

Recenzované výzkumné články

Programové teplotně-časové zpracování Cr-Mo nástrojové oceli

Programme Thermo-time Processing Technology of the Cr-Mo Tool Steel

doc. Ing. Petr Jonšta, Ph.D.¹; Ing. Zdeněk Carbol¹; Ing. Michal Sušovský¹; Ing. Jan Melecký, CSc.²;
doc. Ing. Karel Gryc, Ph.D.^{3,4}; doc. Ing. Markéta Tkadlečková, Ph.D.^{3,4}; doc. Ing. Ladislav Socha, Ph.D.^{3,4};
prof. Ing. Karel Michalek, CSc.^{3,4}

¹ VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a.s., Ruská 2887/101, Vítkovice, 703 00 Ostrava, Česká republika

² 1. Máje 33, 743 01 Bílovec, Česká republika

³ VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, Katedra metalurgie a slévárenství, 17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava-Poruba, Česká republika

⁴ VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, Regionální materiálově technologické výzkumné centrum, 17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava-Poruba, Česká republika

Požadavky na výši teplot při výrobě oceli v elektrické obloukové peci a při mimopecním zpracování závisí zejména na chemickém složení vyráběné oceli, tj. především na obsahu uhlíku a typu a obsahu legujících prvků a rovněž na technologii výroby. Stav tekuté oceli je během výroby a před odléváním daleko od rovnovážného stavu, což se často projeví na rozdílných vlastnostech odlité oceli, přestože chemické složení je srovnatelné. Jedním z nejdůležitějších a efektivních způsobů ovlivňujících vlastnosti taveniny je časová výdrž při vysoké teplotě, tzv. programové teplotně-časové zpracování (PTVO). Předložený příspěvek se zabývá optimalizací technologie výroby a mimopecního zpracování pomocí PTVO u nástrojové Cr-Mo oceli v elektroocelárně společnosti VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a.s. Pozornost byla zaměřena zejména na teplotní a struskový řád zkušební tavby.

Klíčová slova: Cr-Mo nástrojová ocel; programové teplotně-časové zpracování; rafinační strusky; teplotní režim

The requirements to the temperature height during steel production in the electric arc furnace and during secondary metallurgy processing depend mainly on the chemical composition of the produced steel, i.e. primarily on the volume of carbon and the type and volume of the alloying elements, and also on the production technology. During the production and before casting, the liquid steel is far from a steady state, which often shows in different quality of the cast steel, even though the chemical composition is comparable. One of the most important and effective ways of influencing the melt is the time of endurance at high temperature, the so-called programme thermo-time processing (PTVO), which leads to stabilisation of the melt quality, when e.g. steel viscosity increases most often, and under the same conditions of solidification it causes stabilisation of certain mechanical properties of the solid metal, such as yield strength, ductility, resistance to various degradable mechanisms etc. In the case that connection between melt quality and mechanical properties of the crystallising metal does not show, it does not mean that in that particular case the melt structure does not have any influence on the solid metal. The most probable cause of the observed correlation, which connects the properties of liquid and solid metals, is an imbalance of the melt before crystallisation. For the full security of the process of the equiponderant processes, it is necessary to reach sufficient time of endurance during the required high temperature, therefore the degree of their accomplishment at the moment of the crystallisation of the metal melt can differ. The submitted paper deals with the optimisation of the production technology and secondary metallurgy processing with the use of the PTVO for the tool Cr-Mo steel in the electric steelworks of VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a.s. The focus was aimed mainly on the temperature and slag system of the testing heat.

Key words: Cr-Mo tool steel; programme thermo-time processing technology; refining slags; temperature regime

Požadavky na výši teplot při výrobě oceli v elektrické obloukové peci (EOP) a při mimopecním zpracování závisí zejména na chemickém složení vyráběné oceli, tj. především na obsahu uhlíku a typu a obsahu legujících prvků. Problematikou výroby tekuté oceli se podobně zabýval Baum a kol. [1], kteří uvádějí, že

vlastnosti kovové taveniny rovněž závisí na technologii výroby a mimopecního zpracování, což také souvisí s obsahem kyslíku.

