

SOLUTION OF THE INVERSE HEAT TRANSFER PROBLEM IN THE MOLD WALL AT CONCASTING

Jaromír HEGER•

Summary: A three parametric sensitiveness analysis of the temperature steady state in the mold wall was performed by the finite element analysis. The temperature distribution was studied in the dependence on the wall thickness, heat flow through the wall and on the water film coefficient. The goal of this inverse heat transfer problem was to find generally various heat flows through the long and short cooper mold wall that satisfy the overall heat balance equation and that using the same but unknown water coefficient in cooling grooves of both walls will evoke such temperature at the thermocouple location that corresponds to the experiment. It was necessary to take into account that thermocouples in long mold walls are located at different depths from the outer surface than in short walls and that both walls have different thickness. The gained results proved a good agreement with experimental values. Moreover the inner surface mold temperature was received which is an important input parameter for the temperature calculation of the steel solidification during the concasting process.

1. ÚVOD

Přechod od klasického kokilového lití k progresivní technologii plynulého odlévání je celosvětovým trendem. V první fázi kontinuálního odlévání prochází proud tekutého kovu krystalizátorem, jehož úkolem je odebrat z tvořícího se kontislitku takové množství tepla, aby se na jeho povrchu vytvořila dostatečně silná kůra ztuhlého kovu. Kontislitek postupně klesá a po výstupu z něho je odváděn válečkovým dopravníkem a průběžně ochlazován systémem vodních trysek. Po úplném ztuhnutí jádra kontislitku je nekonečný pás ztuhlého kovu oddělen řezáním autogenem na části požadované délky.

Vlastní krystalizátor je nepohybující se forma délky 904 mm vytvořená z měděných desek uspořádaných tak, aby jejich vzájemným přestavením bylo možno vytvořit požadovaný obdélníkový profil kontislitku. Vnější povrch krystalizátoru je vybaven podélnými periodicky rozmístěnými drážkami, kterými protéká chladící voda. Vytvoření průtočných kanálků pro chladící vodu je provedeno utěsněním přítlačnými ocelovými deskami, které přiléhají k vnějšímu povrchu krystalizátoru.

Úkolem provedené studie bylo zjistit rozložení teplot v řezu krystalizátorem procházejícím polovinou jeho výšky, ve kterém jsou známy experimentálně zjištěné teploty. Z tepelné bilance

[•] Ing. Jaromír Heger, CSc.: Ústav mechaniky těles, Vysoké učení technické Brno,

Fakulta strojního inženýrství, Technická 2, 616 69 Brno; tel.: 420-5-41142888, fax: 420-5-41142876 E-mail: heger@umtn.fme.vutbr.cz

přenosu tepla v krystalizátoru [1] byl zjištěn průměrný měrný tepelný tok pro přenos tepla vnitřní stěnou krystalizátoru $q = 773 869 \text{ Wm}^{-2}$.

2. DVOUROZMĚRNÝ KONEČNOPRVKOVÝ MODEL

K nalezení rozložení teplot ve stěně krystalizátoru byl vytvořen rovinný model pro výpočet metodou konečných prvků (MKP), který modeluje průměrný přenos tepla stěnou krystalizátoru. Periodičnost uspořádání chladících kanálků v obvodovém směru krystalizátoru umožňuje k modelování použít symetrický výřez o tloušť stěny krystalizátoru a ocelové přítlačné desky, které jsou přilehlé k jednomu z chladících kanálků.

Při uvažovaných rozměrech chladících kanálků 5x22 mm a tloušťce stěny krystalizátoru 60 mm byla uvažována teplota chladící vody v krystalizátoru 25°C. Součinitel přestupu tepla na straně vody α_v při kontinuálním odlévání je v důsledku existence bublinkového varu na vnitřním povrchu chladících kanálků hodně vysoký. V literatuře jsou uváděny hodnoty až 22 kWm⁻²K⁻¹.

Použití uvedených údajů v konečnoprvkovém modelu však vedlo k diametrálně odlišnému rozložení teplot v modelované oblasti než odpovídá výsledkům změřených teplot ve stěně krystalizátoru. Teplota v místě termočlánku na dlouhé stěně krystalizátoru dosáhla 75,6°C, v místě termočlánku na krátké stěně krystalizátoru 90,4°C (obr.1–2). Z provedeného výpočtu je zřejmý monotónně klesající průběh teplot v místě termočlánků ve směru od vnitřního povrchu krystalizátoru. Při vyhodnocování vypočtených teplot v místě termočlánků bylo bráno v úvahu, že termočlánky nejsou umístěny ve stejné hloubce od vnějšího povrchu stěny krystalizátoru. Na dlouhých stěnách je uvažována průměrná hloubka měřícího místa termočlánku 29 mm, na krátkých stěnách 36 mm. Odpovídající průměrné změřené teploty na delší a kratší straně krystalizátoru byly 95 a 139°C.

