



# ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННО-ДЕТОНАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ НА ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СЛОЕВ СТАЛИ У8

Ю. С. БОРИСОВ, д-р техн. наук, О. В. КОЛИСНИЧЕНКО, инж. (Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины)

На основе решения нестационарного уравнения теплопроводности методом конечных разностей определены температурные поля поверхностных слоев в процессе плазменно-детонационной обработки (ПДО) изделий. На базе полученных расчетных зависимостей проведен анализ кинетики фазовых преобразований в структуре стали У8 при ПДО. Результаты расчетно-теоретического анализа сопоставлены с экспериментальными данными.

*Ключевые слова:* углеродистая сталь, плазменно-детонационная обработка, метод конечных разностей, нестационарное уравнение теплопроводности, температурные поля, высокоскоростной нагрев (охлаждение), структурно-фазовые превращения

В процессе воздействия высокоинтенсивными тепловыми потоками, создаваемыми плазменным генератором, лазером, электронным лучом, происходит нагрев поверхности с последующим охлаждением ее путем отвода тепла в материал и окружающую среду, в результате чего в приповерхностном слое происходят структурно-фазовые превращения. В условиях скоростного нагрева и охлаждения изменяется кинетика структурных превращений, что обуславливает сдвиг соответствующих критических точек фазовых превращений [1, 2]. При высокоскоростном нагреве подводимая тепловая энергия превосходит энергию, необходимую для перестройки кристаллической решетки  $\alpha \rightarrow \gamma$ , а сама перестройка идет с некоторой скоростью. Кроме того, гомогенизация аустенита и процесс рекристаллизации деформированных сплавов смещаются в область еще более высоких температур.

Для определения смещений температур фазовых превращений в сталях во время действия концентрированного источника энергии относительно критических точек на равновесной диаграмме железо-углерод важно знать температурное поле и изменение скорости нагрева (охлаждения) в зоне обработки. Математическому моделированию воздействия концентрированных тепловых потоков на материалы посвящено большое количество работ [3–5]. В них рассмотрены как аналитические методы, так и методы численного анализа теплового состояния материала. В ряде работ моделируется воздействие на поверхность не стационарным, а периодическим тепловым потоком.

Цель работы заключалась в численном расчете температурных полей, скоростей их изменения, а также анализе их влияния на кинетику фазовых превращений в модифицированных слоях при плазменно-детонационной обработке (ПДО) поверх-

ности изделий. Технология ПДО [6] позволяет получать импульсные потоки плазмы, под действием которых поверхность изделия испытывает циклическую термообработку. Температурный диапазон нагрева поверхности велик: 20...2000 °С и выше. Вследствие этого, кроме изменения теплофизических характеристик в зависимости от температуры обрабатываемого материала, необходимо учитывать и скрытую теплоту фазового перехода. Отличительной особенностью ПДО является то, что изделие может быть включено в разрядный контур. Исследование амплитудно-временных характеристик тока при ПДО показало, что плотность тока в обрабатываемой области выше  $10^8 \text{ А/м}^2$  [7]. Таким образом, нагрев поверхностного слоя материала в условиях ПДО происходит благодаря внешнему тепловому потоку, составляющими которого являются: энергия, приносимая электронами, ионами, нейтральными атомами, лучистая энергия, а также энергия в результате тепловыделения в процессе прохождения импульсного тока. Принимая во внимание широкий температурный диапазон нагрева поверхности, необходимо также учитывать изменения электрофизических свойств материала. Таким образом, для расчета динамики температурных полей при ПДО предпочтительнее использовать численное моделирование процесса. Для этого применяли метод конечных разностей. При решении задачи этим методом использовали полностью неявную схему.

В осесимметричном приближении рассмотрено нестационарное уравнение теплопроводности с переменными коэффициентами и наличием объемного тепловыделения:

$$C(T) \rho(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{j^2(t)}{\sigma(T)}, \quad (1)$$

$$0 \leq r \leq R, \quad 0 \leq z \leq H,$$

где  $C$ ,  $\lambda$ ,  $\sigma$ ,  $\rho$  — соответственно удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности, удельная электропроводность и плотность материала;  $j$  — плотность тока, определяемая экспериментально с использованием методики поясов Рогов-



ского [7];  $R, H$  — соответственно радиус и толщина образца.