V celé řadě výzkumných prací [2-6] bylo prezentováno, že stav tekuté oceli během výroby a před odléváním je

daleko od rovnovážného stavu. Tato skutečnost se často projeví na rozdílných vlastnostech odlité oceli, přestože má srovnatelné chemické složení. Tuto nestabilitu vlastností a struktury oceli lze odstranit časovou výdrží na vysokých teplotách nad teplotou likvidu. Jak ukázaly výzkumy [7, 8], vlastnosti a struktura oceli těsně nad teplotou likvidu se mění pouze nepatrně, což se následně projevuje v jejich nestabilitě.

Jedním z nejdůležitějších a efektivních způsobů ovlivňujících taveninu je časová výdrž při vysoké teplotě, která vede ke stabilizaci vlastností taveniny, kdy např. viskozita oceli nejčastěji vzrůstá a při stejných podmínkách tuhnutí způsobuje stabilizaci některých mechanických charakteristik pevného kovu, jakou je např. mez kluzu, relativní prodloužení, odolnost vůči kavitaci aj.

Obecně je známo, že vztah mezi relativním prodloužením u pevných vzorků a relativní viskozitou je dán převážně chemickým složením vyráběné oceli. Toto tvrzení však nelze jednoznačně absolutizovat. V případě, že se spojitost mezi vlastnostmi tavenin a mechanickými charakteristikami krystalizujícího kovu neprojevuje, ještě neznamená, že v daném případě struktura taveniny nemá na vlastnosti pevného kovu žádný vliv. Nejpravděpodobnější příčinou sledovaných korelací, které spojují vlastnosti tekutých a pevných kovů je nerovnováha taveniny před krystalizací. Pro plné zajištění průběhu rovnovážných procesů je zapotřebí dostatečná doba na požadované vysoké teplotě, a proto stupeň jejich dovršení v okamžiku krystalizace kovové taveniny se může lišit.

Zdokonalením teplotního režimu výroby oceli se zabývali autoři [9]. Základem pro upřesnění teplotních režimů sloužily výsledky zkoumání teplotních závislostí viskozity, hustoty, povrchového napětí a dalších vlastností vzorků u jednotlivých hodnocených značek oceli. Výzkum vlastností roztavených vzorků ocelí ukazuje, že intenzita a stupeň ukončení strukturálních změn v tavenině nezávisí pouze na teplotě ohřevu, ale také na době výdrže na této teplotě. Pro úplný průběh všech procesů v tavenině je zapotřebí stanovit optimální spojení teploty ohřevu a časové výdrže na této teplotě. Obecně platí, že čím nižší je teplota taveniny, tím delší musí být doba výdrže. Upřesnění a optimalizace technologie výroby a mimopecního zpracování oceli na tomto základě dostal název – *programové teplotně-časové zpracování (PTVO)*.

K technologii PTVO je možno přejít se stanovenými postupy celého procesu výroby dané značky oceli ze známých vsázkových materiálů. Komplex opatření je založen na detailním rozboru teplotních závislostí strukturálních a rychle reagujících vlastností roztavené oceli a zjištění charakteristických teplot u dané taveniny, jako jsou teploty počátku hystereze, teploty anomální změny vlastností a kritické teploty, kdy ohřev nad tuto teplotu vede ke vzniku hystereze viskozity. Kromě toho PTVO předpokládá prostudování vlivu doby izotermické výdrže při různých teplotách na

vlastnosti taveniny před krystalizací a charakteristiky tuhnutí kovu. Průmyslová realizace PTVO vyžaduje podrobný rozbor celého technologického procesu a zavedení nezbytných opatření. Při zachování dřívějšího pořadí pracovních operací může např. při současném zvýšení teplot ohřevu oceli v jednotlivých periodách vést ke zvětšení propalů dezoxidačních a legujících přísad a ke ztížení podmínek dosažení úzkého rozmezí chemického složení apod.

1. Charakteristika experimentu

V rámci provozní zkoušky byla v elektroocelárně VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a.s. (VHM) vyrobena tavba Cr-Mo nástrojové oceli, která byla prováděna technologií PTVO. Současně byly provedeny propočty chladícího ocelového odpadu pro zajištění rychlého zchlazení přehřáté ocelové lázně v licí pánvi. Tavební analýza Cr-Mo nástrojové oceli je uvedena v tab. 1. Při výrobě zkušební tavby byla zvýšená pozornost věnována teplotnímu a struskovému řádu.

