

ANALÝZA PROCESU A ŠTRUKTÚRY ŽIARUPEVNEJ ZLIATINY CMSX-3 PRIPRAVENEJ RIADENOU KRYŠTALIZÁCIOU

Maroš MARTINKOVIČ, Peter PINKE

Autori: Ing. Maroš Martinkovič, PhD., host. doc. Peter Pinke, CSc.

Pracovisko: Katedra materiálového inžinierstva, Materiálovotechnologická fakulta STU

Adresa: J. Bottu 24, 917 24 Trnava, Slovensko

Tel.: +421 (0)33 5521 119, Fax: +421 (0)33 5521 119

E-mail: martinko@mtf.stuba.sk

Abstract

Thorough understanding of technology process parameters is needful because of final material structure dependence. The paper describes determination of technology parameters of directional solidification process and their influence on CMSX-3 superalloy structure of casting.

Je nevyhnutné exaktné poznanie parametrov technologických procesov a závislosti výslednej štruktúry materiálu na týchto parametroch. V príspevku je popísaný spôsob stanovenia technologických parametrov procesu riadenej kryštalizácie a vplyv týchto parametrov na štruktúru odliatku zo žiarupevnej zliatiny CMSX-3.

Key words

superalloys, nickel alloys, CMSX-3, directional solidification, single-crystal

zliatiny žiarupevné, zliatiny niklové, CMSX-3, kryštalizácia riadená, monokryštál

Úvod

Niklové žiarupevné zliatiny (NiŽPZ) sa používajú v extrémnych tepelno-napäťových podmienkach. Takým najexponovanejším podmienkam sú vystavené súčiastky, najmä lopatky plynových turbín v leteckých spaľovacích turbínach. Zlepšenie úžitkových vlastností týchto súčiastok je možné dosiahnuť procesom riadenej kryštalizácie. V dôsledku tohoto technologického procesu majú lopatky odstránené hranice zrna v priečnom smere – stĺpkové lopatky, alebo i hranice zrna v pozdĺžnom smere - monokryštálové lopatky. Takéto lopatky môžu pracovať pri vyšších teplotách, ich čas do porušenia sa zvýši niekoľkonásobne [1] a majú aj lepšiu odolnosť voči tepelnej únave. Je nevyhnutné exaktné poznanie parametrov procesu riadenej kryštalizácie, nakoľko priamo ovplyvňuje výslednú štruktúru odliatku.

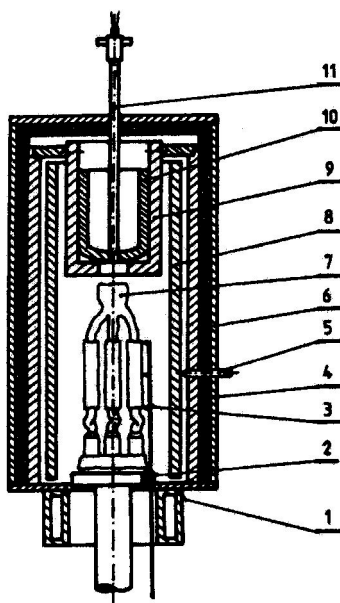
Princíp procesu riadenej kryštalizácie

Princíp procesu riadenej kryštalizácie (RK) spočíva v jednosmernom odvode tepla pri tuhnutí odliatku. To je zabezpečené v zariadení [2] schematicky znázornenom na obr.1. Zariadenie pozostáva z vákuovej komory, v ktorej je umiestnená keramická forma upevnená

na vodou chladenom stole, s ktorým je možné pohybovať vo vertikálnom smere rýchlosťou v_0 . Forma naplnená taveninou sa začne vyťahovať rovnomernou rýchlosťou v_0 z priestoru koša do priestoru chladiča. Tým sa zabezpečí jednosmerný odvod tepla a postupný prechod kryštalizačného rozhrania vertikálnym smerom celou formou. Pre rast kryštálu pri tuhnutí kvapalnej fázy platí zákon, že kryštál bude rásť proti smeru odvodu tepla a podmienkou RK je, aby kryštalizačné čelo, t.j. rozhranie solidus-likvidus tvorilo z makroskopického hľadiska rovinné rozhranie kolmé na smer rastu kryštálu, a by odvod tepla prebiehal iba v smere hlavnej osi odliatku. V mikroskopickom meradle je morfológia fázového rozhrania veľmi výrazne závislá od teplotného gradientu v tekutej fáze a od rýchlosti kryštalizácie (pohybu fázového rozhrania) na fázovom rozhraní v . Teplotný gradient G na fázovom rozhraní a rýchlosť kryštalizácie v vplýva na morfológiu štruktúry (planárna, bunková, dendritická) [3]. Pri dendritickej štruktúre má medzidendritická vzdialenosť priamy súvis s hodnotami G a v .