Соотношение поверхностного и объемного источников тепла имеет вид [8]

$$\theta = \lambda T / (\chi j^2 \delta^2),$$

где  $\lambda = 20$  Вт/(м·К);  $T = 1000$  К — температура в слое;  $\chi = 2 \cdot 10^{-6}$  Ом·м — удельное электрическое сопротивление;  $j = 3 \cdot 10^8$  А/м<sup>2</sup>;  $\delta = 10^{-4}$  м — характерная глубина слоя.

Проведенная оценка показывает, что объемное тепловыделение составляет 10 % общего теплового вклада. При формулировке граничных условий для уравнения (1) приняли следующие допущения: изделие теплоизолировано; удельный тепловой поток в изделие имеет гауссово распределение  $q(r) = q_0 \exp[-(\xi r)^2]$  ( $q_0$  — максимальное значение удельного теплового потока,  $\xi$  — коэффициент, учитывающий изменение удельного теплового потока по радиусу); охлаждение поверхности осуществляется за счет теплоотвода вглубь металла, а также лучистого потока с поверхности изделия  $q_{\text{луч}} = \epsilon \sigma_{\text{СВ}} T^4$  ( $\epsilon$  — степень черноты поверхности,  $\sigma_{\text{СВ}}$  — постоянная Стефана — Больцмана)

$$z = 0, \quad 0 \leq r \leq R; \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial z} = -q(r) + q_{\text{луч}};$$

$$z = H, \quad 0 \leq r \leq R; \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial z} = 0;$$

$$r = 0, \quad 0 \leq z \leq H; \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0;$$

$$r = R, \quad 0 \leq z \leq H; \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial r} = 0;$$

$$t = 0, \quad T = 293 \text{ К.}$$

Для упрощения разностной схемы уравнение (1) преобразовано к квазилинейному виду путем замены

$$S(T) = \int_{273}^T \lambda(T) dT,$$

тогда уравнение (1) принимает вид

$$\frac{C(T)}{\lambda(T)} \rho \frac{\partial S(T)}{\partial t} = \frac{\partial^2 S(T)}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial S(T)}{\partial r} \right) + \frac{j(t)^2}{\sigma(T)}. \quad (2)$$

При импульсном плазменном воздействии в поверхностных слоях возникает большой градиент температур. Таким образом, нестационарное уравнение теплопроводности следует решать на неравномерной сетке, что несколько усложняет задачу. Для перехода к равномерной сетке было осуществлено преобразование координаты  $z$  [9]

$$z = H \frac{1 - e^{\eta \tilde{z}}}{1 - e^{\eta}}, \quad (3)$$

где  $\eta$  — коэффициент, учитывающий степень неравномерности сетки;  $\tilde{z} = \frac{\ln(1 - z(1 - e^{\eta})/H)}{\eta}$  — безразмерная координата на равномерной сетке.

Уравнение (2) на равномерной сетке с учетом преобразования (3) в новой системе координат имеет вид

$$\frac{C(T)}{\lambda(T)} \rho \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial^2 S}{\partial \tilde{z}^2} \frac{1}{\eta^2} \left( \frac{e^{\eta} - 1}{He^{\eta \tilde{z}}} \right)^2 - \frac{\partial S}{\partial \tilde{z}} \frac{1}{\eta} \left( \frac{e^{\eta} - 1}{He^{\eta \tilde{z}}} \right)^2 + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial S(T)}{\partial r} \right) + \frac{j(t)^2}{\sigma(T)}. \quad (4)$$

После приведения к безразмерному виду разностный аналог уравнения (4) решается с использованием схемы Писмена — Рэкфорда [9] методом одномерных прогонок по  $z$  и  $r$ .

