskového) krystalizátoru. Plastické deformace převážně vznikají v místech vzájemného kontaktu měděných kokil. Po skončení lití a vychladnutí kokily je možno na reálných krystalizátorech pozorovat spáru v rozích krystalizátoru v místě kontaktu kokil, a také průhyb desek a otlacení materiálu pod hlavami šroubů a jejich časté uvolňování.

Z předchozího plyne, že řešení problému plastických deformací stěn krystalizátoru nespočívá pouze ve volbě materiálu desky. Technické řešení představuje velmi náročný konstrukční problém, který zahrnuje vědní disciplíny pružnosti-pevnosti a plasticity, tepelné techniky, materiálového inženýrství a numerických metod. Jde o nalezení optimálního řešení chlazení, dále o nalezení optimálního tvaru kokil a opěrných desek, dále o způsob upevnění k opěrné desce a hlavně o konstrukčním sestavení celého jádra. Řešení problému je obtížné, neboť fyzikální zákony nelze obejít a teplotní gradient, stejně jako nerovnoměrnou teplotní roztažnost ve stěně a následné pnutí, nelze vyloučit.

Příspěvek si klade za cíl provést první krok celého řešení, a to simulaci aktuálního stavu jádra deskového krystalizátoru. Cílem modelování je vysvětlení mechanismu vzniku spáry, která je pozorovatelná za studena a je důsledkem trvalých deformací, které vznikají při lití. Jelikož při lití je problematické změřit deformace stěn, nastupují numerické metody (MKP a v tomto případě komerční software MSC.MARC/MENTAT 2005r3) jako účinný nástroj pro vědu, výzkum a také ověřování konstrukce.

2. Rovinný model deskového krystalizátoru (MKP)



Obr. 2.1 - Rovinný model sítě konečných prvků soustavy jádra krystalizátoru.

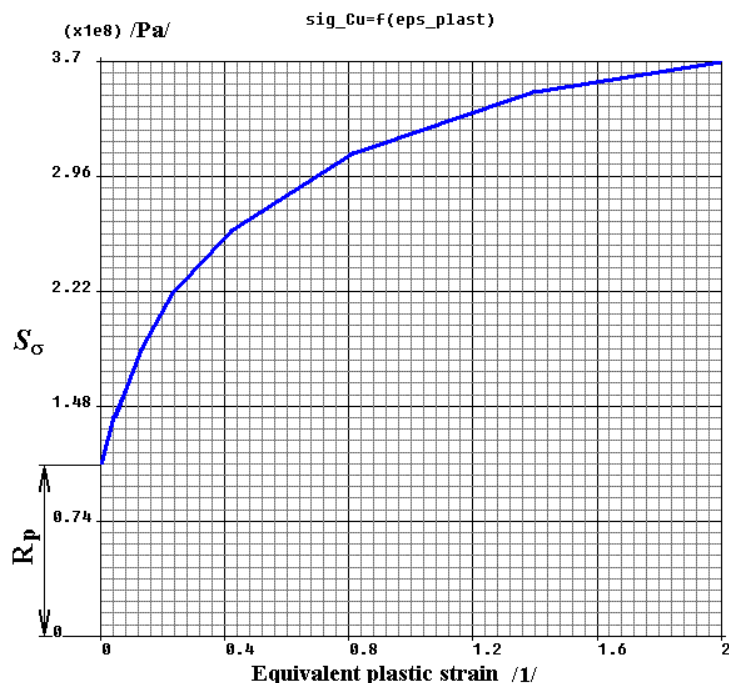
Existuje řada metod pro matematické modelování teplotních polí, napětí a deformací [1]. Pro řešení byla využita metoda konečných prvků, konkrétně program MSC.MARC/MENTAT 2005 r3, který je dostupný na katedře pružnosti a pevnosti, Fakultě strojní, VŠB-TU Ostrava.

Jádro deskového krystalizátoru je tvořeno čtyřmi měděnými kokilami, které jsou pevně spojeny šrouby s ocelovými opěrnými deskami. Vzhledem k tomu, že čtveřice stěn tvoří jeden celek symetrický podle dvou kolmých rovin, vedených podélnými osami stěn kokily

(zanedbáme-li rádiusy stěn a konicitu vnitřního rozměru v podélném směru), postačí řešit jednu čtvrtinu jádra krystalizátoru. Tím se také zjednoduší řešení celé úlohy. Podle zadaných obecných rozměrů dle výkresové dokumentace a na základě přijatých zjednodušení byla vytvořena rovinná síť konečných prvků, viz obr. 2.1.

Model byl nejprve řešen jako dvourozměrný (2D). Při tvorbě celého modelu (rovinná deformace) byly použity rovinné elementy se čtyřmi uzly a třemi stupni volnosti (tj. posunutími u , v a teplotou T) v každém uzlu elementu.

