

УДК 621.781.08.001.76

DOI:10.26661/2071-3789-2019-1-41-18

Каюков Юрій Миколайович, доцент, кандидат технічних наук
Назаренко Ірина Анатоліївна, доцент, кандидат технічних наук
Кузьменко Алла Анатоліївна, доцент
Чижов Сергій Євгенович, старший викладач

РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ ЗЛИТКІВ У НЕОПАЛЮВАНИХ ТЕРМОСТАТАХ

Запорізька державна інженерна академія

Виконано розрахунково-експериментальні дослідження процесу охолодження сталевих злитків у неопалюваних термостатах після виходу з кристалізаторів печей ЕШП. Запропоновано раціональні температурно-часові режими охолодження злитків, які дозволяють підвищити пропускну спроможність таких агрегатів за незмінної якості металу.

Ключові слова: сталеві злитки, печі ЕШП, охолодження, неопалювані термостати, термонапружений стан металу

Вступ. На ряді металургійних підприємств країн СНД для уникнення появи у металі тріщин, пов'язаних з його термонапруженим станом, сталеві злитки після виплавки в печах ЕШП піддають охолодженню в неопалюваних термостатах. На масивний под термостата завантажують та укладають на вузьку грань сім'я злитків.

Як показує практика експлуатації термостатів, завершальний період охолодження злитків ЕШП (у інтервалі температур 550-200 °С) характеризується низькою інтенсивністю відведення теплоти від поверхневих шарів металу та збільшенням тривалості його перебування в робочому об'ємі агрегатів, а, отже, і зниженням їх пропускну спроможності.

Постановка завдання. У зв'язку з цим виникає необхідність коригування температурно-часових параметрів режимів охолодження злитків ЕШП у термостатах за одночасним збереженням припустимого рівня термонапруженого стану металу.

Головна частина досліджень. Комплексний експериментально-теоретичний підхід до зазначеної проблеми включає виконання серії експериментів щодо вивчення й аналізу розподілу температури за перерізом злитків ЕШП на різних етапах їх охолодження, математичне моделювання такого процесу та розрахункову частину щодо визначення його раціональних температурно-часових параметрів.

Експерименти щодо вивчення полів температури в злитках ЕШП здійснювали під час їх транспортування з кристалізаторів печей ЕШП до неопалюваного термостата та подальшого

охолодження в його робочому об'ємі. Вивчали кінетику охолодження контрольних злитків, що розміщують у різних областях робочого об'єму неопалюваного термостата шляхом температури поверхневих і внутрішніх шарів металу. Гарячі спай датчиків гнучкого екранованого термокабеля КТМС-ХА розміщували в чотирьох точках (на осі та в центрі поверхні верхньої та бічних граней) у трьох поперечних (ліве торцеве, серединне і праве торцеве) перерізах злитків.

На попередній стадії експерименту контрольні злитки завантажували в робочий об'єм рециркуляційної полум'яної печі, нагрівали до температури 900 °С і піддавали подальшій витримці за зазначеної температури до досягнення в центральних шарах металу рівня температури 850-860 °С, що відповідає моменту витягання злитків з кристалізаторів печей ЕШП. Далі злитки вивантажували з печі, транспортували до неопалюваного термостата та розміщували в його робочому об'ємі.

Експериментами встановлено, що на стадії транспортування (0,12-0,19 год.) максимальне зниження температури в окремих точках поверхні злитків досягає 80-95 °С. Наявність такого інтенсивного охолодження поверхневих шарів металу призводить до збільшення градієнта температури за перерізом злитків і сприяє виникненню на їх осі значних стискувальних термонапружених напружень. Найбільш небезпечною зоною в охолоджуваних злитках є центральна область, де розвивається стискувальний напружений стан, що гальмує процес розвитку пластичних деформацій, та спричинює необхідність визначення для даного періоду охолодження злитків умов, які обмежують можливість появи в металі значних термонапружених напружень.