Tab. 1 Tavební analýza Cr-Mo nástrojové oceli (hm. %, *ppm)

Tab. 1 Heat analysis of the Cr-Mo tool steel (wt. %, *ppm)

C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni
0,37	0,38	0,91	0,027	0,001	0,09	0,21
Cr	Mo	V	Al	N	Sn	Hy*
4,99	1,16	0,43	0,022	0,008	0,007	1,07

1.1 Chemické složení rafinačních strusek

Vzorky strusky byly odebírány v průběhu celé fáze výroby, od poslední fáze tavení a úpravy chemického složení v EOP (před odpichem) až po odjezd tavby z VD na odlévání.

Zvláštní pozornost byla zaměřena na posouzení chemického složení a vizuální vzhled rafinačních strusek na pánvové peci (LF) – od příjezdu na LF, přes vzhled strusek, které byly odebrány při přehřátí ocelové lázně, až po ukončení přehřátí (obr. 1 – 5). Chemické složení odebraných strusek prezentuje tab. 2 – 5.



Obr. 1 Vzhled strusky při příjezdu na LF – 1. zkouška

Fig. 1 Appearance of the slag at its arrival to the LF – 1st test

Tab. 2 Chemické složení strusky při příjezdu LF – 1. zkouška (hm. %)
Tab. 2 Chemical composition of slag in LF – 1st test (wt. %)

CaO	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO
45,27	22,78	1,44	0,84	14,36
SiO ₂	Cr ₂ O ₃	P ₂ O ₅	S	TiO ₂
13,18	0,85	0,04	0,1043	0,14

Chemická analýza (tab. 2) ukazuje, že struska odebraná při příjezdu na pánvovou pec byla již poměrně dobře dezaktivována během odpichu oceli z EOP do lící pánve, o čemž svědčí nízké obsahy lehce redukovatelných oxidů (FeO, MnO, Cr₂O₃, P₂O₅, TiO₂). Poměrně vysoký byl obsah MgO, což se projevilo větším zahuštěním strusky. Průměrná bazicita (CaO/SiO₂) této strusky měla hodnotu 3,435. Průměrný poměr CaO/Al₂O₃ činil 1,987, z čehož vyplývá, že tyto strusky měly nižší teplotu likvidu, a došlo tedy k rychlé tvorbě rafinační strusky a následně k rychlému odsítení oceli.



Obr. 2 Vzhled strusky před výdrží na LF – 2. zkouška
Fig. 2 Appearance of the slag before thermal endurance in the LF – 2nd test

Tab. 3 Chemické složení strusky před teplotní výdrží na LF (hm. %)
– 2. zkouška
Tab. 3 Chemical composition of the slag before thermal endurance in the LF (wt. %) – 2nd test

CaO	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO
50,06	19,75	0,21	0,08	12,01
SiO ₂	Cr ₂ O ₃	P ₂ O ₅	S	TiO ₂
16,43	0,09	0,04	0,1657	0,14

Jak vyplývá z analýzy strusky před výdrží na LF (tab. 3), jednalo se o velice dobře dezaktivovanou strusku, tzn. obsahy lehce redukovatelných oxidů byly velmi nízké. Vysoký obsah MgO měl jednak za následek větší zahušťování strusky a jednak rovněž příznivý vliv na životnost vyzdívky lící pánve. Průměrná bazicita činila 3,047. Průměrný poměr CaO/Al₂O₃ činil 2,535, což svědčí o tom, že tyto strusky měly vyšší teplotu likvidu.