Cílem modelování bylo zatím získat informace o směru posunutí a pouze kvalitativní informace o vzniku plastických deformací, nikoli o jejich absolutních velikostech. Důvodem je to, že 2D model představuje poměrně značné zjednodušení oproti realitě, navíc také v době řešení nebyly známy termofyzikální vlastnosti konkrétních materiálů na teplotě. Avšak vypočtené hodnoty otláčení desek za studena je nutné porovnat s měřením těchto otláčení. **Měření otláčení je možno provádět pouze za studena!**



Obr. 2.2 - Závislost ekvivalentního napětí na ekvivalentní plastické deformaci zvolená pro materiál CuAg.

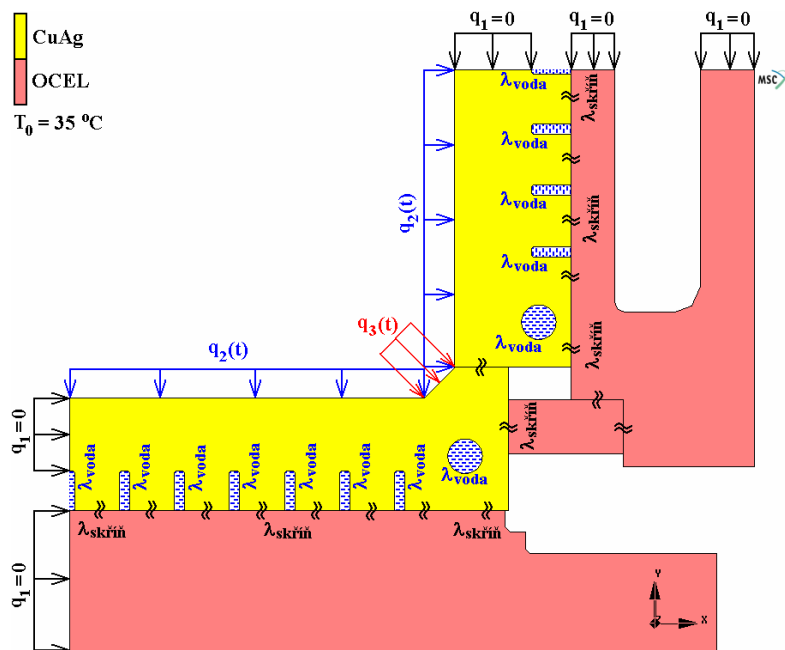
Jako materiál kokil byla pro model zvolena měď legovaná stříbrem (CuAg).

Materiál opěrných desek je ocel, která je v modelu považována za elastický materiál vyhovující Hookeově zákonu. Slitina CuAg je považována za elasto-plastický materiál s kinematickým zpevněním. Závislost ekvivalentního napětí S_σ na ekvivalentní plastické deformaci byla pro materiál CuAg zvolena tak, jak je patrné z obrázku 2.2, kde R_p /Pa/ je mez kluzu.

Termofyzikální parametry oceli a materiálu CuAg jsou prozatím idealizovány a jsou považovány jako nezávislé na teplotě. Jedná se o modul pružnosti, Poissonovo číslo, součinitel tepelné roztažnosti, mez kluzu, součinitel tepelné vodivosti a měrnou tepelnou kapacitu. Teplota ocelových desek se mění zanedbatelně, proto závislosti termofyzikálních vlastností na teplotě není potřeba znát.

Pro zahrnutí vlivu teploty na termomechanické veličiny materiálu CuAg by bylo nutno provést experimenty se vzorky při teplotách alespoň do 400 °C, a to na trhačím stroji, případně na přístrojích pro stanovení součinitele teplotní vodivosti, teplotní dilatace atd.

Schéma tepelných okrajových podmínek je na obrázku 2.3. Model je koncipován jako nestacionární



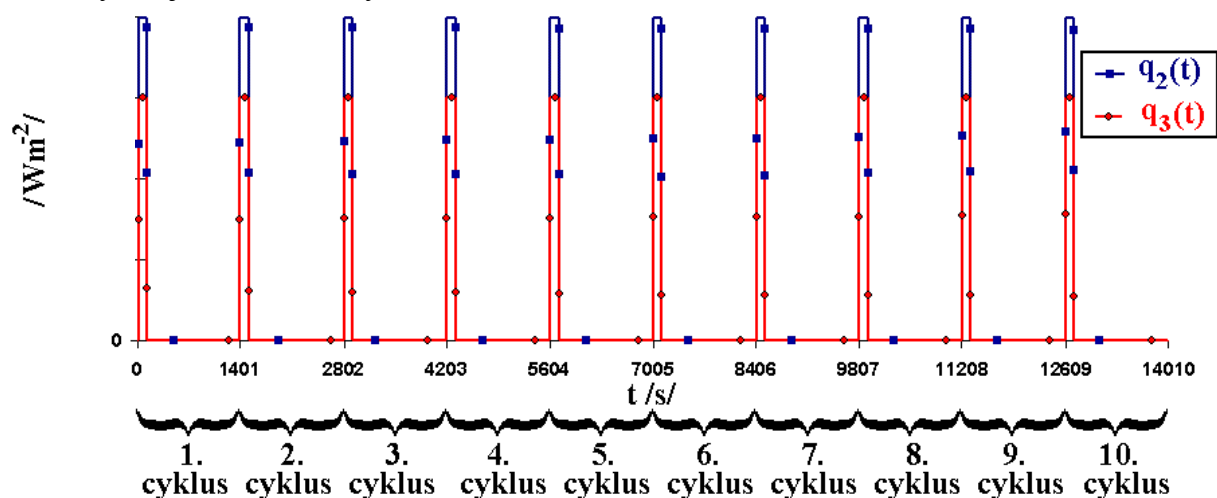
Obr. 2.3 - Schéma tepelných okrajových podmínek soustavy jádra krystalizátoru.

