

НАГРЕВ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ В САДКЕ КАМЕРНЫХ ПЕЧЕЙ С ПОЗИЦИИ УПРАВЛЕНИЯ

Запорожская государственная инженерная академия

Уточнено причины та механізм виникнення нестандартності нагрівання садки у камерних печах, визначено взаємозв'язок розподілу температурних полів з тепловим режимом і режимом тиску. Розроблено спосіб вирівнювання температури в робочому просторі за рахунок застосування технології опалення з роздільним подаванням декількох паливних газів.

Уточнены причины и механизм возникновения нестандартности нагрева садки в камерных печах, определена взаимосвязь распределения температурных полей с тепловым режимом и режимом давления. Разработан способ выравнивания температуры в рабочем пространстве за счет применения технологии отопления с раздельной подачей нескольких топливных газов.

Состояние вопроса. Неравномерность нагрева садки по объему при термообработке металлических изделий в пламенных камерных печах приводит к нестандартности термообработки, заключающейся в отличии физико-механических свойств отдельных изделий.

Причиной этого, как правило, считают только неравномерность распределения температуры в рабочем пространстве камерных печей. В связи с чем, ужесточаются требования по ограничению допустимого перепада температуры по объему печи.

Температурное поле в печи формируется путем выбора количества, конструкции и места расположения горелочных устройств, технологии сжигания топлива, а также организации движения газов.

Камерные печи, с позиции управления, относят к классу объектов периодического действия. Управление нагревом сводится к определению и реализации во времени рациональных тепловых и температурных режимов, обеспечивающих технологически необходимую динамику нагрева изделий. Известно, что стандартность термообработки определяется не столько конечным тепловым состоянием изделий, сколько скоростью и равномерностью нагрева.

Постановка задачи. Задачей исследований является уточнение причин и механизма возникновения нестандартности нагрева изделий в садке, определение рациональной технологии отопления печей и способа управления их тепловой работой.

Предпосылки и решение задачи. Изделия, подвергаемые термообработке, распределены в рабочем пространстве печи по специальным схемам размещения с использованием дополнительной оснастки – конвективных прокладок, подставок и пр. Расположение изделий обосновывается результатами физического моделирования, а также опытными данными.

На рис. 1 в качестве примера размещения показано поперечное сечение камерной термической печи для обработки литых электродов после полунепрерывной разливки специальных сталей для дальнейшего их электрошлакового переплава в условиях ОАО «Электрометаллургический завод «Днепропецсталь». Садка состоит из нескольких электродов, уложенных в металлические бугеля. Имеет место односто-

роннее отопление печи природным газом при помощи горелок типа «труба в трубе», удаление продуктов сгорания выполняют через дымовые окна, расположенные на уровне пода с противоположной по отношению горелок стороны.

В садке образуются проточные зоны, через которые греющие газы проникают в промежутки между изделиями. Общий объемный газовый поток поступающих греющих газов $V_{\tilde{a}\tilde{a}}$ можно представить как сумму потоков $V_{\tilde{a}\tilde{a}_i}$:

$$V_{\tilde{a}\tilde{a}} = \sum_{i=1}^{i=n} V_{\tilde{a}\tilde{a}_i}, \quad (1)$$

где n – количество проточных зон, $i = 1, 2 \dots n$.

Температуру газов в режиме идеального перемешивания в каждой зоне t_{ζ_i} можно определить из уравнений мгновенного теплового баланса i -ой зоны:

$$q_{i\partial_i}(\tau) = V_{\tilde{a}\tilde{a}_i} \cdot C_{\tilde{a}\tilde{a}_i} \cdot t_{\tilde{a}\tilde{a}_i} = \sum_{k=1}^{k=l} \alpha_{i_k}^{\Sigma} (t_{\zeta_i} - t_{\zeta\tilde{a}_{k_i}}) \cdot F_{i_k} + V_{\tilde{m}\tilde{a}_i} \cdot C_{\tilde{m}\tilde{a}_i} \cdot t_{\tilde{m}\tilde{a}_i} + q_{i\partial_i}(\tau), \quad (2)$$