Obr. 3 Vzhled strusky na LF před přidáním chladicího šrotu – 3. zkouška
Fig. 3 Appearance of the slag in the LF before adding cooling scrap – 3rd test

Tab. 4 Chemické složení strusky na LF před přidáním chladicího šrotu – 3. zkouška, (hm. %)
Tab. 4 Chemical composition of the slag in the LF before adding the cooling scrap – 3rd test, (wt. %)

CaO	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO
48,87	20,15	0,45	0,05	12,13
SiO ₂	Cr ₂ O ₃	P ₂ O ₅	S	TiO ₂
16,88	0,08	0,04	0,1718	0,17

O velmi dobré dezaktivaci strusky na LF před přidáním chladicího šrotu svědčí nízké obsahy lehce redukovatelných oxidů FeO, MnO, Cr₂O₃, P₂O₅, TiO₂ (tab. 4). Průměrná bazicita strusky byla 2,895. Strusky vykazovaly vyšší teplotu likvidu (CaO/Al₂O₃ = 2,425).



Obr. 4 Struska na LF – 4. zkouška – po přidání chladicího šrotu a po dolegování, dezaktivaci strusky drceným Al a po přidání vápna u oceli
Fig. 4 Slag in the LF – 4th test – after adding cooling scrap and after finishing alloying, deactivation of the slag with crushed Al and after adding lime to the steel

Tab. 5 Chemické složení strusky na LF – 4. zkouška – po přidání chladicího šrotu a dolegování, dezaktivaci strusky drceným Al a po přidání vápna u oceli (hm. %)
Tab. 5 Chemical composition of the slag in the LF – 4th test – after adding cooling scrap and finishing alloying, deactivation of the slag with crushed Al and after adding lime to the steel (wt. %)

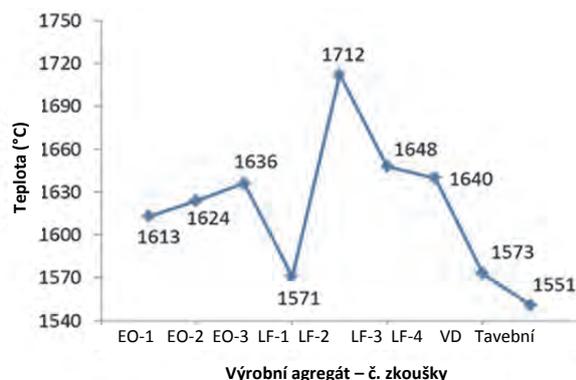
CaO	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO
54,04	18,60	0,06	0,03	10,56
SiO ₂	Cr ₂ O ₃	P ₂ O ₅	S	TiO ₂
15,33	0,03	0,04	0,1862	0,16

Po přidání chladicího šrotu, po dolegování, deaktivaci strusky drceným Al a po přidání vápna na LF byla struska velmi dobře deaktivována, což je patrné z velmi nízkých obsahů lehce redukovatelných oxidů FeO, MnO, Cr₂O₃, P₂O₅ a TiO₂ (tab. 5). Průměrná bazicita strusky byla 3,525. V důsledku nízkého obsahu Al₂O₃ měly tyto strusky vyšší teplotu likvidu. Průměrná hodnota poměru CaO/Al₂O₃ činila 2,905.

1.2 Teplotní řád

V rámci teplotního řádu byla pozornost zaměřena na zajištění dostatečného přehřátí ocelové taveniny na pánvové peci. Teplota likvidu Cr-Mo oceli se dle výpočtů pohybovala v rozmezí 1 485 až 1 490 °C. U zkušební tavby bylo na pánvové peci docíleno teploty 1 712 °C, tzn., že přehřátí ocelové taveniny se pohybovalo v rozmezí 222 až 227 °C. Po 20minutové výdrží na výše uvedené teplotě bylo při teplotě 1 712 °C přidáno 1 800 kg ocelového šrotu za účelem rychlého ochlazení ocelové taveniny. Po rozpuštění šrotu při intenzivním promíchávání lázně argonem byla změřena její teplota, která činila 1 648 °C. Přidáním ocelového šrotu tedy došlo k ochlazení lázně o 64 °C.