a simuluje deset cyklů, které začínají ohřevem z počáteční teploty do ustálení (dosažení

maximální teploty) ve stavu odlévání a končí následným chladnutím na teplotu blízkou se počáteční teplotě (ochladnutí na konci technologického procesu).

Ohřev na ustálenou teplotu trvá asi 2.02 minuty, ochlazování asi 21.33 minut. V souladu s tím se mění v čase okrajové podmínky na pracovním povrchu měděných kokil. V řezech procházejících rovinou symetrie jsou nulové tepelné toky $q_1 = 0 \text{ Wm}^{-2}$. Na rovné ploše měděné kokily je při liti zavedena hustota tepelného toku $q_2(t)$ a v rohu je snižovaná hodnota $q_3(t)$. Jsou to tepelné toky obvyklé pro oblast těsně pod hladinou oceli v krystalizátoru, kde je největší tepelné zatížení desek [3], [4], [5]. V době ochlazování jsou hustoty tepelných toků na pracovním povrchu nulové a teplo akumulované ve stěnách se odvádí do chladicí vody.

Časové závislosti hustot tepelných toků (řádově megawaty !), které působí na pracovním povrchu kokil, a které souvisí s ohřevem na ustálenou teplotu a následným ochlazením pro deset cyklů, jsou znázorněny na obrázku 2.4.



Obr. 2.4 - Časová závislost hustot tepelných toků na vnitřní stěně kokily.

Přenos tepla z opěrných desek do okolního vzduchu, který byl také uvažován, se děje především volnou konvekcí a má vzhledem k malému teplotnímu rozdílu velmi malý vliv na výsledné rozložení teplot.

Desky jsou intenzivně chlazeny vodou protékající v drážkách mezi měděnými a opěrnými deskami a ve vrtaných kanálech. Součinitele přestupu tepla do chladicí vody v drážkách a kanálech byly stanoveny na základě kritériálních rovnic pro Nusseltovo kritérium v závislosti na Reynoldsově a Prandtlově kritériu [2]. Pro úvodní výpočty byla použita konstantní hodnota. Přestup tepla do ocelových opěrných desek se děje přes kontaktní plochy, které však nejsou ideálním tepelným vodičem z důvodů, jako jsou nečistoty na plochách, oxidy a zejména nedokonalost styku, která je způsobená také deformací desek a šroubů. Složitý přestup tepla mezi kontaktními plochami byl prozatím modelován ekvivalentním součinitelem přestupu tepla s konstantní hodnotou. Počáteční teplota celého systému těles je rovna teplotě chladicí vody.