где $q_{i\partial_i}(\tau)$ – теплота, подводимая к i -ой зоне как функция времени τ ; $C_{\tilde{a}\tilde{a}_i}$ – теплоемкость i -ой составляющей греющих газов; $t_{\tilde{a}\tilde{a}_i}$ – температура греющих газов, поступающих в i -ую зону (при сжигании топлива непосредственно в камере печи $t_{\tilde{a}\tilde{a}_i}$ является калориметрической температурой горения [1]); $\alpha_{i_k}^{\Sigma}$ – суммарный коэффициент теплоотдачи греющих газов в i -ой зоне k -му изделию, контактирующему с i -ой зоной; $t_{\zeta\tilde{a}_{k_i}}$ – температура поверхности k -го изделия, получающего теплоту в i -ой зоне; F_{i_k} – площадь тепловоспринимающей поверхности k -го изделия в i -ой зоне; $V_{\tilde{m}\tilde{a}_i}$ – объемный расход продуктов сгорания, покидающих i -ую зону; $C_{\tilde{m}\tilde{a}_i}$ – теплоемкость продуктов сгорания; $q_{i\partial_i}(\tau)$ – потери теплоты в i -ой зоне в окружающую среду, аккумулированной в кладке, переток в соседние зоны и т.д.; k – номер изделия, получающего теплоту в i -ой зоне, $k = 1, 2 \dots l$.

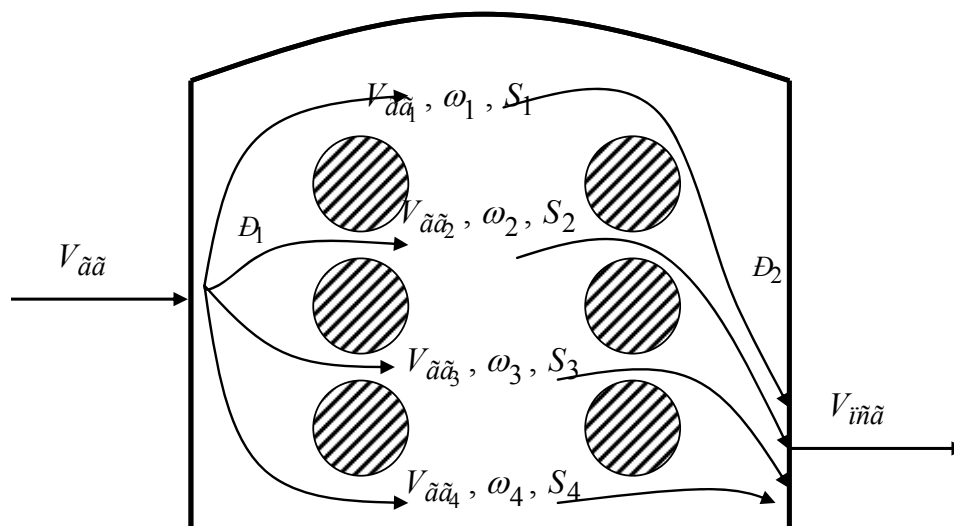


Рисунок 1 – Схема расположения изделий и распределения газовых потоков в рабочей камере печи

Принимая, что $V_{\tilde{a}\tilde{a}_i} = V_{\tilde{m}\tilde{a}_i} = V_i$ и $C_{\tilde{a}\tilde{a}_i} = C_{\tilde{m}\tilde{a}_i} = C$, температуру в i -ой зоне из урав-

нения (2) можно представить в виде:

$$t_{\zeta_i} = \frac{q_{i\delta_i}(\tau) - q_{i\delta_i}(\tau)}{V_i \cdot C + \sum_{k=1}^l \alpha_{i_k}^{\Sigma} \cdot F_{i_k}} + \frac{\sum_{k=1}^{k=l} \alpha_{i_k}^{\Sigma} \cdot F_{i_k}}{V_i \cdot C + \sum_{k=1}^{k=l} \alpha_{i_k}^{\Sigma} \cdot F_{i_k}} \cdot t_{\zeta\ddot{a}_{k_i}}. \quad (3)$$

Вводя промежуточные обозначения:

$$k_{1i} = \frac{1}{V_i \cdot C + \sum_{k=1}^{k=l} \alpha_{i_k}^{\Sigma} \cdot F_{i_k}}; \quad k_{2i} = \frac{\sum_{k=1}^{k=l} \alpha_{i_k}^{\Sigma} \cdot F_{i_k}}{V_i \cdot C + \sum_{k=1}^{k=l} \alpha_{i_k}^{\Sigma} \cdot F_{i_k}}; \quad P_i = \frac{q_{i\delta_i}(\tau)}{V_i \cdot C + \sum_{k=1}^{k=l} \alpha_{i_k}^{\Sigma} \cdot F_{i_k}},$$

