УДК 621.783.224

Ю.М. Радченко[1], доцент, к.т.н.
В.Ф. Сапов[1], доцент, к.т.н.
В.І. Іванов[2], ст. викладач
В.О. Скачков[2], доцент, к.т.н.
А.А. Кузьменко[2], ст. викладач

ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ МАСИВНИХ ЗЛИТКІВ У АГРЕГАТАХ РАДІАЦІЙНОГО НАГРІВАННЯ

[1]*Національна металургійна академія України, м. Дніпропетровськ,*
[2]*Запорізька державна інженерна академія*

Проведены экспериментальные и теоретические исследования стадии охлаждения слитков специальных сталей при термической обработке в агрегатах радиационного нагрева. Установлена практическая возможность сокращения длительности данного периода при одновременном повышении производительности данных агрегатов и сохранении однородности структуры металла.

Виконано експериментальні та розрахункові дослідження стадії охолодження злитків спеціальних сталей під час термічної обробки в агрегатах радіаційного нагрівання. Встановлено практичну можливість скорочення тривалості даного періоду за одночасним підвищенням продуктивності даних агрегатів та збереженням однорідності структури металу.

Вступ. Підвищені вимоги до точності реалізації режимів термічної обробки злитків спеціальної сталі зумовили необхідність застосування на декількох металургійних підприємствах країн СНД спеціальних теплових агрегатів: агрегатів радіаційного нагрівання (АРН).

Такими агрегатами є циліндрові зварні конструкції, що виконано із сталевого листа та футеровано легковагим вогнетривом. Встановлена потужність АРН зосереджена у трьох електричних зонах за висотою робочого обсягу з наступним розподілом: перша (нижня) зона – 155, друга (середня) – 135 і третя (верхня) – 110 кВт.

До робочого обсягу АРН завантажують два злитки прямокутної форми розмірами (1800…2000) х (1100…1400) х (400…600) мм або чотири злитки циліндрової форми діаметром 500…600 мм і висотою 2500…3000 мм.

Підведення теплоти до злитків на стадії нагрівання металу виконують за допомогою електричних нагрівачів опору дротяного типу, що розташовано за периметром бічних стін робочого обсягу АРН та захищено від контакту з металом, що обробляють, екраном з жаротривкої сталі.

Відведення теплоти від поверхні злитків на стадії охолоджування металу здійснюють повітрям, що підводять верхнім і нижнім нагнітальними коробами, встановленими за периметром зовнішньої бічної поверхні корпусу АРН, які сполучено повітропроводом, обладнаним спеціальним циркуляційним вентилятором відцентрового типу продуктив-ністю $15 \cdot 10^3$ м^3/год.

Основну частину повітря до робочого обсягу даного агрегату підводять верхнім коробом за допомогою системи дросельних клапанів, що розміщено за периметром верхнього та нижнього нагнітальних коробів з використанням отворів, рівномірно розташованих як на його внутрішній бічній поверхні, так і на поверхні захисного екрану. Решту повітря направляють повітропроводом до нижнього короба, сполучено-го

радіальним кільцевим зазором з відповідною частиною робочого обсягу агрегату, та залучають до процесу рециркуляції.

У інтервалі температури 900…550 °С, коли циркуляційний вентилятор не працює, охолодження злитків здійснюють шляхом відведення теплоти від їхньої поверхні вільною конвекцією, інтенсивність якої регулюють мірою відкриття дросельних клапанів. За температури поверхні злитків нижче ніж 550 ºС для відведення теплоти від поверхневих шарів металу, що охолоджують, використовують примусову конвекцію, шляхом циркуляції потоків повітря у робочому обсязі АРН з використанням вищезазначеного вентилятора.

Досвід експлуатації агрегатів даного типу свідчить про наявність високої точності та рівномірності нагрівання металу на стадії підвищення температури злитків до заданого значення, а також недостатньої інтенсивності відведення теплоти від поверхневих шарів металу на завершальному етапі його примусового охолодження, що здійснюють потоками повітря, які нагнітають циркуляційним вентилятором до робочого обсягу АРН.

Постановка завдання. Завданням даних досліджень є розробка та реалізація заходів щодо усунення причин зниження інтенсивності відведення теплоти від поверхні сталевих злитків на стадії охолодження у АРН.