Meranie teplotného poľa v procese riadenej kryštalizácie

Na pracovisku vákuovej metalurgie katedry materiálového inžinierstva sa na experimentálnom zariadení pre RK [4] vyrobili valcové tyče rozmerov 12x80 mm zo žiarupeznej zliatiny CMSX-3, ktorej chemické zloženie je uvedené v tabuľke 1. V priebehu procesu RK sa uskutočnilo meranie teplotného poľa.



- 1-chladič
- 2-posuvný stôl
- 3-termočlánky merania teplotného poľa
- 4-plášť horúcej komory
- 5-meranie teploty koša
- 6-tepelná izolácia
- 7-škrupinová keramická forma
- 8-vyhrievací kôš
- 9-držiak
- 10-taviaci téglik
- 11-meranie teploty taveniny

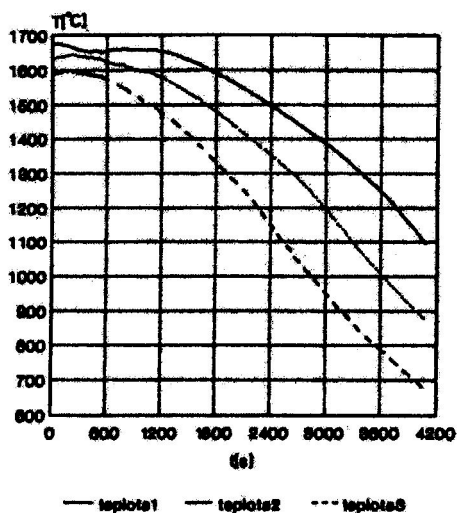
Obr. 1 Schéma procesu RK a merania teplotného poľa

CHEMICKÉ ZLOŽENIE ZLIATINY CMSX-3 [hmotn. %]