Під час визначення припустимої на даній стадії охолодження інтенсивності відведення теплоти з поверхні злитків приймали умову:

$$\sigma_{\max}(T) \leq \sigma_{i\partial\bar{e}\bar{i}} \leq 0,9\sigma_a(\bar{O}) . \quad (1)$$

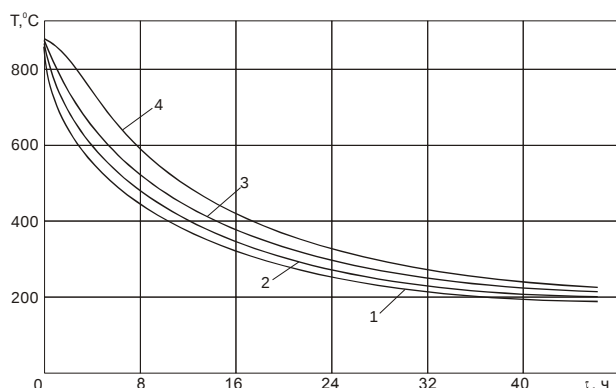
Розрахунки стискувальних термопружних напружень σ на осі злитків у інтервалі температур 800-600 °С виконували з використанням відомої формули [1]:

$$\sigma_{ij} = \frac{\beta \cdot E}{1-\nu} \bar{T} - T , \quad (2)$$

де σ_{ij} – термопружне напруження в i -ій точці злитка на j -ий момент часу, Н/м²; $\beta = (T)$ – коефіцієнт лінійного розширення стали, 1/К; $E = E(T)$ – модуль пружності, Н/м²; ν – коефіцієнт Пуассона (для сталі $\nu = 0,3$); $\bar{T}$ – середня температура злитка на j -ий момент часу, К; T – температура металу на j -ий момент часу, К.

Як встановлено розрахунками, максимальне стискувальне термопружне напруження, що виникає в інтервалі температур 800-650 °С на осі злитків, яких транспортують, не перевищує межу міцності на стиск за тривалості даної операції не більше ніж 0,18 год. Подальші експерименти за виробничих умов підтвердили, що за вказаної тривалості транспортування злитків їх суцільність не порушується.

Аналіз експериментальних даних щодо зниження температури поверхневих і внутрішніх шарів контрольних злитків (рис. 1) зафіксував наявність трьох стадій їх охолодження: періоду максимальної інтенсивності пониження температури металу ($\tau = 0-6$ год.); періоду помірного охолодження металу ($\tau = 6-22$ год.), а також періоду регулярного режиму ($\tau = 22-46$ год.).



1, 2, 3 - температура на поверхні злитка; 4 - температура на осі злитка

Рисунок 1 – Змінювання температури поверхневих і серединних шарів контрольного злитка у процесі його охолодження

Протягом усього перебування контрольних злитків у робочому об'ємі неопалюваних термо-

статів спостерігали досить рівномірне пониження температури поверхневих шарів металу, при цьому розташування злитків не впливає на швидкість охолодження металу.

На другому етапі вивчали характер розподілу температури за перерізом охолоджуваних злитків з використанням розрахункової моделі, що є аналогічною до описаної у роботах [2,3].

Розподіл температури в охолоджуваних злитках визначали шляхом вирішення нелінійного диференціального рівняння теплопровідності для області M ($0 \leq x \leq B$, $0 \leq y \leq S$, $0 \leq z \leq H$):

$$\frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = a \nabla^2 T(x, y, z, \tau) \quad (3)$$

з крайовими умовами

$$T(x, y, z, \tau) = T_0 + 4\Delta T_1 \left(\frac{\Delta x}{2B} \right)^2 + 4\Delta T_2 \left(\frac{\Delta y}{2S} \right)^2 + 4\Delta T_3 \left(\frac{\Delta z}{H} \right)^2 ; \quad (4)$$

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n_i} \right)_{n_i=N} = \alpha_{\partial i} T_{i,3} - T_c ; \quad (5)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} , \quad (6)$$

де x, y, z – координати за довжиною, шириною та висотою злитків відповідно; $2B, 2S, H$ – довжина, ширина та висота злитків відповідно; T_{mi} , T_0 – температура на поверхні та на осі злитків відповідно; T_c – температура повітря у термостаті; $\alpha_{\partial i}$ – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією; a , λ – коефіцієнти теплопровідності та теплопровідності сталі відповідно.

Рівняння теплопровідності (3) з умовами (4)-(6) представляли у кінцево-різницевою вигляді та вирішували чисельними методами [4]. Значення коефіцієнта тепловіддачі конвекцією обчислювали за відомими залежностями [5,6] з урахуванням максимальної інтенсивності відведення теплоти на початковій стадії охолодження металу.

Результати, одержані на ПЕВМ, якісно узгоджуються з експериментальними даними температури центральних і поверхневих шарів злитків, розташованих у різних зонах робочого об'єму термостата. Порівняльний кількісний аналіз відхилень прогнозованої температури від фактичного її значення на різних стадіях охолодження злитків не перевищує 4-5 % щодо її абсолютних значень і 3-4 % щодо перепаду температури, що свідчить про достатню коректність розробленої методики.