Головна частина досліджень. На одному з металургійних підприємств СНД експериментальним шляхом вивчали тепловий стан злитків прямокутної (1800 х 1200 х 400 мм) та циліндрової (діаметр – 500 мм, довжина – 2000 мм) форми на стадії пониження температури їх поверхневих і серединних шарів у АРН. Під час досліджень контролювали температуру металу у найбільш характерних точках поверхні та геометричному центрі злитків з використанням гнучких хромель-алюмелєвих термоелектричних термометрів [1,2].

Результати вимірювань показали, що за температури металу вище ніж 550 ºС характер та інтенсивність омивання поверхні злитків потоками повітря визначається кількістю й мірою відкриття дросельних клапанів. За відкритим положенням дросельних клапанів, розташованих за периметром верхнього нагнітального короба, рух потоків повітря здійснюється тільки через верхню частину робочого обсягу АРН, що дозволяє інтенсивніше охолоджувати відповідну частину злитка, а під час відкритого положення й клапанів, розміщених за периметром нижнього нагнітального короба, організується циркуляція потоків повітря за всім робочим обсягом АРН, чим забезпечують задану швидкість пониження температури поверхневих шарів металу та його достатньо рівномірне охолоджування.

По досягненні поверхнею злитків температури, що дорівнює 550 ºС, включають циркуляційного вентилятора. При цьому здійснюється інтенсивне нагнітання потоків повітря до робочого обсягу АРН і в інтервалі температури 600…400 ºС спостерігають наявність достатньо рівномірного та із заданою швидкістю охолодження поверхневих шарів злитків. В той же час за температури металу нижче ніж 400 ºС зафіксовано зниження інтенсивності відведення теплоти від поверхневих шарів нижньої частини злитків, значення якої, у міру пониження температури металу, зростає.

Так, якщо для верхньої частини злитків прямокутної форми швидкість пониження температури поверхневих шарів металу відповідає заданому значенню (30…40 град/год.) впродовж всього періоду охолодження, то для нижньої частини їх поверхні на етапі примусового охолодження, зокрема за температури, що нижче 400 ºС, спостерігається відхилення фактичної швидкості охолодження поверхневих шарів металу від заданого значення, величина якого зростає та наприкінці даного періоду скла-

дає 35…40%.

Нерівномірність охолодження злитків циліндрової форми в АРН має більш виражений характер. Так, наприкінці періоду охолодження металу відхилення фактичного значення швидкості пониження температури поверхневих шарів нижньої частини зазначених злитків від заданої величини (45…50 град/год.) сягає 65…70%.

Погіршення умов охолодження злитків на етапі примусового відведення теплоти від їх поверхневих шарів може бути наслідком пониження інтенсивності відведення теплоти конвекцією в інтервалі температур нижче 400 ºС, так і зростанням впливу віддавання теплоти масивним черенем АРН. Як результат, спостерігають збільшення тривалості періоду охолодження та термічної обробки злитків у цілому, а також зниження продуктивності теплових агрегатів даного типу.

Для виявлення умов відведення теплоти з робочого обсягу АРН, що забезпечують на стадії примусового охолодження злитків прямокутної та циліндрової форми задану швидкість пониження температури, здійснювали математичне моделювання зазначеної стадії процесу.

Під час розробки математичної моделі приймали низку припущень, зокрема про рівномірність розподілу температури повітря, що охолоджує, в робочому обсязі АРН, який також є функцією часу; незначну частку обміну теплотою випромінюванням, яку під час розрахунків не враховували; відсутність втрат теплоти через масивний суцільний черінь АРН, а також залежність теплофізичних властивостей металу від температури [3].

Розглядали вісесиметричну двовимірну теплову задачу для злитків прямокутної та циліндрової форми.