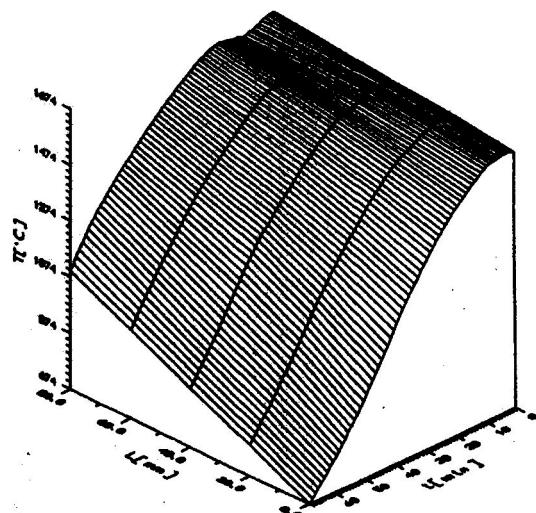
Tabuľka 1

Ni	Co	Cr	Al	Ti	Ta	Mo	W	Hf
zv.	4	5	8	5,7	0,7	0,5	9	0,1

Meranie teplotného poľa spočíva v určení teploty pozdĺž osi odlievanej súčiastky v priebehu celého procesu RK. Odlievané tyčky mali dĺžku 80 mm a priemer 12 mm. Meranie teploty bolo robené v troch bodoch pozdĺž tyčky merané od jej spodného konca: L = 0 mm- teplota 3, L = 40 mm- teplota 2, L = 80 mm- teplota 1. V škrupinovej forme boli do horeuvedených polôh umiestnené 3 termočlánky Pt30Rh-Pt6Rh v ochranných keramických kapilárach (obr.1). Meranie začalo v čase t = 0, kedy bol zapnutý posuv stola rýchlosťou $v_0 = 2,86$ mm/min a ukončené bolo po vytiahnutí formy z vyhrievanej oblasti do priestoru chladiča. Celková doba merania bola 68 minút. Napätia na termočlánkoch boli príslušnou prevodovou charakteristikou prepočítané na teploty. Z takto získaných teplôt boli zostrojené priebehy pre 3 merané body v závislosti od času – $T = f(t)$, ktoré sú uvedené na obr. 3. Priebeh teploty pozdĺž celej tyčky bol získaný parabolickou interpoláciou týchto troch bodov, nakoľko teplotu pri takomto usporiadaní procesu RK charakterizuje parabolický priebeh [5]. Z takýchto priebehov bolo zostrojené teplotné pole na odliatku v priebehu procesu – závislosť teploty T od času t a polohy na tyčke L – $T = f(t,L)$. Graficky je zobrazené na obr. 3.



Obr. 2 Priebeh teploty na 3 miestach odliatku z CMSX-3 v priebehu RK

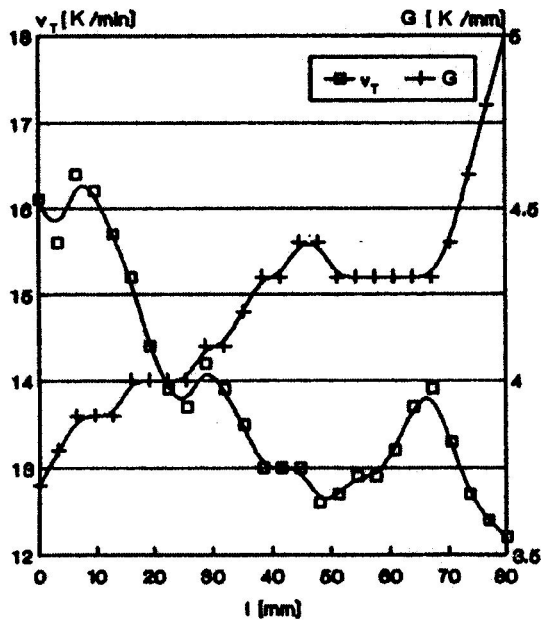


Obr. 3 Teplotné pole na MK odliatku z CMSX-3

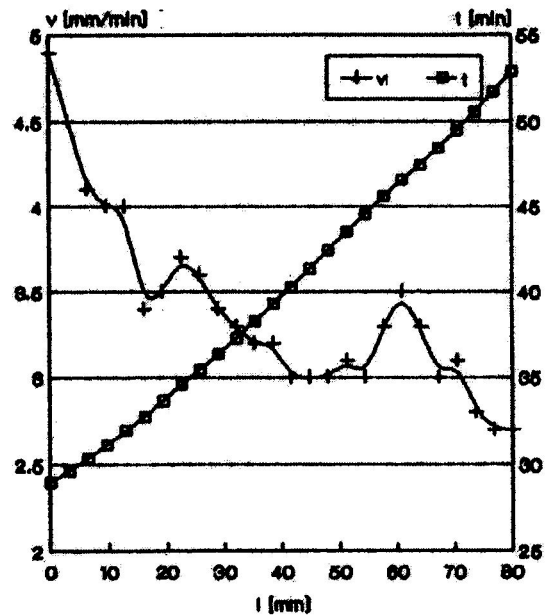
Teplota fázového rozhrania – počiatku kryštalizácie pre CMSX-3 je 1350°C . Analýzou teplotného poľa pre takto zvolenú izotermu T_{IZ} bolo v 26 bodoch pozdĺž tyčky vypočítané:

- čas príchodu izotermy T_{IZ} do príslušného bodu t [min]
- rýchlosť kryštalizácie (pohybu T_{IZ} , resp. fázového rozhrania) $v = \frac{dx}{dt}$ [mm/min]
- rýchlosť ochladzovania $v_T = \frac{\partial T}{\partial t}$ [K/min]
- teplotný gradient $G = \frac{\partial T}{\partial x}$ [K/mm]

Z vypočítaných údajov zostrojená grafická závislosť rýchlosti ochladzovania a teplotného gradientu od polohy sú uvedené na obr. 4. Závislosť rýchlosti pohybu izotermy a času príchodu izotermy od polohy je uvedená na obr. 5.