можно переписать уравнение (3) в виде:

$$t_{\zeta_i} = k_{1i} \cdot q_{i\delta_i}(\tau) + k_{2i} \cdot t_{\zeta\ddot{a}_{i_k}} - P_i. \quad (4)$$

Согласно уравнению (4) температура в каждой зоне определяется как приходом теплоты в данную зону $q_{i\delta_i}(\tau)$, так и температурой изделий, контактирующих с этой зоной. При дефиците подводимой теплоты $q_{i\delta_i}$ возможно состояние, при котором $t_{\zeta\ddot{a}_{i_k}} < t_{\zeta_i}$. В этом случае направление теплопередачи изменяется, k -е изделие отдает теплоту в i -ую зону и происходит переток теплоты из одной зоны в другую.

Принимая, что k -е изделие получит теплоту из двух зон i и $i+1$ и, используя принцип суперпозиции, динамику нагрева термически тонкого k -го изделия, $t_{\zeta\ddot{a}_k}$ можно представить при помощи дифференциального уравнения первого порядка [1]:

$$\frac{\dot{I}_{\zeta\ddot{a}_k} \cdot \tilde{N}_{\zeta\ddot{a}_k}}{\alpha_{i_k}^{\Sigma} \cdot F_{i_k} + \alpha_{i+1_k}^{\Sigma} \cdot F_{i+1_k}} \cdot \frac{dt_{\zeta\ddot{a}_k}}{d\tau} + t_{\zeta\ddot{a}_k} = a_1 \cdot t_{\zeta_i} + a_2 \cdot t_{\zeta_{i+1}}, \quad (5)$$

где $\dot{I}_{\zeta\ddot{a}_k}$ – масса k -ого изделия; $\tilde{N}_{\zeta\ddot{a}_k}$ – теплоемкость k -го изделия;

$$a_1 = \frac{\alpha_{i_k}^{\Sigma} \cdot F_{i_k}}{\alpha_{i_k}^{\Sigma} \cdot F_{i_k} + \alpha_{i+1_k}^{\Sigma} \cdot F_{i+1_k}}; \quad a_2 = \frac{\alpha_{i+1_k}^{\Sigma} \cdot F_{i+1_k}}{\alpha_{i_k}^{\Sigma} \cdot F_{i_k} + \alpha_{i+1_k}^{\Sigma} \cdot F_{i+1_k}}.$$

Расчетная схема для оценки динамики нагрева k -го изделия приведена на рис. 2.

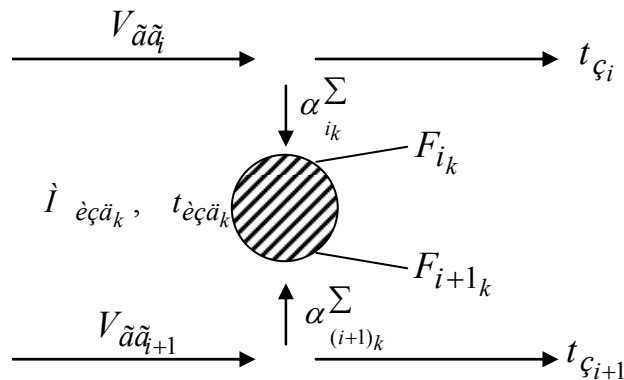


Рисунок 2 – Расчетная схема для оценки динамики нагрева k -го изделия

Из уравнения (5) следует, что при прочих равных условиях длительность нагрева k -го изделия определяется величиной постоянной времени $\dot{O}_{i,k}$:

$$\dot{O}_{i,k} = \frac{\dot{I}_{\dot{e}\dot{\zeta}\ddot{a}_k} \cdot \dot{N}_{\dot{e}\dot{\zeta}\ddot{a}}}{\alpha_{i_k}^{\Sigma} \cdot F_{i_k} + \alpha_{i+1_k}^{\Sigma} \cdot F_{i+1_k}}. \quad (6)$$

Так, с точностью 5,0% длительность нагрева k -го изделия $\tau_{i,k} \approx 3\dot{O}_{i,k}$.