Так, розподіл температури за перерізом злитків прямокутної форми під час охолодження в АРН визначали шляхом розв’язання нелінійного диференційного рівняння теплопровідності вигляду

$$C_{\upsilon}\,\frac{\partial U(x,z,\tau)}{\partial \tau}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda\frac{\partial U(x,z,\tau)}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\lambda\frac{\partial U(x,z,\tau}{\partial z}\right] \qquad (1)$$

в області A_1 $[\,0\le x\le 0{,}5L\,,\;\; 0\le z\le B\,,\;\; \tau_{n,1}\le\tau\le\tau_{к,1}\,]$

за межових і початкових умов

$$-\lambda\frac{\partial U(x,z,\tau)}{\partial x}\bigg|_{x=0}=\alpha_{к1}\cdot\left[U_1(x,z,\tau)-T_n\,\right]\,; \qquad (2)$$

$$-\lambda\frac{\partial U(x,z,\tau)}{\partial x}\bigg|_{x=2A}=\alpha_{к,2}\cdot\left[U_2(x,z,\tau)-T_n\,\right]\,; \qquad (3)$$

$$-\lambda\frac{\partial U(x,z,\tau)}{\partial z}\bigg|_{z=0}=0\;; \qquad (4)$$

$$-\lambda\frac{\partial U(x,z,\tau)}{\partial z}\bigg|_{z=B}=\alpha_{к,3}\cdot\left[U_3(x,z,\tau)-T_n\,\right]\,; \qquad (5)$$

$$U(x,z,0)=T_{oc}-4\,\Delta T_1\cdot\left(\frac{\Delta x}{2A}\right)^2-4\,\Delta T_2\cdot\left(\frac{\Delta z}{B}\right)^2\,. \qquad (6)$$

Розподіл температури за перерізом злитків циліндрової форми, що охолоджу-

ють, визначали шляхом розв'язання нелінійного диференційного рівняння теплопровідності вигляду

$$C_{\upsilon}\cdot\frac{\partial T(r,z,\tau)}{\partial\tau}=\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial}{\partial r}\left[r\cdot\lambda\cdot\frac{\partial T(r,z,\tau)}{\partial r}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\lambda\cdot\frac{\partial T(r,z,\tau)}{\partial z}\right] \tag{7}$$

в області A_2 $[\,0\le r\le R\,,\ \ 0\le z\le H\,,\ \ \tau_{n,2}\le\tau\le\tau_{к,2}\,]$
за межових і початкових умов:

$$-\lambda\frac{\partial U(r,z,\tau)}{\partial r}\bigg|_{r=0}=0\ ; \tag{8}$$

$$-\lambda\frac{\partial U(r,z,\tau)}{\partial r}\bigg|_{r=R}=\alpha_{к4}\cdot\left[U_1(r,z,\tau)-T_n\right]; \tag{9}$$

$$-\lambda\frac{\partial U(r,z,\tau)}{\partial z}\bigg|_{z=0}=\alpha_{к,5}\cdot\left[U_3(\mathrm{r},z,\tau)-T_n\right]; \tag{10}$$

$$-\lambda\frac{\partial U(r,z,\tau)}{\partial z}\bigg|_{z=H}=\alpha_{к,6}\cdot\left[U_3(\mathrm{r},z,\tau)-T_n\right]; \tag{11}$$

$$T(r,z,0)=T_{0,c}+4\left[\Delta T_3\cdot\left(\frac{\Delta r}{2R}\right)^2+\Delta T_4\cdot\left(\frac{\Delta z}{H}\right)^2\right], \tag{12}$$

де C_{υ} – об'ємна теплоємність металу, кДж/(м^3·К); $C_{\upsilon}=c\cdot\rho$; $c=c(T)$ – питома теплоємність металу, Дж/(кг·К); $\rho=\rho(T)$ – щільність металу, кг/м^3; $\lambda=\lambda(T)$ – коефіцієнт теплопровідності металу, Вт/(м·К); x, z, r – просторові змінні; τ – часова змінна; $2L$, B – довжина та висота злитків прямокутної форми, м, відповідно; $2R$, H – діаметр і висота злитків циліндрової форми, м, відповідно; α_i – коефіцієнт віддавання теплоти конвекцією, Вт/(м^2·К); T_n, $T_м$ – температура повітря, що охолоджує, та металу, якого охолоджують, К, відповідно; $T_{0,c}$ – температура на осі злитка на початку періоду охолодження, К.

Розв'язання крайових задач (2)-(5) і (8)-(11) з початковими умовами (6) і (12) для рівнянь (1) і (7) здійснювали чисельно з використанням неявної абсолютно стійкої різницевої схеми. Шукані сіткові функції обчислювали методом подовжнього та поперечного прогону за ітераційним циклом з використанням алгоритму, що описано в роботі [4], який дозволяє реалізувати обчислювальний експеримент над моделлю з метою аналізу й оптимізації технологічного процесу.