Для обеспечения экономичности схемы и уменьшения шагов при остывании поверхности использовали неравномерную сетку по времени. Сетка сгущается во временном интервале существования больших градиентов температур и разрежается при малых градиентах. Шаг сетки определяется из выражения

$$\tau = \frac{\tau_1(1 - \omega^k)}{1 - \omega}, \quad k = 0, 1, \dots, l_c,$$

где  $l_c$  — количество шагов в расчетной сетке по времени при остывании;  $\omega$  — коэффициент геометрической прогрессии, описывающей неравномерность сетки по временной координате;  $\tau_1$  — первый шаг по времени при остывании.

Учет теплоты фазового перехода в расчетной модели проводили путем замены значений истинной теплоемкости  $\tilde{C}(T)$  на эффективную в интервале температур перехода из одного агрегатного состояния в другое [10].

Численный расчет изменения температурного поля поверхностных слоев образцов из стали марки У8 был проведен при следующих условиях ПДО: удельный тепловой поток в поверхность  $q_0 = 7,2 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>; длительность импульса  $\tau = 0,6$  мс; амплитуда тока  $I = 5,0 \cdot 10^3$  А; толщина образца  $H = 5,0 \cdot 10^{-3}$  м; радиус образца  $R = 5,0 \cdot 10^{-3}$  м; количество импульсов  $n = 6$ ; частота следования импульсов  $\nu = 3$  Гц.

При нагреве критическая точка  $A_c$  смещается в область высоких температур на величину  $\Delta T_k$  [1]:

$$\Delta T_k = \left( \frac{3k^2 x^2}{4D} \right)^{1/3} v_n^{1/3}, \quad (5)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии углерода в аустените;  $v_n$  — скорость нагрева в критическом интервале температур;  $k$  — параметр, определяемый из диаграммы Fe-Fe<sub>3</sub>C (для стали  $k = 110$ );  $x$  — структурный фактор (половина расстояния между соседними центрами кристаллизации аустенита).

На рис. 1 показано изменение температуры во времени в точках с координатой  $r = 0$  мм на различном расстоянии от поверхности  $z$ . Использование равновесной диаграммы железо-углерод для определения толщины модифицированного слоя дает завышенное значение — 60 мкм. Для определения толщины поверхностного слоя, испытавшего фазовые превращения в условиях ПДО, необходимо знать

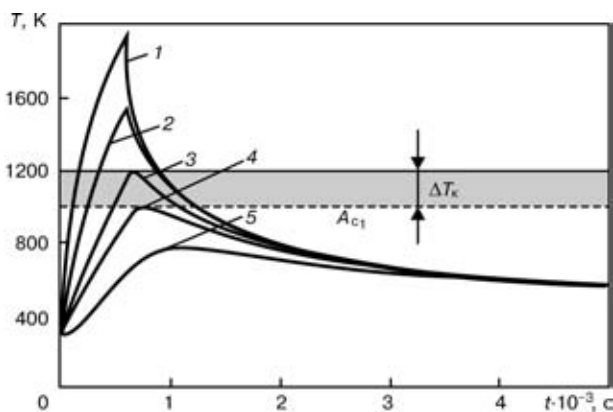


Рис. 1. Температурные кривые в точках с координатой  $r = 0$  мм на глубине: 1 –  $z = 0$ ; 2 – 20; 3 – 40; 4 – 60; 5 – 100 мкм скорость нагрева. На рис. 2 изображены расчетные кривые скорости нагрева на различной глубине. Видно, что при  $t = 6,0 \cdot 10^{-4}$  с на глубине  $z = 60$  мкм скорость нагрева  $v_n \approx 1 \cdot 10^6$  К/с, а на расстоянии от поверхности  $z \leq 40$  мкм  $v_n \approx 1,5 \cdot 10^6$  К/с. Для закаленной стали У8 структурный фактор  $x = 10^{-5}$  см, коэффициент диффузии углерода в аустените в рассматриваемых условиях  $D \approx (15 \dots 18) \cdot 10^{-8}$  см<sup>2</sup>/с [1]. Исходя из уравнения (5), критическая точка  $A_{c1}$  смещается в область высоких температур на  $\Delta T_k = 182 \dots 196$  °С, и, следовательно, неизотермическое аустенитное превращение заканчивается при температуре около 1200 К. Таким образом, при последующем охлаждении в поверхностном слое  $\approx 40$  мкм возможно мартенситное превращение (рис. 1, 3). Глубже будет располагаться структура, образующаяся при высокотемпературном скоростном отпуске. В зависимости от скорости охлаждения в модифицированном слое возможно получение перлита, сорбита, троостита, бейнита и мартенсита. Результаты, полученные при электротермической обработке материалов [2], показывают, что при скорости охлаждения 10000 К/с и выше удается полностью подавить высокотемпературный распад аустенита и