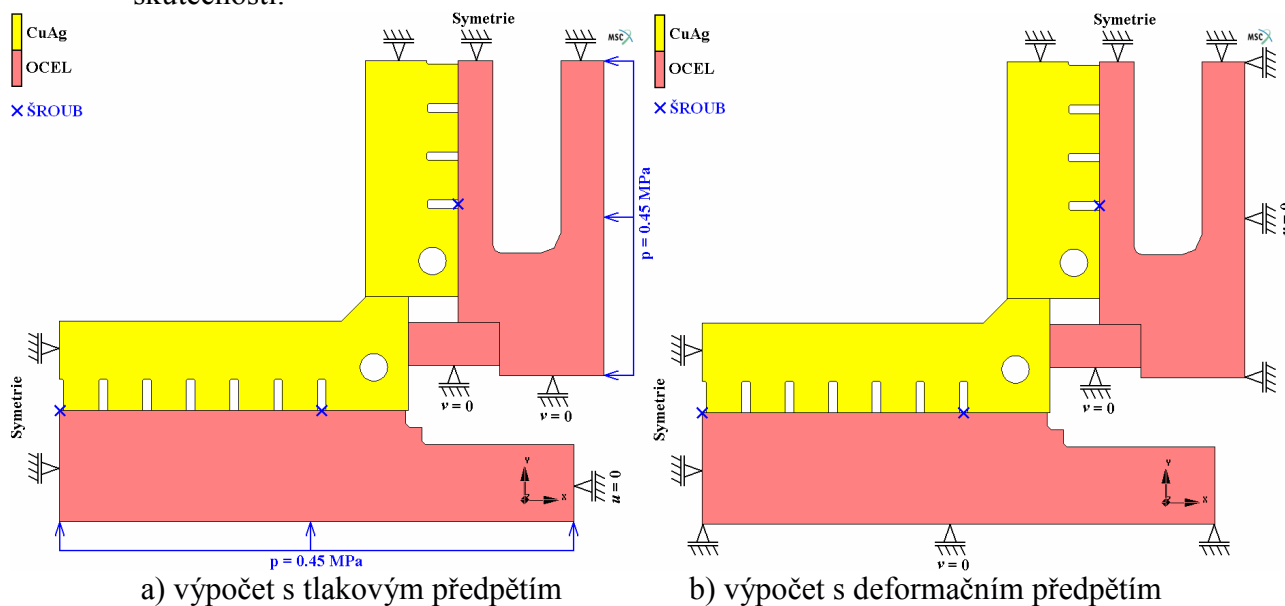
Mezi CuAg kokilami a ocelovými opěrnými deskami je zadán mechanický a tepelný kontakt se slabým Coulombovým třením. Jde tedy o výpočtovou nelinearitu. Šroubové spojení mezi opěrnými ocelovými deskami a měděnými kokilami je ve 2D modelu nahrazeno ztotožněním několika příslušných uzlů v místech šroubů. Jde o pružné spojení bez přidavného předpětí. Tloušťka dvojrozměrného modelu odpovídá výšce jádra krystalizátoru 0.7 m ve směru osy Z.

Čtyři měděné kokily spolu s opěrnými deskami jsou dle původní výkresové dokumentace spojeny do kompletního jádra pomocí šroubů s pružinami, které zajišťují trvalé předpětí a

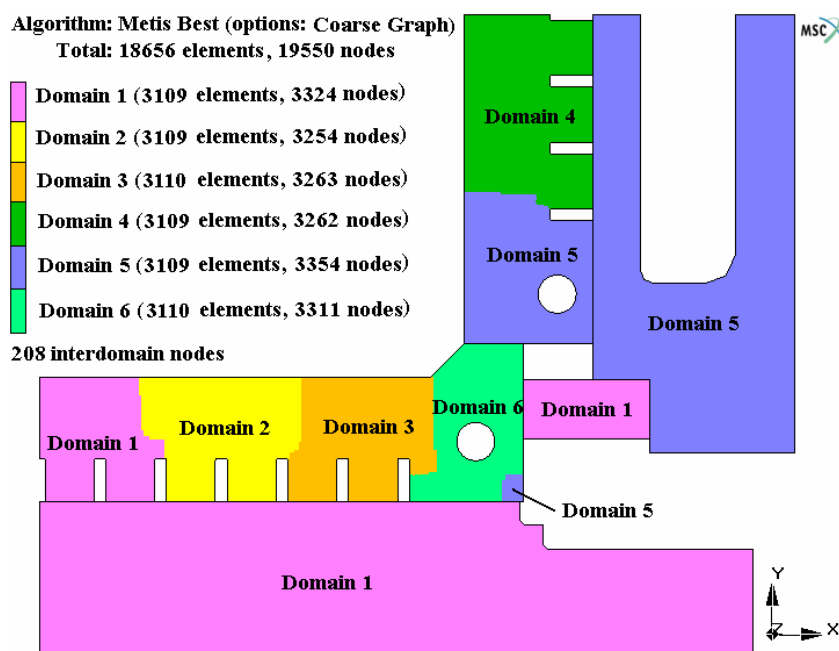
umožňují teplotní dilatace sestavy. Mechanické okrajové podmínky jsou schématicky znázorněny na obrázku 2.5.

Jelikož do 2D modelu nelze zahrnout jednotlivé šrouby, rozmístěné na desce v podélném směru, je předpětí nahrazeno dvěma způsoby:

- Konstantním tlakem p na celé vnější plochy opěrné desky, viz obr.2.5a). Toto zjednodušení je zřejmě spodním odhadem skutečnosti, neboť reálný tlak na stěnu je závislý i na velikosti deformace šroubů a pružin pod hlavami šroubů, a tudíž není ve skutečnosti konstantní, ale závisí na teplotním poli celé sestavy.
- Zadáním nulových posunutí vertikálních směrů (v jednom případě $u = 0$ a v druhém případě $v = 0$, viz obr.2.5b). Toto zjednodušení je zřejmě horním odhadem skutečnosti.



Obr. 2.5 - Schéma mechanických okrajových podmínek pro dvě varianty výpočtu.



Obr. 2.6 - Schéma rozdělení sítě konečných prvků při využití paralelního řešení na šesti procesorech (aplikace rychlého řešení pomocí MKP).

