

Министерство образования и науки Украины  
Одесский национальный политехнический университет

*Труды*  
*ОДЕССКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА*

Научный и производственно-практический  
сборник

Вып. 2(22). 2004

Одесса

Труды Одесского политехнического университета: Научный и производственно-практический сборник по техническим и естественным наукам. — Одесса, 2004. — Вып. 2(22). — 360 с. — Яз. рус., укр.

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

*Малахов В.П.* — гл. редактор, *Кострова Г.В.* — зам. гл. редактора, *Плескач Л.О.* — отв. секретарь, *Баранов П.Е.*, *Дащенко А.Ф.*, *Дубковский В.А.*, *Куценко А.Н.*, *Пуйло Г.В.*, *Алексеева Л.А.*, *Ефрюшина Н.П.*, *Кожухарь В.Я.*, *Кругляк Ю.А.*, *Куншенко Б.В.*, *Новохатский И.А.*, *Бельтюков Е.А.*, *Немченко В.В.*, *Продиус И.П.*, *Соколенко В.Н.*, *Харичков С.К.*, *Гончарук Г.И.*

Сборник основан в 1996 году, зарегистрирован в Министерстве Украины по делам печати и информации 5 декабря 1996 года, свидетельство серии КВ № 2380

Печатается по решению Ученого совета Одесского национального политехнического университета, протокол № 9 от 22.06.2004 г.

Компьютерную версию опубликованных материалов можно получить по адресу:  
<http://www.ospu.odessa.ua>

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Е.Г. Афтандиянц, В.В. Афтандиянц, Д. М. Колотило.</i> Закономерности влияния модифицирования и микролегирования на фазовые превращения аустенитных нержавеющей сталей .....	8
<i>О.И. Прокопович, Ю.А. Морозов, И.В. Прокопович.</i> Моделирование процессов кристаллизации при непрерывном литье меди .....	12
<i>В.Ф. Оробей, Н.Г. Сурьянинов, Д.В. Лазарева.</i> Статический расчет неразрезной балки методами конечных и граничных элементов.....	16
<i>В.Д. Иоргачев.</i> Адгезионная прочность пластически деформированного поверхностного слоя .....	19
<i>Д.Л. Семенов.</i> Расчетные модели для оценки жесткости и прочности конических тел при их сжатии.....	23
<i>О.С. Савельева, Ю.М. Хомяк.</i> Влияние поперечной деформации на напряженное состояние элементов кожухотрубного теплообменного аппарата .....	28
<i>В.В. Иванов.</i> Исследование тепловых процессов в зубчатых передачах .....	31
<i>Т.Г. Джугурян, В.М. Тонконогий, Л.М. Перпери.</i> Прецизионная обработка ступенчатых отверстий комбинированным инструментом одностороннего резания .....	35
<i>Н.Н. Арцыбашева, Д.С. Дерешов, Н.М. Панкратов.</i> Изменение напряжений в раме прицепа при развитии повреждений.....	40

### ЭНЕРГЕТИКА. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<i>О.В. Неделин, О.В. Маслов.</i> Теплотехническая надежность активной зоны ВВЭР-1000 при маневре мощностью .....	44
<i>В.А. Кишневский, Д.Б. Корсун.</i> Исследование процессов седиментации и уплотнения шламов радиоактивных вод атомных электростанций.....	48
<i>В.А. Герлига, Н.А. Фридман, А.Н. Рыбчук.</i> Математическая модель динамических режимов работы закрытых систем циркуляционного водоснабжения блоков АЭС.....	52
<i>Э.С. Греков, В.А. Герлига, В.С. Киров.</i> Влияние работы системы циркуляционного водоснабжения 4-го блока Ровенской АЭС на работу блока при стационарных режимах.....	59
<i>С.И. Барсуков, Л.В. Кнауб.</i> Газодинамическое сепарирование полидисперсных гетерогенных смесей .....	63
<i>А.П. Боровский, Б.Н. Шукайло, О.А. Дорож.</i> Декарбонизация конденсата в отопительных котельных.....	70
<i>В.А. Кишневский, О.А. Дорож, Е.В. Кишневский.</i> Анализ факторов, влияющих на выбор схемы обработки воды при проектировании водоподготовительных установок .....	76
<i>А.С. Мазуренко, В.А. Арсирий, Е.А. Арсирий.</i> Повышение эффективности газотурбинных установок за счет совершенствования аэродинамики проточных частей.....	79
<i>С.С. Титарь, А.А. Климчук, В.С. Ступак.</i> Сравнительный анализ централизованного и местного теплоснабжения .....	84