Для садки, состоящей из большого количества изделий, нестандартность термообработки объясняется, прежде всего, различием динамики времени нагрева из-за отличия постоянных времени нагрева изделий.

При форсированных режимах нагрева температуру в печи следует ограничивать из условия нагрева изделия с наименьшей постоянной времени $\dot{O}_i^{\min}$, общую длительность нагрева устанавливать из условия нагрева изделия с наибольшей постоянной времени $\dot{O}_i^{\max}$.

На рис. 3 показано изменение температуры изделий при $\dot{O}_i^{\min}$, $\dot{O}_i^{\max}$ и одинаковой температуре во всех зонах t_{ζ} .

Как следует из рис. 3, в любой момент времени τ_{ϕ} температура изделий отличается на величину $\Delta t_{\text{изд.}}$. Различие температур особенно существенно в начале нагрева, в конце происходит выравнивание температуры всех изделий. Из этого следует, что термообработку независимо от термической массивности изделий необходимо осуществлять по температурному графику, содержащему не менее двух ступеней нагрева и выдержки. Достижение некоторой одинаковой фиксированной температуры изделий $\Delta t_{\text{изд.}\phi}$ происходит с запаздыванием во времени $\Delta \tau$, которое тем значительнее, чем больше различие во времени постоянных времени нагрева. Смещение во времени особенно существенно в конце нагрева на пологих участках кривых.

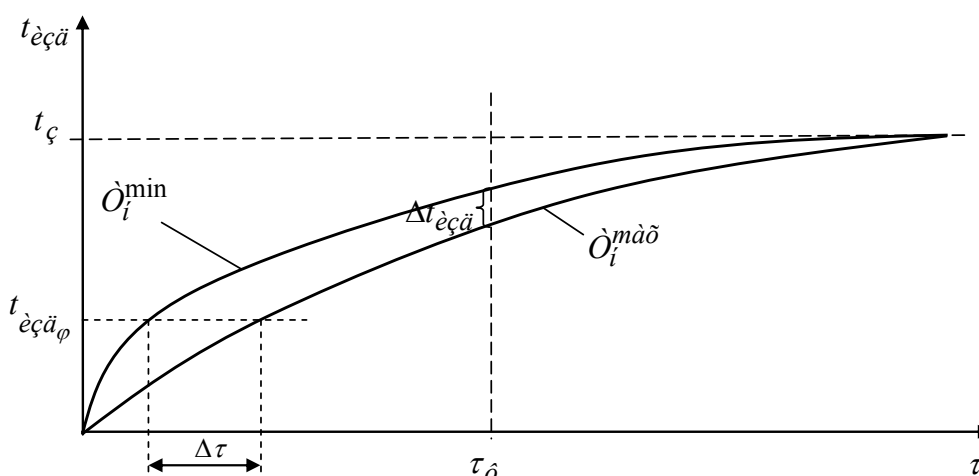


Рисунок 3 - Динамика изменения температуры изделий при различных значениях $\dot{O}_i$

Учитывая, что структурные преобразования в металле при термообработке происходят во времени, различие времени пребывания изделий при разной темпера-

туре приводит к нестандартности термообработки изделий.

Очевидно, что для уменьшения смещения во времени Δt на температурных графиках целесообразно предусмотреть несколько ступеней выдержки для выравнивания температуры изделий.

В общем случае $\alpha_{i_k}^\Sigma$ и $\alpha_{i+1_k}^\Sigma$ не являются физическими постоянными и характеризуют отдачу теплоты излучением и конвекцией. Их величины зависят от геометрии и размера изделий, режима обтекания, температуры греющей среды и т.п. Возможно, что даже при абсолютно равномерном температурном поле, то есть $t_{31} = t_{32} \dots = t_{33} = t_{3k}$ теплоотдача от греющих газов, вследствие вариации значений α_i^Σ отличается, различна и динамика нагрева изделий.

Исходя из того, что лимитирующим звеном во внешнем теплообмене является доставка теплоты в зоны, осуществляемая путем конвекции, основным управляющим воздействием для обеспечения равномерности распределения теплоты между отдельными проходными зонами является изменение общего расхода греющих газов. Необходимо обеспечить, с одной стороны, такую скорость движения газов, при которой осуществляется наибольшая теплоотдача, а, с другой – режим идеального перемешивания газов, являющийся необходимым условием для обеспечения стандартности нагрева садки [2].