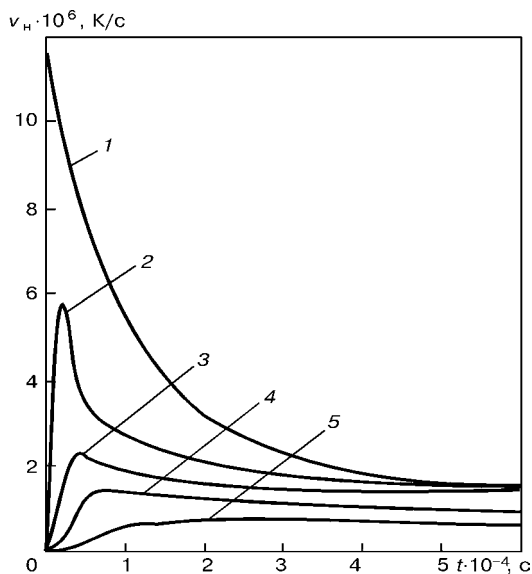


Рис. 2. Скорость нагрева на расстоянии от поверхности: 1 –  $z = 0$ ; 2 – 20; 3 – 40; 4 – 60; 5 – 100 мкм

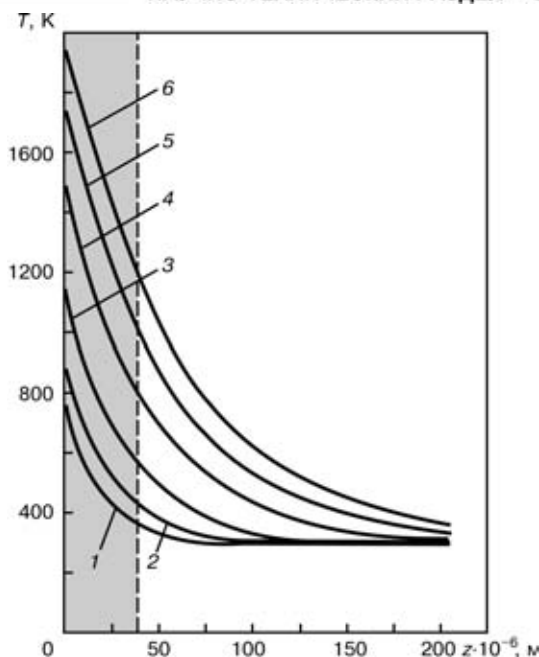


Рис. 3. Распределение температуры по толщине поверхностного слоя при  $r = 0$  мм на стадии нагрева: 1 –  $t = 4,5 \cdot 10^{-3}$ ; 2 –  $7,5 \cdot 10^{-3}$ ; 3 –  $1,5 \cdot 10^{-2}$ ; 4 –  $3,0 \cdot 10^{-2}$ ; 5 –  $4,5 \cdot 10^{-2}$ ; 6 –  $6,0 \cdot 10^{-2}$  с

зафиксировать только мартенситное превращение для любой стадии перлитно-аустенитного превращения. На рис. 4 представлено распределение температуры по толщине модифицированного слоя в различные моменты охлаждения. При  $t = 1,0 \cdot 10^{-2}$  с температура поверхностного слоя меньше температуры мартенситного превращения  $M_n = 518$  К для стали марки У8. В данный момент времени скорость охлаждения  $v_{охл} \approx 12000$  К/с (рис. 5). Таким образом, в рассматриваемых условиях ПДО данной стали (согласно результатам расчетно-теоретического анализа) модифицированный слой будет состоять из фаз мартенсита и остаточного