уменьшается, достигая минимума при максимальном исследованном содержании  $Se=0,07\%$ ;  $V=0,007\%$ ;  $Cu=0,5\%$ ;  $V=0,7\%$ .

В заключение следует отметить, что влияние модифицирования и микролегирования  $Se$ ,  $V$ ,  $Cu$ ,  $V$  на фазовые превращения аустенитных нержавеющей сталей столь сложно и неоднозначно, что может быть оптимизировано только с применением компьютерного анализа установленных количественных закономерностей.

### Литература

1. Химушин Ф.Ф. Нержавеющие стали. — М.: Металлургия, 1967. — 798 с.
2. Гудремон Э. Специальные стали. — М.: Металлургия, 1966. — Т. 1 — 736 с., Т. 2 — 741 с. — 1974.
3. Бабаскин Ю.З. Структура и свойства литой стали. — К.: Наук. думка, 1980. — 240 с.
4. Колотило Д.М. Электронная локализация и формирование свойств сплавов  $d$ -металлов / Колотило Д.М., Глушенко В.Г., Яковлев В.Т. — К.: Ин-т проблем литья АН Украины, 1985. — 55 с.
5. Балковой О.В. Параметры взаимодействия первого порядка в расплавах на основе железа / Балковой О.В., Алеев Р.А., Баканов В.К. — М.: Черметинформация, 1987. — 42 с.
6. Могутнов Б.М. Термодинамика сплавов железа / Могутнов Б.М., Томилин И.А., Шварцман Л.А. — М.: Металлургия, 1984. — 208 с.
7. Францевич И.П. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов: Справ. / Францевич И.Н., Воронов Ф.Ф., Банута С.С.; под ред. И.Н. Францевича. — К.: Наук. думка, 1982. — 286 с.
8. Томашов Н.Д. Теория коррозии и коррозионностойкие конструкционные сплавы / Томашов Н.Д., Чернова Г.П. — М.: Металлургия, 1986. — 360 с.
9. Ларина О.Д. Количественный анализ оксидных и нитридных включений в сталях и сплавах / Ларина О.Д., Тимошенко Н.Н. — М.: Металлургия, 1978. — 253 с.
10. Кайбышев О.А. Границы зерен и свойства металлов / Кайбышев О.А., Валиев Р.З. — М.: Металлургия, 1987. — 214 с.

Поступила в редакцию 31 марта 2004 г.

УДК 669.3:621.74.047

О.И. Прокопович, магистр,  
Ю.А. Морозов, канд. физ.-мат. наук,  
И.В. Прокопович, канд. техн. наук, доц.,  
Одес. нац. политехн. ун-т

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ МЕДИ

*О.И. Прокопович, Ю.А. Морозов, И.В. Прокопович.* Моделивання процесів кристалізації при безперервному литті міді. Запропоновано математичну модель кристалізації при безперервному литті міді, що зв'язує температуру поверхні злитка з основними технологічними параметрами процесу.

*O.I. Prokopovich, Yu.A. Morozov, I.V. Prokopovich.* Modelling of solidification processes in copper continuous casting. The mathematical model of solidification processes in copper continuous casting which connecting cast product surface temperature with main technological process parameters is offered.