Під час виконання обчислювального експерименту на ПЕВМ встановлено, що задану інте-

нсивність відведення теплоти на бічних і верхніх гранях злитків досягають відповідним підбиранням значень локального коефіцієнта тепловіддачі конвекцією. Надалі було виявлено раціональні умови охолодження металу в темпера-

турних інтервалах, відповідальних за формування його структури, та, як наслідок, запропоновано усереднені за температурними інтервалами швидкості його сповільненого охолодження, які наведено у табл. 1.

Таблиця 1 - Швидкість охолодження злитків в неопалювальних колодязях, град/год

Інтервал температури, °C	Геометричні розміри злитків, м			
	1,2 ≤ B ≤ 1,4		1,0 ≤ B < 1,2	
	0,4 ≤ H < 0,5	0,5 < H ≤ 0,6	0,4 ≤ H < 0,5	0,5 < H ≤ 0,6
850 < T ≤ 700	$\frac{60}{60}$	$\frac{55}{55}$	$\frac{58}{55}$	$\frac{52}{50}$
700 < T ≤ 600	$\frac{50}{50}$	$\frac{46}{45}$	$\frac{48}{45}$	$\frac{43}{45}$
600 < T ≤ 500	$\frac{30}{35}$	$\frac{26}{30}$	$\frac{28}{30}$	$\frac{24}{25}$
500 < T ≤ 400	$\frac{12}{25}$	$\frac{10}{25}$	$\frac{10}{20}$	$\frac{8}{18}$
400 < T ≤ 300	$\frac{9}{20}$	$\frac{8}{20}$	$\frac{7}{15}$	$\frac{6}{15}$
300 < T ≤ 200	$\frac{6}{10}$	$\frac{6}{10}$	$\frac{5}{10}$	$\frac{4}{10}$

Примітка: у чисельнику та знаменнику подано значення швидкості охолодження злитків за існуючим і скоригованим режимами

Як показали чисельні дослідження термонапруженого стану злитків запропонованому діапазоні змінювання швидкостей охолодження металу максимальне значення осевого стискувального термонапруження на 8-10 % нижче за межу міцності досліджених сталей. Таким чином встановлена можливість підвищення швидкості охолодження металу в межах, що рекомендують.

Практичну реалізацію скоригованих режимів охолодження злитків можна забезпечити шляхом переведення неопалюваних термостатів на роботу з примусовим обмиванням поверхні металу повітряними потоками, які нагнітає вентилятор відцентрового, що обладнано витрати повітря.

Результати дослідно-промислових випробувань скоригованих температурно-часових режимів охолодження злитків у термостаті, обладнаному вентилятором продуктивністю $3 \cdot 10^3$ м³/год., показали, що вимоги технологічної інструкції дотримуються, тобто забезпечується одержання задовільної твердості металу та унеможливується поява тріщин за мінімальним рівнем залишкових напружень.

Висновки. Виконані дослідження дозволили здійснити коригування температурно-часових параметрів процесу охолодження сталевих злитків у неопалюваних термостатах у напрямі підвищення їх пропускної спроможності (на 3-4 %) без погіршення якості металу.

Бібліографічний перелік

11. Тайц. Н. Ю. Технология нагрева стали [Текст] / Н. Ю. Тайц. – М. : Металлургия, 1962. – 259 с.
12. Баздырев В. С. Расчетно-экспериментальное исследование процесса охлаждения листовых слитков в электроколондах [Текст] / В. С. Баздырев, Ю. И. Усенко // Металлургическая теплотехника : сборник трудов Национальной металлургической академии Украины. – Днепропетровск. – НМетАУ, 2002. – С. 71-74.
13. Баздырев В. С. Экспериментально-расчетное изучение охлаждения листовых слитков в электрических колодах [Текст] / В. С. Баздырев, В. И. Иванов, Ю. И. Усенко // Металлургия : научные труды Запорожской государственной инженерной академии. – Запорожье : РИО ЗГИА, 1999. – Вып. 2. – С. 89-94.
14. Самарский, А. А. Теория разностных схем [Текст] / А. А. Самарский. – М. : Наука, 1983. – 616 с.
15. Михеев, М. А. Основы теплопередачи [Текст] / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М. : Энергия, 1973. – 319 с.
16. Аверин, С. И. Расчеты нагревательных печей [Текст] / С. И. Аверин, Э. М. Гольдфарб, В. В. Кравцов и др.; под ред. Н. Ю. Тайца. – Киев : Техніка, 1962. – 540 с.