Реализация данных условий возможна путем стабилизации режима отопления, управления движением газов и технологии сжигания топлива.

Для реализации поставленных условий определены основные положения движения газов в проходных каналах садки.

На основании закона сохранения импульса можно записать:

$$S_{\text{общ}} \cdot (\delta_1 - \delta_2) = \sum_{i=1}^i \rho \cdot S_i \cdot \omega_i^2, \text{ или } (\delta_1 - \delta_2) \cdot \sum_{i=1}^i S_i = \rho \cdot \sum_{i=1}^i S_i \cdot \omega_i^2, \quad (7)$$

где $S_{\text{общ}}$ – суммарное сечение всех проходных каналов в садке; $p_1 - p_2$ – перепад давления в рабочей камере печи; ρ – плотность газов; S_i – сечение i -го проходного канала в садке; ω_i – скорость течения газов в i -ой зоне.

Учитывая, что $\omega_i = V_{\text{ncgi}} / S_i$, уравнение (7) можно представить в виде:

$$(\delta_1 - \delta_2) \cdot \sum_{i=1}^i S_i = \rho \cdot \sum_{i=1}^n S_i \cdot V_{\text{a}i}^2. \quad (8)$$

Абсолютные значения p_1 и p_2 выбирают из условия исключения газообмена между рабочей камерой печи и внешней атмосферой и поддерживаются постоянными в течение всего цикла термообработки.

Таким образом, задача стабилизации газодинамического режима (задача управления) сводится к стабилизации рационального расхода греющих газов во всех проточных зонах, а скорость газов для достижения изотермичности потока должна соответствовать автотемпературному режиму.

Управление тепловой мощностью целесообразно реализовать путем изменения температуры греющих газов, вводимых в рабочую камеру, а не изменением тепловой нагрузки.

Примером управления сжиганием и движением газов с целью выравнивания температуры по объему рабочей камеры высокотемпературных нагревательных печей является внешняя и внутренняя рециркуляция печных газов, реверс движения печных газов, использование качающихся горелок, импульсное отопление и пр.

Для термических печей окончательный выбор осуществляют как с учетом технико-экономических показателей, так и из условия обеспечения качества термообработки, стандартности нагрева.

Тепловая схема печей должна обеспечить управляемый газодинамический режим, а также теплотехнически и технологически обоснованный тепловой режимы. Перспективной является технология отопления с отдельной подачей нескольких топливных газов и комбинированием их непосредственно при сжигании [3].

Расходы газов выбирают на основании решения следующих систем уравнений:

$$\left. \begin{aligned} B_{\tilde{a}\tilde{a}} \cdot q_{\tilde{a}\tilde{a}} + B_{n\tilde{a}} \cdot q_{n\tilde{a}} &= q_{i\tilde{a}\tilde{u}} \\ V_{\tilde{a}\tilde{a}} \cdot B_{\tilde{a}\tilde{a}} + V_{i\tilde{a}} \cdot B_{n\tilde{a}} &= V_{i\tilde{a}\tilde{u}} \end{aligned} \right| \begin{aligned} i\tilde{d}\tilde{e} - q_{\tilde{a}\tilde{a}} \cdot B_{\tilde{a}\tilde{a}}^{max} &< q_{i\tilde{a}\tilde{u}} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} B_{\tilde{a}\tilde{a}} \cdot q_{\tilde{a}\tilde{a}} + L_{\tilde{a}}^{\tilde{e}\tilde{c}\tilde{a}} \cdot i_{\tilde{a}}^{\tilde{e}\tilde{c}\tilde{a}} &= q_{i\tilde{a}\tilde{u}} \\ V_{\tilde{a}\tilde{a}} \cdot B_{\tilde{a}\tilde{a}} + L_{\tilde{a}}^{\tilde{e}\tilde{c}\tilde{a}} &= V_{i\tilde{a}\tilde{u}} \end{aligned} \right| \begin{aligned} i\tilde{d}\tilde{e} - q_{\tilde{a}\tilde{a}} \cdot B_{\tilde{a}\tilde{a}}^{max} &> q_{i\tilde{a}\tilde{u}} \end{aligned} \quad (10)$$