При непрерывном литье процесс затвердевания расплава происходит при отводе теплоты перегрева в узле кристаллизатора. Скорость кристаллизации слитка зависит от интенсивности теплообмена, т.е. скорость литья напрямую связана с температурой и расходом охлаждающей воды в охладителях и температурой расплава. На практике скорость литья часто изменяется оператором

линии из-за тепловых потерь при переливах очередных порций расплава, его количества и химического состава (для сплавов), перераспределения тепловой нагрузки в литейной машине (особенно при многоручьевой схеме процесса), изменений производственной программы и т.д. [1].

При многоручьевом производстве меди локальные изменения теплового режима отдельных стренг (изменение скорости, остановка/запуск стренги) сказываются на теплопередаче в соседних ручьях и перераспределяют тепловую нагрузку во всей литейной машине, что приводит к дисбалансу тепловых параметров и отрицательно сказывается на качестве получаемых заготовок [2]. Таким образом, оптимальное управление процессом непрерывного литья требует регулирования ключевых технологических параметров — общей тепловой нагрузки в литейной машине и индивидуального регулирования процессов теплообмена по стренгам, который зависит от установленного режима работы, химического состава металла, параметров охлаждающей воды и скорости литья.

При непрерывном литье меди конечный продукт получается при прохождении расплава через узел кристаллизатора, затвердевания в виде бесконечного слитка постоянного сечения и последующем охлаждении в нескольких зонах. В процессе прохождения через зоны охлаждения слиток движется с постоянной скоростью при постоянстве расхода охлаждающей воды. Качество получаемого слитка, определяемое кристаллической структурой, зависит от тепловых воздействий, которые он претерпел в зонах охлаждения. Таких зон в современных машинах вертикального непрерывного литья обычно две: в первичном охладителе происходит снятие теплоты перегрева, кристаллизация расплава по всему сечению и начальное охлаждение слитка до температур 400...500 °С; во вторичном охладителе слиток претерпевает рекристаллизацию и охлаждается до температур ниже 100 °С во избежание окисления поверхности, затрудняющей его дальнейшую обработку.

При охлаждении стренг в обоих охладителях отвод тепла происходит:

- через воздушный зазор непостоянного сечения вследствие шероховатости внутренней поверхности охладителей, изменений их геометрии по причине термических напряжений и др.;
- через стенку охладителя с перепадами толщины и неравномерными отложениями солей и оксидов;
- на внешней поверхности, контактирующей с охлаждающей водой.

Таким образом, интенсивность теплообмена непостоянна и влечет нестабильность температуры стренг. Колебания температуры в зонах охлаждения приводят к образованию поверхностных дефектов типа трещин и внутренних дефектов сплошности из-за усадочных пор или зональной ликвации, что отрицательно сказывается на качестве заготовки. Следовательно, управление температурой в охладителях литейной машины и стабилизация теплового режима являются актуальной производственной задачей.

Схема контроля и управления процессом кристаллизации при непрерывном литье меди на одной стренге представлена на рисунке. Каждая зона охлаждения характеризуется температурой  $u_i(t)$  и протяженностью  $(l_i)$ ,  $q_i(t)$  — расход охлаждающей воды.

Медь поступает в кристаллизатор с температурой  $u_{нач}$ , называемой температурой литья, со скоростью равной скорости литья  $v(t)$ . Скристаллизовавшаяся стренга характеризуется плотностью  $\rho$ , удельной теплоемкостью  $c$  и поперечным сечением  $S$ .

В качестве математической модели выбрана Стефановская модель затвердевая при постоянной температуре кристаллизации. Данная модель включает в себя три условия:

1. Гиперболическое нелинейное уравнение теплопроводности в жидкой ( $i=1$ ) и твердой ( $i=2, 3$ ) фазах [3]

$$\rho_i(u)c_i(u)\tau \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} + \rho_i(u)c_i(u) \frac{\partial u_i}{\partial t} - \lambda_i(u)\Delta u_i = 0, \quad i = \overline{1,3}, \quad u \equiv u(x, t), \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность;

$c$  — удельная теплоемкость;

$\lambda$  — теплопроводность;

$\Delta$  — оператор Лапласа;  
 $\tau_r$  — время релаксации теплового потока, связанное со скоростью распространения тепла соотношением  $\vartheta_r = \sqrt{\lambda/\rho c}$ ;  
 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)$  — вектор координат.