Під час проведення обчислень значення параметрів для межових умов (2)-(7) і (9)-(12) змінювали відповідно до режимів охолодження, що задаються технологією термічної обробки злитків за межами, прийнятними для АРН. Змінювання інтенсивності відведення теплоти на поверхні злитків, яке спостерігається на різних етапах їх примусового охолодження, враховували шляхом варіювання значень коефіцієнтів віддавання теплоти конвекцією $\alpha_к$. Значення даного коефіцієнта у інтервалі температур, що досліджували, розраховували з використанням відомих емпіричних залежностей [5] та подавали як безперервну монотонно убуваючу функцію з максимальною інтенсивністю відведення теплоти на початковій стадії охолодження.

Адаптацію розробленої математичної моделі до реальних умов примусового охолодження злитків у АРН здійснювали шляхом зіставлення розрахункових даних

про змінювання температури металу з результатами її експериментального визначення на різних етапах даного процесу. Встановлено якісне узгодження результатів розрахункового дослідження розподілу температури у металі з даними її фізичного вимірювання для злитків, що розташовували у різних зонах робочого обсягу АРН. Також підтверджено кількісне збігання температури на різних стадіях охолодження металу, що свідчить про достатню коректність розробленої моделі. При цьому відхилення розрахункових значень температури металу від виміряних на різних стадіях його примусового охолодження є сумірним із погрішністю розрахункової та вимірювальної схем, а, отже, дозволяє використовувати запропоновану модель для об'єктивної оцінки умов охолодження злитків у АРН. Результати подальшого розрахункового аналізу розподілу температури у злитках прямокутної та циліндрової форми, що розташовували на різних ділянках череня АРН, дозволили встановити ідентичні умови їхнього охолодження.

Надалі, шляхом варіювання значень коефіцієнтів віддавання теплоти конвекцією α_i, з використанням ПЕОМ встановили, що заданої інтенсивності пониження температури поверхні нижньої частини злитків на заключному етапі охолодження (в інтервалі температур 450…200 °С) можна сягати за величини зазначеного коефіцієнта не менше ніж 90…100 Вт/(м^2·К).

Подальшими експериментами з використанням холодної аеродинамічної моделі агрегату, що досліджують, виконаної з дотриманням геометричної та кінематичної подібності [6], вивчали шляхи практичного досягнення заданої інтенсивності відведення теплоти з бічної поверхні злитків прямокутної та циліндрової форми потоками повітря, що циркулюють у його робочому обсязі. При цьому досліджували можливість застосування могутніших циркуляційних вентиляторів з радіальним (існуючим) і тангенціальним (запропонованим) підведенням повітря до робочого обсягу АРН.

За наявності радіального підведення повітря в АРН було зафіксовано неоднорідного характеру течії потоків повітря, причому в нижній частині робочого обсягу агрегату кількості повітря було явно недостатньо. Під час подальшого збільшення потужності циркуляційного вентилятора зростала інтенсивність течії потоків повітря в робочому обсязі агрегату, проте не вдавалося сягати достатнього рівня рівномірності обтікання ними бічної поверхні злитків, що охолоджують. Як наслідок, не забезпечувалися умови віддавання теплоти, що є достатніми для охолодження поверхні металу із заданою швидкістю.

За наявності тангенціального підведення повітря на вході до робочого обсягу АРН створюється вихороподібний рух потоків, який набуває обертально-поступального характеру та дозволяє весь робочий обсяг даного агрегату заповнити повітрям, завдяки чому віддавання теплоти конвекцією у нижній його частині суттєво зростає. Як наслідок, середня швидкість течії потоків повітря наближається до рівня, що забезпечує охолодження злитків із заданою швидкістю. Розрахунками, а також подальшими експериментами з використанням даної моделі, встановлено, що необхідного та достатнього для практики рівня інтенсивності віддавання теплоти на бічній поверхні злитків, а також однорідності розподілу швидкості потоків повітря у робочому обсязі АРН, сягають під час заміни існуючого циркуляційного вентилятора на вентилятор продуктивністю $50 \cdot 10^3$ м^3/год.