Stěna	Hloubka termočlánku	Vypočtená teplota	Změřená teplota	
	[mm]	[°C]	[°C]	
Dlouhá	29	75,6	95	
Krátká	36	90,4	139	

Vliv součinitele přestupu tepla na straně chladící vody α_v

Výpočet MKP vykázal poměrně nízké hodnoty teplot v místě termočlánků. Ne zcela přesně definovaným parametrem v uvažované úloze prostupu tepla stěnou je součinitel přestupu tepla na straně chladící vody α_v . Hodnota α_v závisí na proudových a fázových poměrech uvnitř chladících kanálků. Výpočet MKP byl proto alternativně prováděn s měnící se hodnotou α_v . Provedenými numerickými experimenty bylo zjištěno, že teplota krystalizátoru v místech termočlánků roste při poklesu α_v (středové křivky na obr. 3-4]. Termočlánky naměřených hodnot by bylo možno dosáhnout na kratší stěně krystalizátoru snížením hodnoty α_v na 6200 Wm⁻²K⁻¹. Pro shodu vypočtených výsledků s naměřenými hodnotami na delší stěně by však potřebné α_v bylo téměř dvakrát větší (11000 Wm⁻²K⁻¹). Značná odlišnost v potřebném součiniteli přestupu tepla není technicky zdůvodnitelná různými proudovými poměry v deskách na dlouhé a krátké stěně krystalizátoru. Uspořádání chladících kanálků je totiž na obou typech desek podobné. Je tedy potřebné vycházet z toho, že rovněž součinitel přestupu tepla α_v ve všech obvodových deskách krystalizátoru bude podobný.

Vliv tloušťky stěny

V dalším kroku bylo zkoumáno, zda potenciální příčina odlišnosti naměřených a vypočtených teplot není spojena s tím, že na rozdíl od krátkých desek jsou podélné desky vystaveny abrazivnímu

namáhání a jejich tloušťka se během provozu zmenšuje. Byla proto provedena citlivostní analýza MKP pro různé tloušťky chladící desky a různé α_v . Všechny provedené výsledky prokázaly necitlivost změny teploty v místech termočlánků na změnu tloušťky desky krystalizátoru v rozsahu 40 – 60 mm. Tato vlastnost je vysvětlitelná s pomocí grafu na obr. 2. Z něho je zřejmé, že od vzdálenosti 25 mm od vnějšího povrchu krystalizátoru až po jeho vnitřní povrch je průběh teplot podél tloušťky stěny zcela lineární. Umístění obou termočlánků je právě v této části stěny.

K nelineárnímu rozložení teplot dochází pouze v blízkosti vnějšího povrchu krystalizátoru do hloubky 25 mm. V této vrstvě stěny krystalizátoru se projevuje přímý vliv lokálních účinků chladících kanálků. Naopak od této hloubky směrem k vnitřnímu povrchu se uplatňuje vliv okrajové podmínky II. druhu (Neumannovy) zadané tepelným tokem procházejícím vnitřním povrchem krystalizátoru. V této oblasti se jedná o klasický jednorozměrný průchod tepla deskou. Izočáry teplot jsou v této oblasti rovnoběžné s vnitřním povrchem krystalizátoru. Teplotu vnitřního povrchu krystalizátoru lze stanovit pro příslušnou tloušťku stěny z lineárního průběhu teplot směrem k vnitřnímu povrchu.

Vliv měrného tepelného toku stěnou

Různá tloušťka stěny tedy není vysvětlením odlišnosti naměřených a vypočtených teplot. Další skutečnost, která by mohla vysvětlit tuto odlišnost, je případná různost měrného tepelného toku odváděného dlouhými a krátkými stěnami krystalizátoru. Pro takovouto různost mluví i fakt, že chladící voda v dlouhých a krátkých stěnách se neohřívá stejně. Byly proto provedeny výpočty pomocí MKP při proměnlivé hodnotě součinitele přestupu tepla α_v pro menší (q = 500 kWm⁻²) a větší (q = 1000 kWm⁻²) měrné tepelné toky než byl původní měrný tepelný tok získaný z energetické bilance. Některé výsledky provedené numerické analýzy jsou zpracovány v grafech na obr. 3-4. Z nich je zřejmé, že požadovanou vyšší teplotu v místě termočlánků lze při daných proudových poměrech v chladícím kanálku a tedy i daném součiniteli přestupu tepla α_v a současně menším tepelném toku q, pohybujeme-li se v grafech po horizontále.