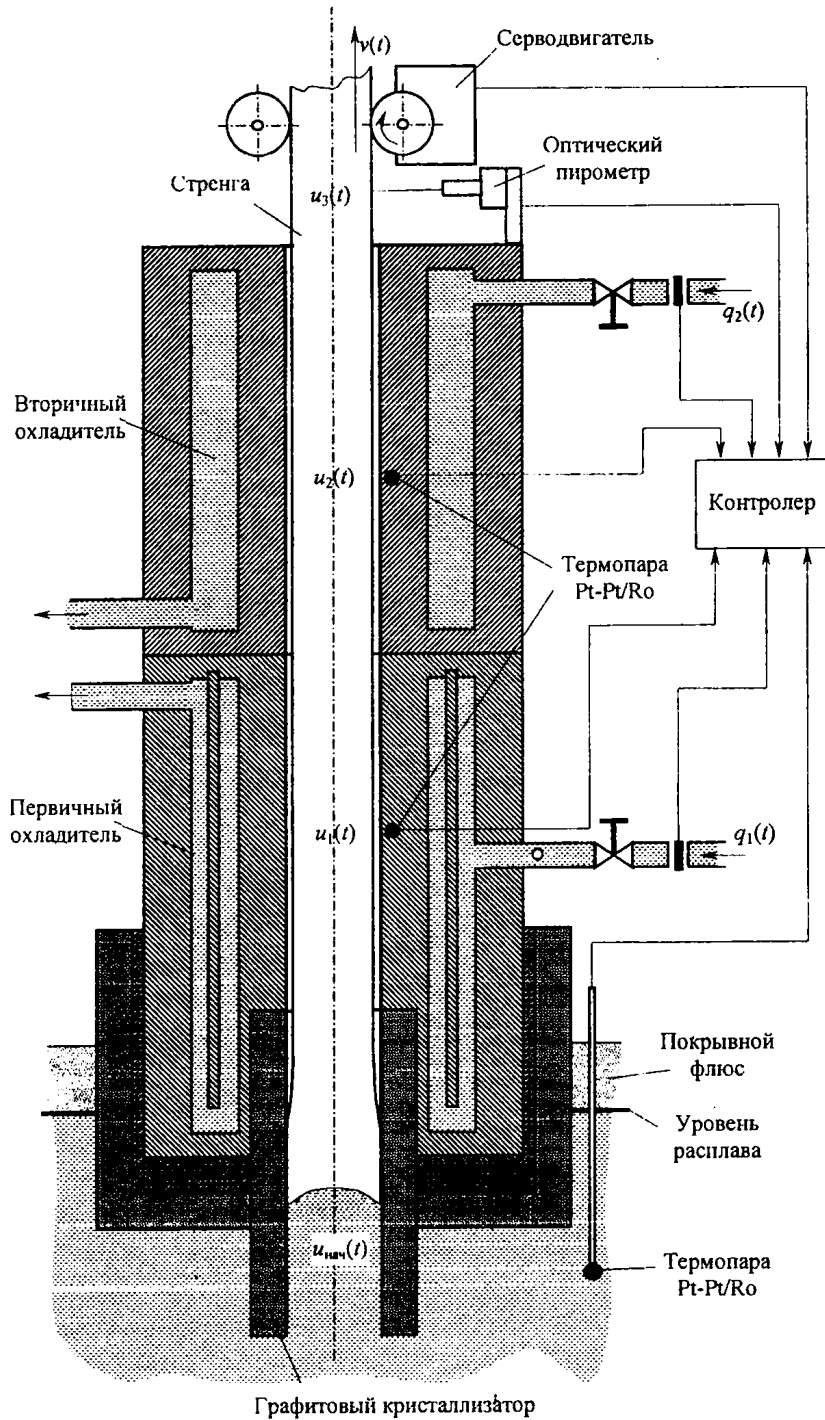


Схема контроля температур, скорости литья и расходов охлаждающей воды при непрерывном литье меди на одной стрэнге

## 2. Уравнение теплового баланса на границе раздела фаз $S$ (условие Стефана) [4]

$$L\rho \frac{\partial S}{\partial t} + (\lambda_1 \text{grad} u_1 - \lambda_2 \text{grad} u_2; \text{grad} S) = 0, \quad (2)$$

где  $L$  — скрытая теплота кристаллизации при затвердевании;

$S \equiv S(\mathbf{x}, t) = 0$  — уравнение поверхности раздела фаз.