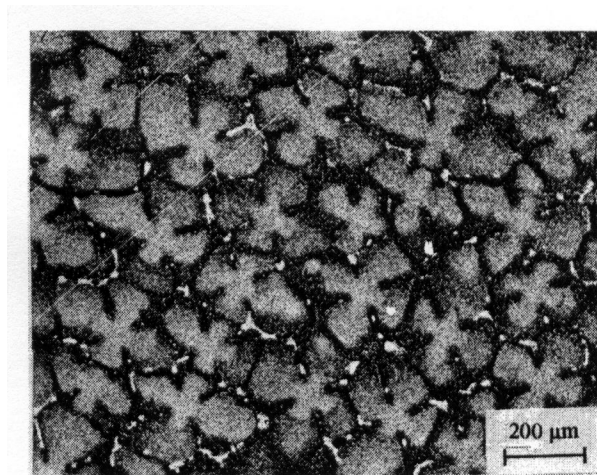


Obr. 4 Závislosť rýchlosti ochladzovania v_T a gradientu G od polohy na vzorke



Obr. 5 Rýchlosť pohybu izotermy v a čas jej príchodu t do príslušného bodu od polohy na vzorke

Morfológia štruktúry odliatku

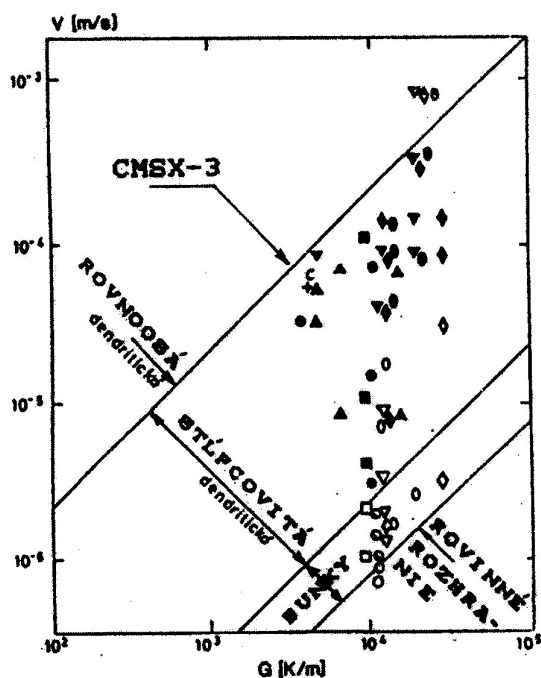


Obr. 6 Štruktúra Ni₃PZ CMSX-3 pripravenej procesom RK v stave po odliatí - priečny rez

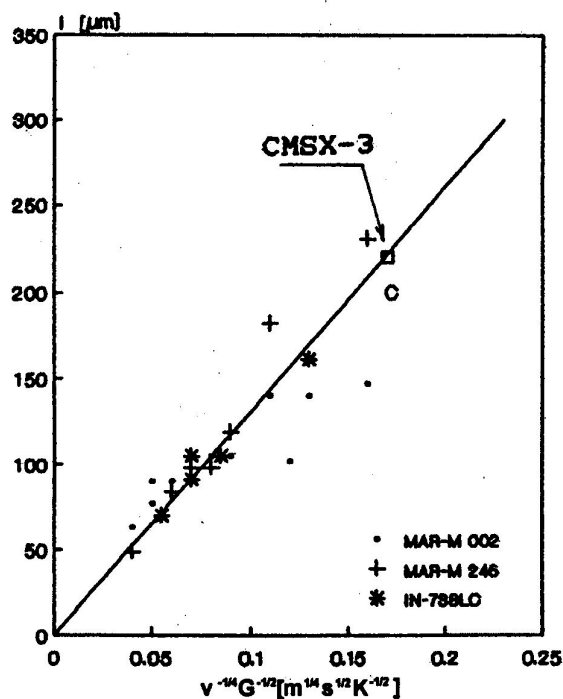
Štruktúra odliatku pripraveného procesom RK s horeuvedenými parametrami je monokryštalová tvorená stĺpcovitými dendritmi. Orientácia dendritov je kvázivzrovnobežná v smere postupu teplotného gradientu. V priečnom smere zodpovedá dendritickým kryštálom so štyrmi sekundárnymi ramenami so strednou vzdialenosťou medzi hlavnými osami dendritov $l = 225\mu\text{m}$. V medzidendritických priestoroch je vidieť vylúčené eutektické útvary γ/γ' . Štruktúra priečneho rezu odliatku je na obr. 6.