Podstatným zjednodušením je také uvažování rovinné deformace. V trojrozměrném modelu by měly být teplotní i mechanické okrajové podmínky proměnné i po výšce krystalizátoru. Trojrozměrný (3D) model je již vyvíjen také, viz [6].

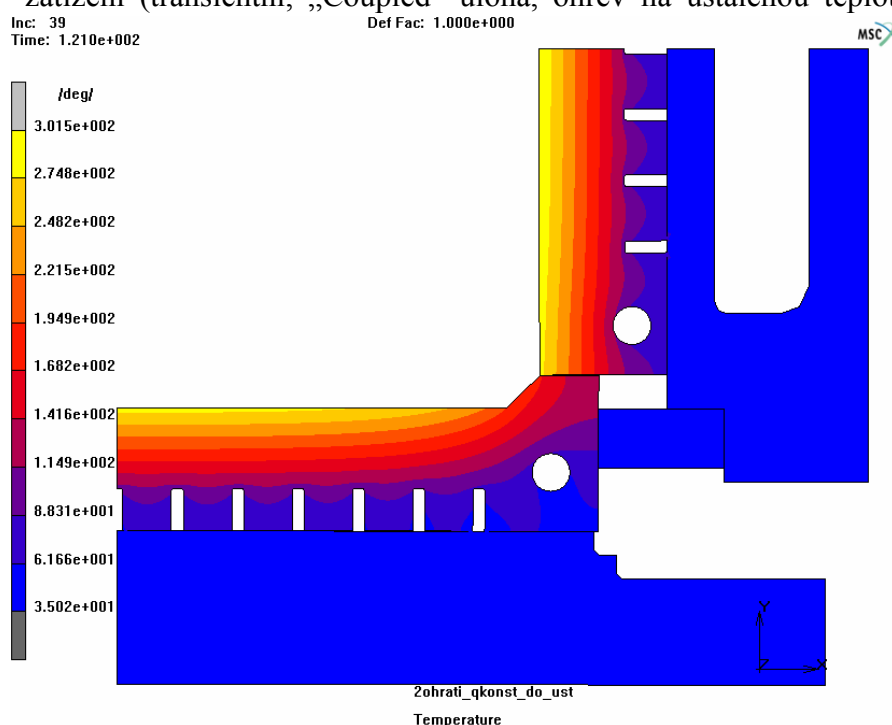
Z důvodu časové náročnosti výpočtů velmi složité úlohy, byl pro výpočet použit víceprocesorový superpočítač a celá úloha byla efektivněji řešena na šesti procesorech paralelně s velmi výrazným zkrácením celé doby řešení. Schéma distribuce sítě konečných prvků na jednotlivé procesory je znázorněno na obr.2.6.

3. Výsledky řešení rovinného modelu deskového krystalizátoru (MKP)

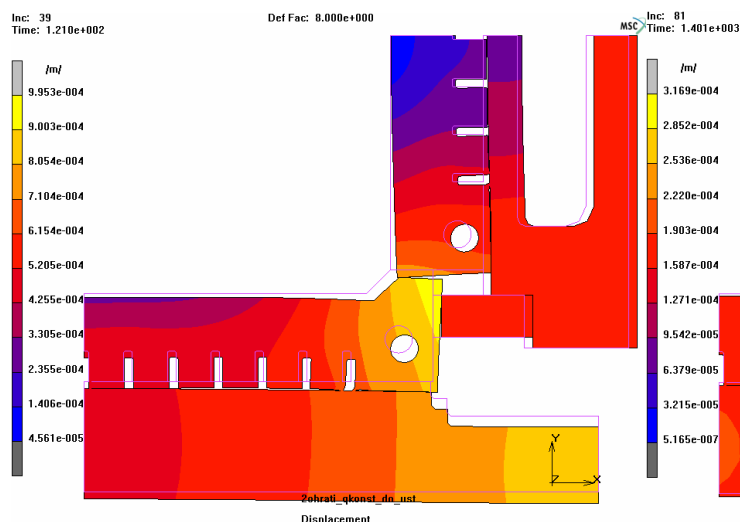
V souladu s předpoklady uvedenými v kapitole 2, byla pomocí počítače (metoda konečných prvků) vyřešena napjatost vyvolaná dynamickou cyklickou změnou teplotního zatížení (transientní, „Coupled“ úloha, ohřev na ustálenou teplotu pomocí tepelných toků $q_2(t)$, $q_3(t)$ a následný samovolný pokles teploty na počáteční hodnotu, vše se 10×opakuje).

Při řešení varianty a) byly výsledky počítány a ukládány v 830 krocích proměnlivé velikosti. Podobně, při řešení varianty b) byly výsledky počítány a ukládány v 832 krocích proměnlivé velikosti.