Перевірку результатів аеродинамічного моделювання здійснювали на одному з діючих АРН, що обладнано тангенціальним підведення повітря. Ступінь рівномірності пониження температури бічної поверхні листових і сортових злитків за існуючим і запропонованим варіантами їхнього примусового охолоджування оцінювали шляхом

вимірювання температури поверхневих і серединних шарів металу з використанням вищезазначених термоелектричних термометрів та подальшого обчислення значень середньоквадратичного відхилення, яке розраховували за формулою:

$$\sigma = \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(\tau - \bar{\tau} \right)^2 \right]^{0,5}, \qquad (13)$$

де τ_i – тривалість примусового охолодження *i*-ої точки злитка від первинного значення температури до її рівня, що оцінюється величиною 200 ºС, коли злиток вивантажують з АРН (фіксують за показаннями *i*-го термоелектричного термометра, встановленого на поверхні злитків); $\bar{\tau}$ – середньоарифметична тривалість примусового охолодження злитка в даному експерименті, значення якої розраховують за показаннями *i*-их термоелектричних термометрів; *n* – кількість вимірювань температури.

Аналіз одержаних результатів дозволив встановити, що під час використання тангенціального підведення повітря до робочого обсягу АРН рівень значень дисперсії (σ^2 = 0,005 і 0,009 для злитків прямокутної та циліндрової форми відповідно) є суттєво нижчим, ніж за існуючим варіантом (0,030 і 0,038 відповідно).

Результати випробувань за виробничих умов щодо реалізації запропонованого заходу свідчать про максимальне наближення середньої швидкості течії потоків повітря в робочому обсязі АРН до рівня, коли забезпечується пониження температури злитків із заданою швидкістю впродовж всього періоду охолодження. Окрім того, для металу, охолодженого за запропонованим варіантом, було зафіксовано однорідніщу мікроструктуру з розташуванням карбідів за полем зерна.

Зіставлення якісних показників термічної обробки злитків одного і того ж металу до та після реалізації тангенціального підведення повітря до робочого обсягу АРН свідчить про підвищення дисперсності мікроструктури та комплексу механічних властивостей металу.

Висновки. Результати експериментально-розрахункових досліджень процесу охолодження масивних листових і сортових злитків у агрегатах радіаційного нагрівання дозволили розробити заходи щодо удосконалення стадії примусового охолодження металу у їх робочому обсязі шляхом скорочення тривалості даного періоду за одночасного підвищення продуктивності даних агрегатів та збереження однорідності структури металу, що обробляють.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Експериментальне дослідження процесу охолоджування листових злитків в АРН / *В. І. Іванов,* Ю. М. Радченко, В. Ф. Сапов [та ін.] // Научное пространство Европы-2009: междунар. научн.-техн. конф., (7-15 апреля 2009 г., Internet): тезисы докл. – Днепропетровск: Наука и образование, 2009. – Т. 18 (Технические науки). – С. 3-4.
2. Дослідження процесу охолоджування сортових злитків в АРН / *В. Ф. Сапов,* В. І. Іванов, Ю. М. Радченко [та ін.] // Актуальные проблемы современных наук-2009: междунар. научн.-техн. конф., (7-15 июня 2009 г., Internet): тезисы докл. – Днепропетровск: Наука и образование, 2009. – Т. 22 (Технические науки). – С. 8-9.
3. *Казанцев Е. И.* Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования: [учебник для студ. высш. учеб. зав.] / Е. И. Казанцев. – [2-е изд.]. – М.: Металлургия, 1975. – 367 с.
4. Экспериментально-расчетное исследование теплового состояния слитков при охлаждении в термостатах / *Ю. И. Усенко,* В. И. Иванов, В. Ф. Сапов [и др.] // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. – Вип. 102.

– С. 63-70 (Серія «Металургія»).
5. *Пуговкин А. У.* Рециркуляционные пламенные печи. Расчет и конструирование / А. У. Пуговкин. – [2-е изд]. – Л.: Машиностроение, 1975. – 200 с.
6. *Михеев М. А.* Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – [2-е изд]. – М.: Энергия, 1977. – 343 с.

Стаття надійшла до редакції 30.06.2009 р.
Рецензент – проф. Є.М. Крючков