Выражение в скобках — скалярное произведение векторов.

3. Условие постоянства температуры на поверхности фронта затвердевания

$$u(t, y(t)) = t_{кр}, \quad 0 < t < T. \quad (3)$$

Кроме перечисленных условий необходимо добавить процесс теплообмена в контурах первичного и вторичного охлаждения, который подчиняется граничному условию III-го рода и задает интенсивность теплоотдачи на поверхности слитка  $\Omega$ . В обобщённой интегральной форме это представляется как [5]

$$\frac{1}{\tau_r} \int_0^t \frac{\partial u}{\partial n} \Big|_{\Omega} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\tau_r}\right) = \alpha(\mathbf{x}, t) \Big|_{\mathbf{x} \in \Omega} [u(\mathbf{x}, t) \Big|_{\mathbf{x} \in \Omega} - u_c(t)] \quad (4)$$

или в дифференциальной форме

$$\frac{\partial u}{\partial n} \Big|_{\Omega} = \alpha(\mathbf{x}, t) \Big|_{\mathbf{x} \in \Omega} \left(1 + \tau_r \frac{d}{dt}\right) [u(\mathbf{x}, t) \Big|_{\mathbf{x} \in \Omega} - u_c(t)], \quad (5)$$

в случае, если  $u_c(t)$  — переменная величина, и

$$\frac{\partial u}{\partial n} \Big|_{\Omega} - \alpha(\mathbf{x}, t) \Big|_{\mathbf{x} \in \Omega} \left(1 + \tau_r \frac{d}{dt}\right) u(\mathbf{x}, t) \Big|_{\mathbf{x} \in \Omega} = -\alpha(\mathbf{x}, t) \Big|_{\mathbf{x} \in \Omega} [1 + \tau_r \delta(t)] u_c, \quad (6)$$

если  $u_c(t) = u_c = \text{const}$ ,

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи;

$u_c(t)$  — температура окружающей среды (температура кристаллизатора и охладителя, зависящая от расхода и температуры охлаждающей жидкости).

Решение сформулированной задачи с краевыми условиями позволяет определять температурное поле слитка в обеих фазах в любой момент времени.

Уравнение (1) совместно с условиями (2), (4) и начальным условием, задающим распределение температуры в жидкой фазе  $u_{нач}(\mathbf{x}) = u(\mathbf{x}, t) \Big|_{t=0}$ , описывают изменения температуры в  $i$ -зонах с учетом скорости литья и расходом охлаждающей воды в этих зонах. Также учитывается суммарный эффект взаимодействия зон.

В производственных условиях для контроля температуры поверхности катанки на выходе стренг из вторичных охладителей 16-ручьевого машины непрерывного литья установлены бесконтактные инфракрасные пирометры. Температуру поверхности катанки, находящейся в охладителях снимают при помощи платина-платинородиевых (Pt-Pt/Ro) термопар, которые зачеканены в стенки охладителей. Температуру расплава постоянно измеряют такой же термопарой. Температуру охлаждающей жидкости на входе измеряют при помощи биметаллических термометров, расход воды контролируют при помощи поплавковых расходомеров, изменяя электромагнитными задвижками. Скорость литья по технологическим осям изменяется в зависимости от параметров процесса путем регулировки вращения серводвигателей.

Результаты моделирования соотносятся с экспериментальными данными, полученными при замерах температуры поверхности стренг опытной установки в условиях цеха непрерывного литья ОАО "Одескабель".