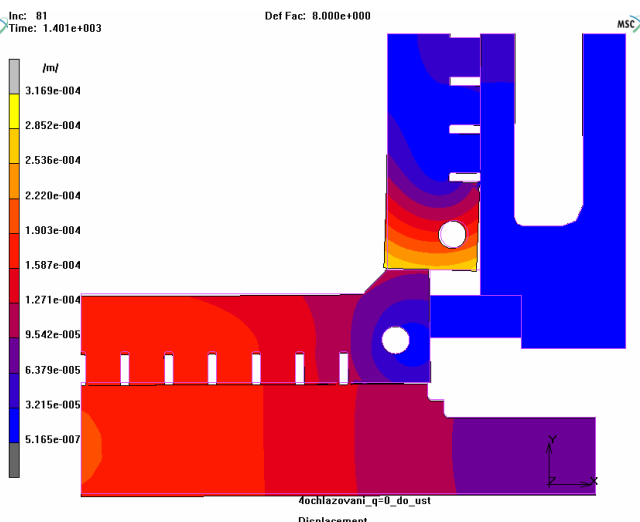
Ukázka rozložení teploty v jadru krystalizátoru je znázorněna na obr.3.1.



Obr.3.1 - Teplotní pole ve stavu ohřátí.



Obr.3.2 - Posunutí při $T=T_{\max}$ (8×zvětšeno).



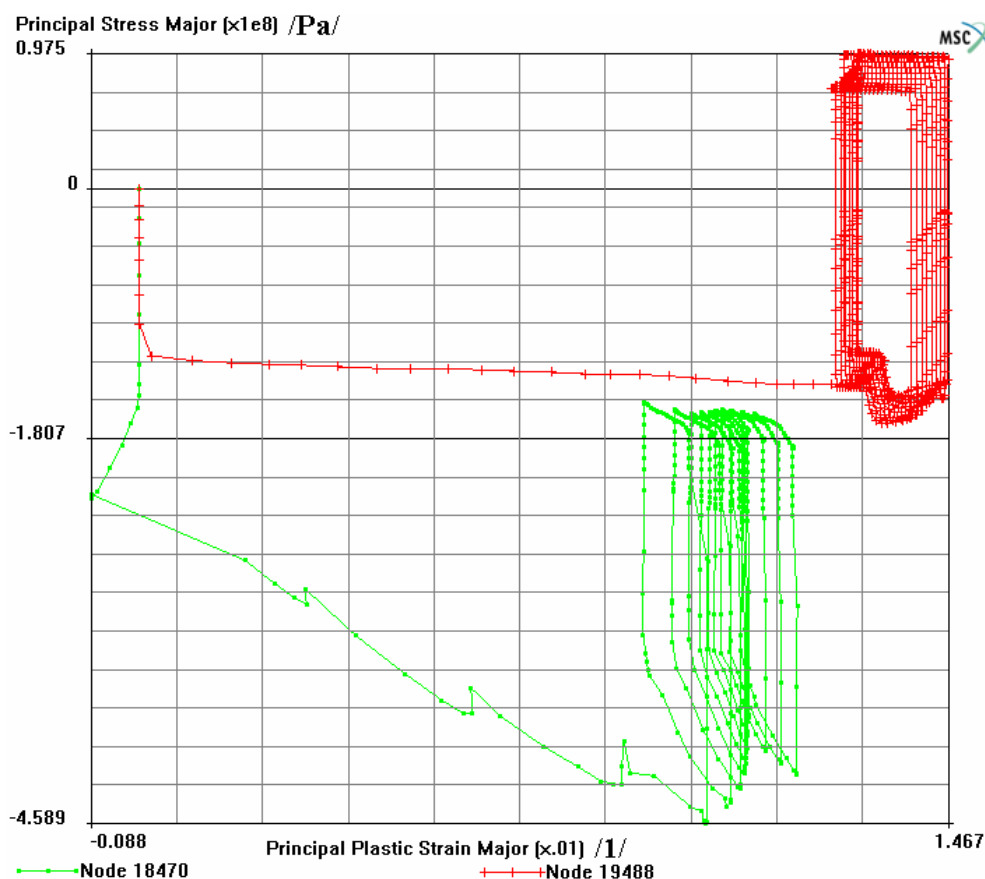
Obr.3.3 - Posunutí při $T=T_0$ (8×zvětšeno).

Podobně ukázky výsledného posunutí, které je porovnáno s původními rozměry, je znázorněno na obr.3.2 (ohřátí) a na obr.3.3 (ochlazení). Deformovaná soustava je vykreslena pro lepší zřetelnost v osminásobném zvětšení.

V místě kontaktu kokil dochází k trvalému otláčení. Na reálných krystalizátorech je po skončení lití patrná spára mezi kokily v tomto místě. Spára se s počtem technologických (tepelných) cyklů zvětšuje.

Samotná spára ve stavu za studena nepředstavuje technologický problém, důležité je však vysvětlení mechanismu jejího vzniku. **Spára je důsledkem stavu při lití, který je obtížné objektivně měřit.** Při odlévání dochází vlivem tepelného zatížení k prohnutí měděných kokil směrem dovnitř krystalizátoru a jejich otláčení v místě kontaktu v rohu krystalizátoru. Navíc dochází k vzájemnému přesazení hran kokil, které může v provozu způsobovat problémy v důsledku lokálního zavěšování kůry, vznik zárodků trhlin a podélné rýhy na předlitku.