3. TERMOFYZIKÁLNÍ ROZBOR MEZIVÝSLEDKŮ PRO TERMOČLÁNKY ZMĚŘENÉ TEPLOTY

Z obr. 3 je zřejmé, že střední změřenou teplotu 95 °C na dlouhé stěně lze při měrném tepelném toku q = 500 kWm⁻² vyvodit součinitelem přestupu tepla $\alpha_v = 5300 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ podobně jako při měrném tepelném toku q = 1000 kWm⁻² součinitelem přestupu tepla $\alpha_v = 19000 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Z obr.4 je zřejmé, že střední změřenou teplotu 139 °C na krátké stěně lze při měrném tepelném toku q = 500 kWm⁻² vyvodit součinitelem přestupu tepla $\alpha_v = 3300 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ podobně jako při měrném tepelném toku q = 1000 kWm⁻² vyvodit součinitelem přestupu tepla $\alpha_v = 3300 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ podobně jako při měrném tepelném toku q = 1000 kWm⁻² součinitelem přestupu tepla $\alpha_v = 10400 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Uvedená závislost pro dlouhou a krátkou stěnu krystalizátoru je graficky znázorněna na obr. 5. Z něho je zřejmé, jak součinitel přestupu tepla na straně vody pro experimentálně stanovené teploty závisí na měrném tepelném toku.

Svázanost měrných tepelných toků na dlouhé a krátké stěně krystalizátoru

Aby mohl přestup tepla na obou stěnách probíhat při stejných proudových poměrech, tj. při totožném součiniteli přestupu tepla α_v , nemohou být oba tepelné toky stejné. Dosavadní úvahy nepředpokládaly žádnou vazbu mezi měrným tepelným tokem dlouhou q_v a krátkou q_k stěnou.

Připustíme-li možnost různých měrných tepelných toků na dlouhé a krátké stěně krystalizátoru, nejsou tyto toky nezávislé, ale jsou vázány bilanční rovnicí vůči zjištěnému celkovému měrnému tepelnému toku krystalizátorem. Pro zvolený q_d lze z této rovnice stanovit, jak velký musí být q_k

q_k	$=\frac{qS}{dr}$	$\frac{-q_d S_d}{S_k}$	
kde	q	-	měrný tepelný tok
	S	-	velikost přestupní plochy
bez in	dexu	-	celkový tok a přestupní plocha
index	d	-	dlouhá stěna
	k	-	krátká stěna

Při stejné výšce všech stěn, obvodové délce dlouhé stěny a = 1530 mm a krátké stěny b = 250 mm lze tímto způsobem přepočítat měrné tepelné toky na krátké stěně na měrné tepelné toky dlouhé stěny.

Vyhodnocení měrného tepelného toku na krátké stěně

Považujme parametr q v grafu na obr. 3 pro dlouhou stěnu za proměnnou q_d . Pak parametr q v grafu na obr. 4 pro krátkou stěnu musí být transformován do proměnné q_k , aby vyhovovala uvedenému transformačnímu vztahu. Dosavadní výsledky s obecným tepelným tokem se tak změní na výsledky uvedené v tabulce, v níž jako nezávisle proměnná vystupuje měrný tepelný tok dlouhé stěny.

q_d	$lpha_{ m vd}$	q_k	$\alpha_{\rm vk}$
$[Wm^{-2}]$	$[Wm^{-2}K^{-1}]$	[Wm ⁻²]	$[Wm^{-2}K^{-1}]$
500 000	5300	2 449 948	3300
773 869	11000	773 869	6200
1 000 000	19000	-610 000	10400

Rovněž graf na obr. 5 se změní v graf na obr. 6, který v transformovaných souřadnicích popisuje vzájemnou vazbu mezi reálným měrným tepelným tokem q_d a q_k v závislosti na součiniteli přestupu tepla α_v .