Závislosť vzniku príslušnej morfológie štruktúry odliatku od teplotného gradientu a rýchlosti kryštalizácie (rýchlosti pohybu fázového rozhrania), ako sa uvádza v literatúre, spolu s parametrami pre niekoľko Ni₃PZ [6] doplnené o namerané údaje pre CMSX-3 (bod C) je na obr. 7.

Zmena parametrov procesu RK (G a v) sa významne prejavuje na medzidendritickej vzdialenosti MK odliatkov. Existujú dva hlavné modely – Huntov a Kurz-Fisherov, ktoré teoreticky popisujú bunkové a dendritické tuhnutie počas RK a vedú k takmer totožným výsledkom funkčnej závislosti medzidendritickej (medzibunkovej) vzdialenosti l od G a v – vzdialenosť l rastie s klesajúcou hodnotou G a v pre dendritickú štruktúru (pre bunkovú je to naopak). Vzdialenosť l lineárne závisí od súčinu $v^{-1/4} G^{-1/2}$, pričom smernica priamky je pri modeloch rôzna. Publikované experimentálne údaje lepšie popisuje Huntov model, ako napr. v [6], kde pre monokryštalové tyčky zo zliatin MAR-M 246, MAR-M 002 a In - 738LC sa sledoval vplyv v a G na vzdialenosť medzi osami dendritov l . Uvedené výsledky a teoretická závislosť Huntovho modelu je na obr. 8 doplnená o namerané výsledky pre CMSX-3.



Obr. 7 Morfológia NiŽPZ pripravenej procesom RK v závislosti od $\log G$ a $\log V$ [6]: \circ IN-713C, MAR-M 200, Δ IN-100, ∇ MAR-M 246, \diamond MAR-M 002 a \circ IN-738LC



Obr. 8 Vzdialenosť medzi osami dendritov l ako funkcia $V^{-1/4} G^{-1/2}$ pre tri NiŽPZ pripravene procesom RK [6] doplnené o zliatinu CMSX-3

Záver

Popísaný spôsob určenia obrazu teplotného poľa pri procese RK a získané výsledky ukazujú na možnosti exaktného poznania technologických podmienok tohto procesu, a tým aj jeho ovplyvňovanie a riadenie v závislosti na dosiahnutí požadovanej štruktúry materiálu. Z nameraných údajov vyplýva, že dosiahnuté technologické parametre procesu RK zodpovedajú usmernenej dendritickej štruktúre, ktorá sa skutočne v odliatku vytvorila. Hlavný kvantitatívny parameter tohto typu štruktúry – medzidendritická vzdialenosť l zodpovedá technologickým parametrom procesu podľa závislosti odvodenej Huntom.

Literatúra:

- [1] McLEAN, M.: *Directionally solidified materials for high temperature service*. London: The Metals Society 1983, s. 152.
- [2] ŽITŇANSKÝ, M.: *Inovovaný materiál s spôsob jeho zabezpečenia. Materiály v inžinierskej praxi*. Košice: Dom techniky ZSVTS, 1990, s. 1.
- [3] MA, D., SAHM, R.: Einkristallerstarrung der Ni-Basis - Superlegierung SRR 99. In *Zeitschrift für Metallkunde* 1991, 82, s. 871.
- [4] ŽITŇANSKÝ, M. - HAZLINGER, M. - PINKE, P. - ZRNÍK, J.: *Materiály pripravené RK. Výskumná správa*. Trnava: MtF STU, 1991.
- [5] ŽITŇANSKÝ, M.: *Doktorská dizertačná práca*. Bratislava: SVŠT – Sjf, 1984.
- [6] QEST, P. N. - McLEAN, M.: Solidification morphologies in directionally solidified superalloys. In *Materials Science and Engineering*, 1984, 65, s. 171.