Z výsledků je také patrný výskyt plastických deformací v místě kontaktu dvou měděných kokil. Tato plastická deformace se mění s ohřevem i ochlazením a také s počtem cyklů, viz např. obr.3.4, kde je znázorněn průběh majoritních hlavních napětí v závislosti na majoritní hlavní plastické deformaci. **Výpočty tedy prokázaly pulzující plastické deformace v místě vzájemného styku kokil !**

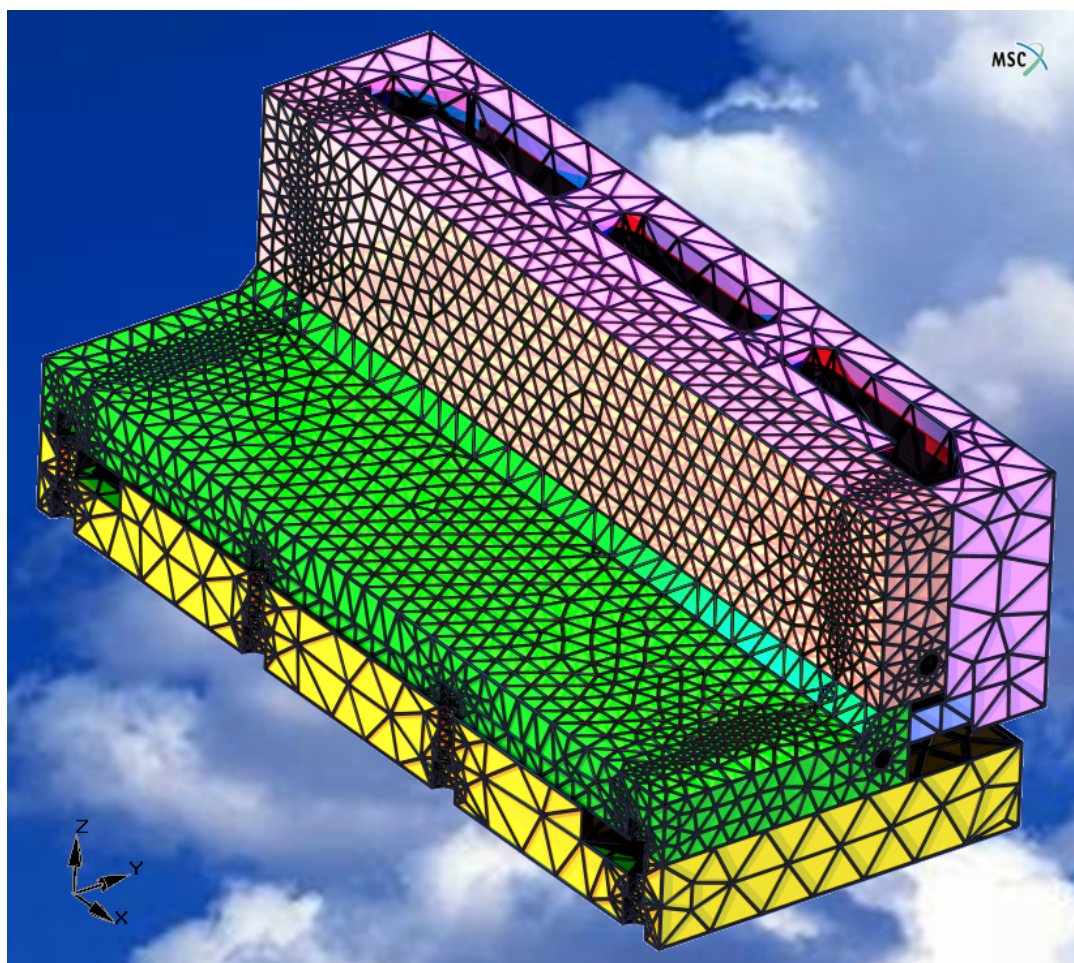


Obr.3.4 - Cyklická změna majoritních hodnot hlavních napětí v závislosti na majoritních hodnotách hlavních plastických deformací (místa vzájemného styku kokil).

Více informací o řešení této úlohy lze nalézt v [5] a [7].

Výzkum bude dále pokračovat na 3D modelu, viz obr.3.5 a literatura [6], který umožní zahrnutí proměnné hustoty tepelného toku v deskách v podélném směru, zahrnutí šroubů do modelu včetně pružin a podložek pod hlavou šroubů. Bude ověřena varianta se šroubovým

spojením desek bez pružných elementů, která byla experimentálně ověřena v provozu s relativně dobrým výsledkem. Případné konstrukční návrhy dalších úprav desek budou postupně ověřovány na modelu.