4. FORMULACE A ŘEŠENÍ INVERZNÍ ÚLOHY VEDENÍ TEPLA

Nyní lze precizovat formulaci řešené inverzní úlohy:

Zjistit takové obecně různé měrné tepelné toky dlouhou a krátkou stěnou krystalizátoru, které budou splňovat bilanční rovnici a vyvolají při stejném součiniteli přestupu tepla v chladících kanálcích takovou teplotu v místě termočlánků, která odpovídá experimentálně zjištěným hodnotám. Nutno přitom zohlednit, že termočlánky jsou umístěny v různých hloubkách od vnějšího povrchu krystalizátoru na jeho krátkých a dlouhých stěnách.

Řešení této inverzní úlohy plyne z grafů na obr. 6. Parametrem těchto grafů je pomocí MKP vypočtená teplota, která odpovídá změřené teplotě na dlouhé a krátké stěně krystalizátoru. Společný součinitel přestupu tepla, který odpovídá reálným měrným tepelným tokům dlouhou i krátkou stěnou, je určen průsečíkem odpovídajících křivek. Z grafu odečtené souřadnice průsečíku jsou

 $\alpha_v = 6 \ 800 \ Wm^{-2}K^{-1}$ $q_d = 570 \ 000 \ Wm^{-2}.$

Takto získané hodnotě α_v byla z grafu na obr. 5 odečtena odpovídající hodnota měrného tepelného toku krátkou stěnou

 $q_k = 805 \ 000 \ Wm^{-2}$.

5. Řešení stacionárních teplotních polí

Na základě získaných údajů byly provedeny stacionární výpočty teplotních polí. Některé numerické výsledky výpočtu MKP získané programovým systémem ANSYS 5.6.2 jsou včetně vyhodnocení odchylky numerického řešení od výsledků experimentu uvedeny v následující tabulce.

dlouhá stěna			krátká stěna		
hloubka	teplota	odchylka	hloubka	teplota	odchylka
[mm]	[°C]	[°C]	[mm]	[°C]	[°C]
0	66,5		0	83,6	
29	94,6	-0,4	36	138,8	-0,2
45	119,8		60	192,5	

Z tabulky je zřejmé, že vypracovaný numericko-grafický algoritmus, vycházející z fyzikální podstaty zkoumaného problému, umožňuje téměř přesně modelovat tepelné poměry v deskách krystalizátoru. Dosažená odchylka dosahuje jen zlomků procent.

Vedlejším výstupem řešení úlohy jsou teploty vnitřního povrchu krystalizátoru, které mohou být cenným vstupním parametrem v dalších fázích teplotního výpočtu tuhnutí kontislitku.

6. ZÁVĚR

Metodou konečných prvků byla provedena tříparametrická citlivostní analýza stacionárního teplotního stavu ve stěně krystalizátoru. Bylo studováno rozložení teplot v závislosti na tloušť ce stěny, měrném tepelném toku stěnou a součiniteli přestupu tepla. Byly nalezeny hodnoty součinitele přestupu tepla a měrných tepelných toků, které odpovídají výsledkům teplotních měření na dlouhé a krátké stěně krystalizátoru. Pro získané parametry byly provedeny stacionární teplotní výpočty MKP.

Poděkování

Tato práce vznikla díky podpoře projektu GAČR 106/01/1464, GAČR 106/01/1164 a projektu COST-OC-P3.20.

7. **References**

[1] Kavička, F. a kolektiv: Matematické a experimentální řešení nestacionárních teplotních polí předlitku a krystalizátoru, Závěrečná zpráva GAČR 106/98/0296, VUT-FSI Brno, 2001



Obr.1 Rozložení teplot v tělese krystalizátoru a přítlačné desky



Obr.2 Průběh teplot v tělese krystalizátoru na ose mezi chladícími drážkami



Dependence of Temperature at Thermocouple Location in Long Wall on Film Coefficient and Heat Flux

Obr.3 Závislost teploty v místě termočlánku na součiniteli přestupu tepla a tepelném toku pro dlouhou stěnu



Dependence of Temperature at Thermocouple Location in Short Wall on Film Coefficient and Heat Flux

Obr.4 Závislost teploty v místě termočlánku na součiniteli přestupu tepla a tepelném toku pro krátkou stěnu





Obr.5 Závislost součinitele přestupu tepla na tepelném toku stěnou



Film Coefficient Dependence on Heat Flux

Obr.6 Závislost součinitele přestupu tepla na tepelném toku dlouhou stěnou