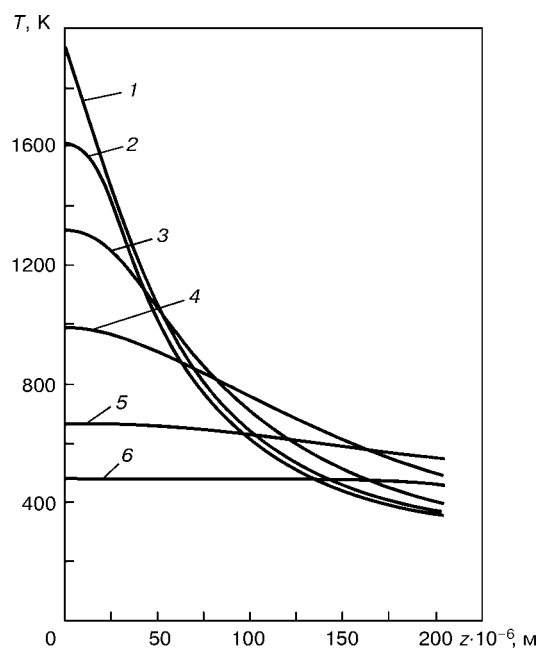


Рис. 4. Распределение температуры по толщине поверхностного слоя при  $r = 0$  мм на стадии охлаждения: 1 –  $t = 6,0 \cdot 10^{-4}$ ; 2 –  $6,4 \cdot 10^{-4}$ ; 3 –  $7,8 \cdot 10^{-4}$ ; 4 –  $1,3 \cdot 10^{-3}$ ; 5 –  $3,2 \cdot 10^{-3}$ ; 6 –  $1,0 \cdot 10^{-2}$  с

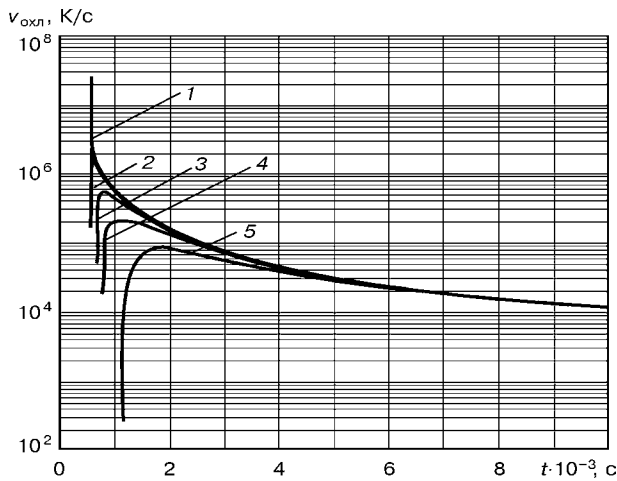


Рис. 5. Скорость охлаждения на глубине: 1 —  $z = 0$ ; 2 — 20; 3 — 40; 4 — 60; 5 — 100 мкм

аустенита. Это также подтверждают металлографические исследования модифицированных слоев образцов, прошедших ПДО. На рис. 6 приведена микроструктура поверхностного слоя образца из рассматриваемой стали после ПДО. Рентгенофазовый анализ показал, что слаботравящийся белый слой толщиной примерно 40 мкм представляет собой мелкокристаллический мартенсит и остаточный аустенит [11]. Высокая скорость охлаждения приводит к тому, что после охлаждения наблюдается большая неоднородность структуры, что связано с неомогенностью образовавшегося в процессе нагрева аустенита. Кроме того, это приводит к повышенной дефектности структуры, так как усиливается фазовый наклеп, замедляются процессы отдыха и рекристаллизации и более полно наследуются дефекты  $\gamma$ -фазы. При этом происходит измельчение блоков, увеличение плотности дислокаций и рост напряжений в кристаллической решетке [12]. Образующийся при этом мартенсит более дисперсный, чем при обычной закалке. В стали У8 после обычной закалки длина игл мартенсита составляет 7...10, а после закалки концентрированными источниками нагрева — всего 2...3 мкм [12].