Каюков Юрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры тепло- и гидроэнергетики, Запорожская государственная инженерная академия (Украина, Запорожье). E-mail: lenayura2010@mail.ru

Назаренко Ирина Анатольевна, кандидат технических наук, доцент кафедры тепло- и гидроэнергетики, Запорожская государственная инженерная академия (Украина, Запорожье). E-mail:

Кузьменко Алла Анатольевна, доцент кафедры тепло- и гидроэнергетики, Запорожская государственная инженерная академия (Украина, Запорожье).

Чижов Сергей Евгеньевич, старший преподаватель кафедры тепло- и гидроэнергетики, Запорожская государственная инженерная академия (Украина, Запорожье).

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ СЛИТКОВ В НЕОТАПЛИВАЕМЫХ ТЕРМОСТАТАХ

Выполнены расчетно-экспериментальные исследования процесса охлаждения стальных слитков в неотапливаемых термостатах после выхода из кристаллизаторов печей ЭШП. Предложены рациональные температурно-временные режимы охлаждения слитков, которые позволяют повысить пропускную способность данных агрегатов при неизменном качестве металла.

Ключевые слова: стальные слитки, печи ЭШП, охлаждение, неотапливаемые термостаты, термонапряженное состояние металла

Kayukov Yuri, candidate of technical sciences, Associate Professor of Department of Heat and Power Engineering and Hydro Power Energetic, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Ukraine, Zaporizhzhia). E-mail: lenajura2010@gmail.com

Nazarenko Irene, candidate of technical sciences, Associate Professor of Department of Heat and Power Engineering and Hydro Power Energetic, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Ukraine, Zaporizhzhia). E-mail: teplogidroenergetik@gmail.com

Kuzmenko Alla, Associate Professor of Department of Heat and Power Engineering and Hydro Power Energetic, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Ukraine, Zaporizhzhia). E-mail: teplogidroenergetik@gmail.com

Chizhov Sergey, Senior Teacher of Department of Heat and Power Engineering and Hydro Power Energetic, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Ukraine, Zaporizhzhia). E-mail: teplogidroenergetik@gmail.com

CALCULATION AND EXPERIMENTAL RESEARCHES OF PROCESS COOLING OF BARS IN UNHEATED THERMOSTATS

Calculation and experimental researches of cooling process for steel bars in the unheated thermostats after an exit from crystallizers of furnaces of ESR are executed. The rational temperature and times modes of cooling of bars which allow to promote the carrying capacity of these aggregates at unchanging quality of metal are offered. As practice of exploitation of thermostats shows, finishing period of cooling of bars of ESR is characterized by subzero intensity of taking of warmth from the superficial layers of metal which is accompanied by the substantial increase of duration of its stay in the swept volume of asms, and, consequently, and by the decline of their carrying capacity. Complex experimentally-theoretical approach to the mentioned problem is included implementation of series of experiments in relation to a study and analysis of distribution of temperature on the cut of bars of ESR on the different stages of their cooling, mathematical design of such process and calculation part in relation to determination of its rational temperature parameters. Experiments in relation to a study pour temperatures in the bars of ESR carried out during their transporting from crystallizers of furnaces of ESR to the unheated thermostat and further cooling in its swept volume. Studied kinetics of cooling of control bars which place in the different areas of the swept volume of the unheated thermostat by taking temperature of superficial and internal layers of metal. The hot ends of sensors of the flexible screened термокабеля placed in four points (on an axis and in the center of surface of overhead and lateral verges) in three (left butt-end, middle and right butt-end) crossrunners of bars. Distribution of temperature in the cooled bars was determined by the decision of three-dimensional nonlinear differential equation of heat-conducting. Equation of heat-conducting with regional terms presented in a finite-difference kind and decided numeral methods. Value of coefficient of heat emission it was calculated a convection after the known dependences taking into account maximal intensity of taking of warmth on the initial stage of cooling of metal. Results got on computer, high-quality comport with experimental data about temperature of central and superficial layers of bars, located in the different areas of the swept volume of Key words: steel bars, furnaces of ESR, unheated thermostats, cooling, , thermostressed state of metal

Стаття надійшла до редакції 22.02.2019 р.

Рецензент, проф. І.Г. Яковлева