где $B_{\tilde{a}\tilde{a}}$ – расход доменного газа; $B_{i\tilde{a}}$ – расход природного газа; $q_{\tilde{a}\tilde{a}}$, $q_{n\tilde{a}}$ – теплота сгорания топливных составляющих доменного и природного газов соответственно; $L_{\tilde{a}}^{\tilde{e}\tilde{c}\tilde{a}}$ – расход избыточного воздуха; $i_{\tilde{a}}^{\tilde{e}\tilde{c}\tilde{a}}$ – энтальпия избыточного воздуха; $q_{общ}$ – теплота сгорания греющих газов, вводимых в рабочее пространство; $V_{\tilde{a}\tilde{a}}$, $V_{i\tilde{a}}$ – удельные объемы доменного и природного газов соответственно; $V_{i\tilde{a}\tilde{u}}$ – суммарный объемный расход греющих газов; $\hat{A}_{\tilde{a}\tilde{a}}^{max}$ – максимально возможный расход доменного газа.

Согласно системе уравнений (9) при недостатке теплоты, получаемой за счет сжигания низкокалорийного топлива, тепловую мощность форсируют путем замещения его эквивалентной по объему продуктов сгорания частью высококалорийного топлива $B_{n\tilde{a}}$. При избытке теплоты, согласно системе уравнений (10), тепловую мощность снижают за счет разбавления топлива $B_{\tilde{a}\tilde{a}}$ соответствующим расходом избыточного воздуха $L_{\tilde{a}}^{\tilde{e}\tilde{c}\tilde{a}}$, то есть воздухом свыше необходимого для горения. В этом случае отключают высококалорийное топливо, а часть низкокалорийного замещают эквивалентным по объему продуктов сгорания избыточным воздухом.

Объемный расход вводимых греющих газов $V_{\tilde{a}\tilde{a}i}$ следует поддерживать на протяжении всего цикла термообработки таким, чтобы в каждой проточной зоне обеспечивался изотермический поток. Для этого скорость газов ω_i в зоне с минимальным сечением $S_{i\ min}$ должна находиться в автомодельной области: $Re = \omega_i \cdot d_i / \nu > Re_{кр}$, где d_i – условный диаметр проходного канала i -ой зоны минимального сечения, ν – кинематическая вязкость. Температура вводимых газов в конце нагрева должна приближаться к конечной температуре изделий, для чего необходимо обеспечить управление температурой $t_{\tilde{a}\tilde{a}}$.

Для исключения газообмена – подсоса атмосферного воздуха или выбивания на протяжении всего цикла термообработки – на подду печи следует поддерживать небольшое положительное избыточное давление.

Выводы

1. В установившемся режиме равномерность температурного поля по объему рабочей камеры является признаком однородности нагрева всех изделий в садке; в динамике – только при одинаковых постоянных времени нагрева.

2. При управлении тепловой работой печей общее время нагрева садки следует

определять по изделию с максимальной постоянной времени нагрева, температуру печи следует ограничивать исходя из температуры изделия с минимальной постоянной времени нагрева. Для этого в каждом конкретном случае целесообразно определиться с инструментальным контролем или исходить из математического моделирования.

3. Температурный график нагрева должен содержать не менее двух ступеней независимо от термической массивности изделий. Нагрев термически тонких изделий на первой ступени температурного графика должен быть форсированным, время выдержки и охлаждения необходимо определять с учетом технологических рекомендаций в зависимости от вида термообработки.

4. Наиболее рациональной тепловой схемой отопления является отопление с постоянным объемным расходом продуктов сгорания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Губинский В. И.* Теория пламенных печей / В. И. Губинский, Лу Чжун-У. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.
2. *Ревун М. П.* Интенсификация работы нагревательных печей / М. П. Ревун, В. И. Гранковский, А. Н. Байбуз. – Киев: Техника, 1987. – 136 с.
3. *Ревун М. П.* Оптимизация низкотемпературного нагрева в пламенных нагревательных печах / М. П. Ревун, В. Ю. Зинченко, А. Н. Андриенко // Теория и практика металлургии. – 2005. – № 1-2. – С. 60-63.

Стаття надійшла до редакції 17.12.2009 р.
Рецензент, проф. М.П. Ревун