Исходя из расчетных кривых (см. рис. 3), проплавление слоя составляет 5,5 мкм. Из рис. 5 также видно, что скорость охлаждения в момент кристаллизации расплава на поверхности выше  $10^6$  К/с. В этом случае дендритный рост зерна вырождается и формируется плоский фронт зерна [12]. Измельчение зерен благоприятно сказывается на свойствах сплава и прежде всего возможно достижение наиболее оптимального сочетания прочности и пластичности. Особенно сильное влияние измельчение зерен оказывает на повышение сопротивлению ползучести, поскольку границы зерен эффективно препятствуют пластическому течению металла при повышенных температурах.

Рассмотренные выше расчетные кривые относятся к воздействию одним импульсом. При рассмотрении второго и последующих импульсов характер распределения температурных полей существенно не отличается. Между импульсами происходит интенсивный отвод тепла в металл.

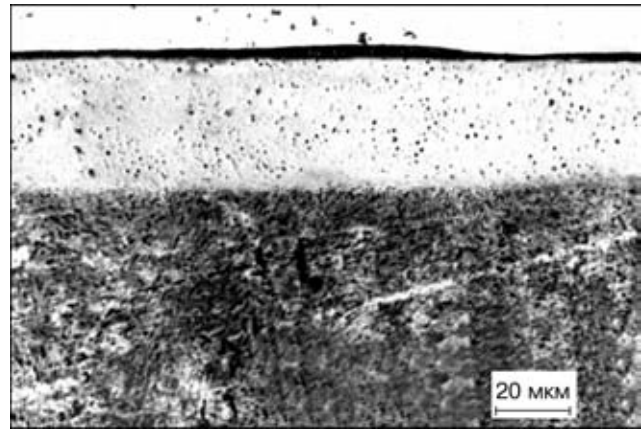


Рис. 6. Микроструктура образца из стали У8 после ПДО

Поверхностный слой успевает остыть до температуры, незначительно превышающей первоначальную. Разница температур не превышает  $10^\circ\text{C}$ . Таким образом, в результате ПДО осуществляется процесс термоциклической обработки поверхности, приводящей к усилению фазового наклепа в результате обратимых  $\alpha \leftrightarrow \gamma$ -превращений, увеличению плотности дислокаций, уменьшению размера зерна, что должно способствовать улучшению служебных характеристик изделий. Расширение линий на рентгенограммах образцов, прошедших ПДО, также подтверждает наличие значительного фазового наклепа в результате обратимых  $\alpha \leftrightarrow \gamma$ -превращений при термоциклировании. С учетом сдвига критических точек упрочнению в результате термоциклической обработки при рассматриваемых начальных условиях подвержен слой глубиной около 40 мкм.

## Выводы

1. При нагреве поверхности в условиях ПДО стали марки У8 происходит сдвиг критических точек  $A_{c1}$  в область высоких температур на  $\Delta T_k = 182...196^\circ\text{C}$ . При последующем высокоскоростном охлаждении полностью подавляется высокотемпературный распад аустенита и происходит только мартенситное превращение. В таких условиях модифицированный слой состоит из фаз мартенсита и остаточного аустенита.

2. Многократное тепловое воздействие при ПДО позволяет осуществлять процесс термоциклической обработки поверхности, способствующий усилению фазового наклепа в результате обратимых  $\alpha \leftrightarrow \gamma$ -превращений, увеличению плотности дислокаций, дроблению структуры.

3. Расчетная оценка толщины и фазового состава модифицированных слоев сопоставима с данными экспериментальных исследований образцов из стали марки У8, прошедших ПДО. Это дает возможность использовать описанную расчетную модель для прогнозирования кинетики фазовых превращений и толщины модифицированных слоев в условиях ПДО изделий из различного вида сталей.