Průběh teplot při odpichu z EOP, zpracování na LF a VD je uveden na obr. 5, ze kterého je patrné, že teplota oceli při 1. zkoušce na EOP činila 1 613 °C a při odpichu z EOP byla 1 636 °C. Po odpichu, tj. po přidání dezoxidačních, legujících a struskotvorných přísad se snížila teplota oceli na 1 571 °C. Průměrný pokles teploty činil 65 °C. V dalším průběhu zpracování na LF byla ocel ohřátá až na teplotu 1 712 °C. Jednalo se o teplotu před výdrží. Odjezdová teplota z LF činila 1 640 °C. Na počátku zpracování na VD byla teplota oceli 1 632 °C. V dalším průběhu zpracování na VD byla provedena korekce chemické analýzy oceli, kdy bylo přisazeno 10 kg FeMn, 10 kg kalcinovaného antracitu a dále bylo prováděno vakuování, přičemž po 53 minutách zpracování na VD činila teplota 1 557 °C. Následovalo měření obsahu vodíku pomocí zařízení Hydrys (tab. 1) a poté byla tavba odlita do kokil.



Poznámka: EO – elektrická oblouková pec, LF – pánvová pec, VD – odplynění v evakuovaném kesonu

Obr. 5 Teplotní průběh oceli během zpracování

Fig. 5 Temperature profile of the steel during processing

2. Závěr

Předložený příspěvek se zabýval optimalizací technologie výroby a mimopecního zpracování u nástrojové Cr-Mo oceli v elektroocelárně společnosti VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a.s. Provozní tavba byla provedena technologií programového teplotně-časového zpracování za účelem efektivního ovlivnění vlastností ocelové taveniny. Současně byly provedeny propočty chladicího ocelového odpadu pro zajištění rychlého zchlazení přehřáté ocelové lázně v lici pánvi.

Na pánvové peci byla docílena teplota 1 712 °C, přičemž na tomto přehřátí setrvala 20 minut, kdy byla uvedená teplota udržována příhrěvem na LF. Následně bylo při teplotě 1 712 °C přidáno 1 800 kg chladicího ocelového odpadu. Po rozpuštění šrotu za intenzivního promíchávání lázně argonem byla změřena teplota ocelové lázně, která činila 1 648 °C. Strusky byly odebrány v průběhu celé fáze výroby. Zvláštní pozornost byla věnována posouzení chemického složení a vizuálnímu vzhledu rafinačních strusek, které byly odebrány při přehřátí ocelové lázně, tedy až po ukončení přehřátí.

Poděkování

Příspěvek vznikl v rámci řešení projektu registračního čísla TA04010035 za finanční podpory TA ČR a při řešení projektu č. LO1203 „Regionální materiálové technologické výzkumné centrum-program udržitelnosti“ financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Literatura

- [1] BAUM, B. A., CHASN, G. A., ŽAGUNOV, G. V., KLIMENKOV, E. A., BAZIN, J. A., KOVALENKO, L. V., MICHAJLOV, V. B., RASPOPOVA, G. A. Židkaja stal'. Moskva: *Metallurgija*, 1984, s. 128–198.
- [2] GELD, P. V., BAUM, B. A., PETRUŠEVSKIJ, M. S. Rasplavy ferrosplavnogo proizvodstva. Moskva: *Metallurgija*, 1973, s. 288.
- [3] BELAŠČENKO, D., K. Javlenija perenosu v židkích metalach i poluprovodnikach. Moskva: *Atomizdat*, 1970, s. 270.
- [4] GOTZILF, T. L., LJUBIMOV, A. P. Fizičeskaja chimija metalurgičeskich procesov i sistem. Moskva: *Metallurgija*, 1966, s. 166–170.
- [5] ŽAZUNOV, G. V., BAUM, B. A., KUŠNIR, M. I. FICHOM, 1975, 1, s. 48–50.
- [6] BODAKIN, N. E., ŽAZUNOV, G. V., BAUM, B. A. *Izv. vuzov. Černaja metallurgija*, (1977) 5, 18–21.
- [7] VATOLIJ, N. A., PASTUCHOV, E. A. Difrakconnyje issledovanija strojenija vysokotemperaturnych rasplavov, Nuka (1980), 189.
- [8] SLUCHOVSKIJ, O. I., LAŠKO, A. S., ROMANOVA, A. V. *UFŽ*, (1975) T. 20, 12, 1961–1965.
- [9] CHASIN, G. A., ŽAZUNOV, G. V., MICHAJLOV, V. B. *Stal'*, (1978) 9, 814–817.