Obr.3.5 - 3D model jádra krystalizátoru.

4. Závěr

Pružně-plastické deformace stěn krystalizátoru jsou objektivně dány a nelze je úplně eliminovat, avšak lze je vhodnou konstrukcí snížit. Vysoká hustota tepelného toku ve stěnách má za následek velké teplotní gradienty, teplotní pnutí a deformace. Krystalizátor je totiž opakovaně vystaven cyklickému tepelnému zatížení. Nepracuje při konstantních podmínkách, neboť při lití dochází ke změnám parametrů lití a po ukončení lití krystalizátor vychladne a teplotní pole se zrovnoměří. Ačkoli dilatace stěn jsou objektivně nutné, jsou nežádoucí z hlediska požadavků na stálost tvaru a rozměrů krystalizátoru, těsnost proti úniku chladicí vody apod. Legováním mědi se dosahuje vyšší meze kluzu, a tedy vznik plastických deformací je posunut k vyšším napětím, avšak současně klesá hodnota součinitele tepelné vodivosti. Tím roste teplotní gradient ve stěně kokily a současně teplotní pnutí. Řešení problému je tedy nutno hledat nejen v oblasti materiálové, ale zejména konstrukční.

Modelováním byl vysvětlen mechanismus vzniku spáry v místě kontaktu dvou měděných desek v rohu krystalizátoru. Bylo zjištěno, že při lití se sice spára uzavírá, ale vzniká vzájemné přesazení hran měděných desek, které může způsobovat lokální zavěšování kůry, vznik zárodků trhlin a podélné rýhy na předlitku a tím jeho znehodnocení.

Získané výsledky současné konstrukce krystalizátoru jsou podkladem pro novou konstrukční variantu deskového krystalizátoru, viz [7] a [8]. Vypočtené výsledky dobře korespondují s experimentálním měřením.

Z důvodu požadovaného utajení (komerční spolupráce s průmyslem) nejsou v tomto článku uvedeny žádné rozhodující parametry stanovené z experimentů nebo numerických výpočtů. V případě potřeby znalosti těchto dat prosím kontaktujte firmy DASFOS v.o.s.v Ostravě nebo Třinecké železářny a.s. v Třinci.

Výzkum dále pokračuje také na novějších 2D a 3D modelech, na kterých budou ověřovány případné konstrukční návrhy úprav jádra krystalizátoru, viz [6], [8].

Tento článek byl řešen v rámci projektu MPO FI-IM2/43.

Literatura

- [1] Kuneš, J.: *Základy modelování*, 1. vyd. Praha: SNTL, 1989, pp. 264.
- [2] Příhoda, M., Pyszko, R., Molínek, J., Velička, M., Pivovarčí, M.: *Zákonitosti růstu lící kůry v krystalizátoru ZPO (Principles of the shell growth in CC mould)*, Hutnické listy LVII, 2002, č. 4–5, p. 17–23. ISSN 0018–8069.
- [3] Příhoda, M., Pyszko, R., Molínek, J.: *Parabolický zákon tuhnutí při plynulém odlévání oceli*, In Sborník referátů XXI. mezinárodní konference kateder a pracovišť mechaniky tekutin a termomechaniky. SPU v Nitře. Račková dolina – Západní Tatry, 5.–7. 6. 2002, p. 80–85. ISBN 80–8069–037–5.
- [4] Příhoda, M., Molínek, J., Pyszko, R., Velička, M.: *Vliv technologických parametrů na tepelné procesy v krystalizátoru ZPO*, In Sborník referátů XXIII. mezinárodní vědecké konference kateder a pracovišť mechaniky tekutin a termomechaniky. TU ve Zvolenu. Banská Štiavnica, 23.–25. 6. 2004, p. 88–93. ISBN 80–228–1333–8.
- [5] Frydryšek, K.: *Řešení 2D úlohy nestacionárních tepelně napěťových stavů deskového krystalizátoru 300×500* (výpočtová zpráva), FS VŠB-TU Ostrava, katedra pružnosti a pevnosti, Ostrava, 2006, pp.24.
- [6] Frydryšek, K.: *Řešení 3D úlohy nestacionárních tepelně napěťových stavů deskového krystalizátoru 300×500* (výpočtová zpráva), Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava, katedra pružnosti a pevnosti, Ostrava, 2006, pp.33.
- [7] Frydryšek, K.: *Řešení 2D úlohy nestacionárních tepelně napěťových cyklických stavů deskového krystalizátoru 300×500 - původní konstrukční varianta* (výpočtová zpráva), Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava, katedra pružnosti a pevnosti, Ostrava, 2007, pp.30.
- [8] Frydryšek, K.: *Řešení 2D úlohy nestacionárních tepelně napěťových cyklických stavů deskového krystalizátoru 300×500 - nová konstrukční varianta a její zhodnocení* (výpočtová zpráva), Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava, katedra pružnosti a pevnosti, Ostrava, 2007, pp.33.