## Литература

1. Прокопович О.И. Автоматизация производства высококачественной катанки для изготовления проводов сверхтонких сечений / Прокопович О.И., Прокопович И.В., Гогунский В.Д. // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2002. Спецвыпуск. — С. 68 — 71.
2. Прокопович О.И. Температура поверхности катанки как косвенный параметр качества / Прокопович О.И., Прокопович И.В., Гогунский В.Д. // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2003. — Вып. 2(20). — С. 128 — 130.

3. Кац А.М. Теплофизические основы непрерывного литья слитков цветных металлов и сплавов / Кац А.М., Шадек Е.Г. — М.: Metallurgy, 1983. — 208 с.
4. Мучник Г.Ф. Методы теории теплообмена. Ч. 1. Теплопроводность / Мучник Г.Ф., Рубашов И.Б. — М.: Высш. школа, 1970. — 288 с.
5. Lalli B. Finite difference heat transfer modelling for continuous casting / Lalli B., Biegler L., Henein H. // Metallurgical Transactions. — 1990. — В 21(4). — P. 761 — 770.

Поступила в редакцию 23 апреля 2004 г.

УДК 539.3:004.02

**В.Ф. Оробей**, д-р техн. наук, проф.,  
**Н.Г. Сурьянинов**, канд. техн. наук, доц.,  
**Д.В. Лазарева**, бакалавр,  
 Одес. нац. политехн. ун-т

## СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НЕРАЗРЕЗНОЙ БАЛКИ МЕТОДАМИ КОНЕЧНЫХ И ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*В.Ф. Оробей, Н.Г. Сурьянинов, Д.В. Лазарева.*

Статичний розрахунок нерозрізної балки методами кінцевих і граничних елементів. Здійснено порівняння перерізуючих сил, згинальних моментів, прогинів та кутів поворотів, що знайдені чисельно-аналітичним варіантом метода граничних елементів і методом кінцевих елементів у програмі ANSYS.

*V.F. Orobey, N.G. Surianinov, D.V. Lazareva.*

Static calculation of a continuous beam by methods of final and boundary elements. Comparison of the cross-section forces, the bending moments, deflections and turning angles calculated by a numerical-analytical variant of a method of boundary elements and a method of final elements in the program ANSYS is executed.

В последние годы получили существенное развитие различные варианты метода граничных элементов (МГЭ), несмотря на высокий технологический уровень компьютерных пакетов методов конечных элементов (МКЭ) и конечных разностей (МКР). Связано это с недостатками существующих численных методов, где необходимо:

- дискретизировать или покрывать сеткой всю область, занимаемую объектом;
- заменять систему с бесконечным числом степеней свободы системой с конечным числом степеней свободы, т.е. исследовать приближенный объект;
- доказывать достоверность полученных результатов.

Эти и другие недостатки способствовали появлению и развитию МГЭ. Существуют численные и численно-аналитические варианты МГЭ, разработанные для одномерных и многомерных объектов. В частности, большой интерес вызывает численно-аналитический вариант МГЭ, предложенный для одномерных расчетных схем, к которым приводятся стержни, пластины и оболочки [1]. Данный вариант МГЭ достаточно апробирован, и доказано, что в задачах статики он относится к точным методам в рамках принятых гипотез и допущений.

Например, разрешающее уравнение статического изгиба МГЭ для прямолинейного стержня принимает вид

$$\begin{vmatrix} EIV(x) \\ EI\varphi(x) \\ M(x) \\ Q(x) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & x & -x^2/2 & -x^3/6 \\ 0 & 1 & -x & -x^2/2 \\ 0 & 0 & 1 & x \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} EIV(0) \\ EI\varphi(0) \\ M(0) \\ Q(0) \end{vmatrix} + \int_0^x \begin{vmatrix} (x-\xi)^3/6 \\ (x-\xi)^2/2 \\ -(x-\xi) \\ -H(x-\xi) \end{vmatrix} q(\xi) \quad (1)$$

или компактно —