1. Физические основы электротермического упрочнения стали / В. Н. Гриднев, Ю. Я. Мешков, С. П. Ошкадеров, В. И. Трефилов. — Киев: Наук. думка, 1973. — 335 с.



2. Кидин И. Н. Физические основы электротермической обработки металлов и сплавов. — М.: Металлургия, 1969. — 296 с.
3. Перелома В. А., Тарасевич Н. И., Ликер Р. А. Исследование тепловых процессов при лазерной обработке железоуглеродистых сплавов // Процессы литья. — 1995. — № 2. — С. 38–48.
4. Углов А. А., Волков Л. А., Сагдединов О. Г. К построению аналитического решения одномерной задачи плавления металлов концентрированным потоком энергии // Инж.-физ. журн. — 1992. — № 1. — С. 31–34.
5. Лыков А. М., Науменко Н. Н. Плавление материалов периодическим тепловым потоком // Физика и химия обраб. материалов. — 1995. — № 2. — С. 107–115.
6. Тюрин Ю. Н., Колисниченко О. В., Цыганков Н. Г. Импульсно-плазменное упрочнение инструмента // Автомат. сварка. — 2001. — № 1. — С. 38–44.
7. Борисов Ю. С., Колисниченко О. В. Исследование амплитудно-временных характеристик импульса тока при плазменно-детонационной обработке изделий // Там же. — 2000. — № 12. — С. 56–60.
8. Гордеев В. Ф., Пустогаров А. В. Термоэмиссионные дуговые катоды. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 192 с.
9. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: В 2 т.: Пер. с англ. — М.: Мир, 1990. — Т. 1. — 384 с.
10. Григорьянц А. Г. Основы лазерной обработки материалов. — М.: Машиностроение, 1989. — 304 с.
11. Борисов Ю. С., Колисниченко О. В. Влияние условий нагрева поверхности изделия на структуру упрочненных слоев стали У8 при плазменно-детонационной обработке // Автомат. сварка. — 2002. — № 12. — С. 31–35.
12. Григорьянц А. Г., Сафонов А. Н. Лазерная техника и технология. — Кн. 3: Методы поверхностной лазерной обработки. — М.: Мир, 1987. — 191 с.

Temperature fields in surface layers during plasma-detonation treatment (PDT) of parts were determined through solving a non-stationary equation of thermal conductivity by the finite difference method. Analysis of kinetics of phase transformations in structure of steel U8 during PDT was conducted on the basis of the derived calculation dependencies. Results of the calculation-theoretical analysis were compared with the experimental data.

Поступила в редакцию 24.07.2002

## КОРОТКО О ВАЖНОМ

### МАЛ ЗОЛОТНИК ДА ДОРОГ

*Превращать отходы в доходы, экономить земельные богатства, уменьшить загрязнение окружающей среды позволит центральным углеобогатительным фабрикам (ЦОФ) новое оборудование, к проектированию и выпуску которого приступил Новокраматорский машиностроительный завод (г. Краматорск, Донецкой обл.).*

*Уже до конца лета нынешнего года в соответствии со сроками контракта, заключенного между НКМЗ и ООО «Полюс К<sup>0</sup>» (г. Курахово, Украина), машиностроители изготовят и поставят Кураховской ЦОФ первую современную отечественную установку для сушки энергетического шлама.*

*По словам ведущего специалиста производства горнорудного и кузнечно-прессового оборудования НКМЗ Александра Токарева, ныне более половины углеобогатительных фабрик Украины в силу недостаточной технической оснащенности пока не в состоянии рационально распорядиться шламом, остающимся после первого углеобогащения, но еще пригодным в производстве. Как правило, этот шлам сваливается в специальные шламохранилища, занимающие большие земельные угодья.*

*Сушильная машина с маркой НКМЗ позволит обогатительным фабрикам сразу же после первой переработки стандартной угольной массы проводить повторное обогащение шлама, доводить его до требуемых норм и отправлять потребителю для повторного применения.*

*Одна сушилка способна обогащать в год до 40 тыс. т шлама. Масса ее сравнительно невелика — чуть более 20 т, но польза очевидна.*

Пресс-служба НКМЗ