

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОГНЕУПОРНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ УСТРОЙСТВА ДЛЯ БЫСТРОЙ ЗАМЕНЫ СТАКАНОВ-ДОЗАТОРОВ ПРОМКОВШЕЙ МНЛЗ

С.П. Еронько, Е.В. Ошовская, Д.А. Яковлев (ДонНТУ, Донецк)

*Приведены данные математического моделирования напряжений в деталях устройства, обеспечивающего поддержание стабильных скоростных режимов истечения жидкой стали на участке промежуточный ковш-кристаллизатор в условиях непрерывной разливки длинными сериями.*

Повышение серийности непрерывной разливки стали сопряжено с известными трудностями, обусловленными необходимостью поддержания стабильности скоростных режимов истечения жидкого металла из промежуточного ковша в кристаллизаторы МНЛЗ. При этом расчетный расход стали, разливаемой открытой струей, обеспечивают за счет постоянства диаметра выпускного канала промежуточного ковша. Однако, по ряду причин, форма и размеры этого канала могут существенно изменяться, что отрицательно сказывается на условиях формирования струи и вызывает дестабилизацию скоростного режима непрерывной разливки стали на сортовую заготовку [1].

В качестве действенной меры, позволяющей устранить негативные последствия затягивания или размывания канала промежуточного ковша в условиях разливки длинными сериями, зарубежными фирмами предложено использовать специальные устройства, которые обеспечивают быструю замену пришедшего в негодность стакана-дозатора новым изделием без прерывания струи [2].

На кафедре механического оборудования заводов черной металлургии Донецкого национального технического университета разработана и запатентована конструкция такого устройства, в которой заложены технические решения, позволившие устранить известные недостатки, присущие зарубежным аналогам [3, 4]. Общий вид предложенной системы показан на рис.1.

Следует отметить, что практическое применение отечественной разработки на существующих и вновь строящихся сортовых МНЛЗ сдерживается, в первую очередь, отсутствием в технической литературе информации, необходимой для выполнения расчетов и проектирования подобных

сталеразливочных устройств. Для скорейшей ликвидации отставания в данном вопросе украинских производителей металлургического оборудования необходимо проведение комплексных исследований, направленных на разработку методов расчета конструктивных параметров новых высокоэффективных систем, обеспечивающих дозированный перелив стали из промежуточных ковшей в кристаллизаторы МНЛЗ.

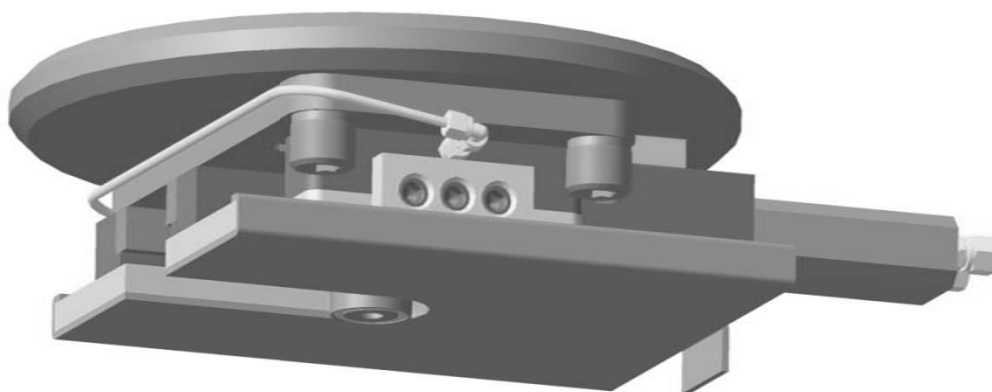


Рисунок 1 – Устройство для быстрой замены стаканов-дозаторов промежуточного ковша сортовой МНЛЗ

Базой для выполнения прочностных расчетов конструктивных элементов разливочного устройства и энергосиловых параметров его гидравлического привода являются достоверные данные о нагруженном состоянии металлических и огнеупорных частей системы быстрой смены стакана-дозатора. Причем требуемая для инженерных расчетов точность может быть обеспечена при наличии четких сведений о реальной картине распределения напряжений в стакане-дозаторе и контактирующих с ним металлических деталях. Поэтому изучение напряженно-деформированного состояния разрабатываемых устройств для разлива стали представляет важную научно-практическую задачу.

Учитывая трудности, связанные с проведением натурных исследований в условиях промышленного применения систем быстрой смены стаканов-дозаторов, наиболее приемлемыми методами решения поставленной задачи следует считать физико-математическое моделирование, позволяющее с минимальными материальными и временными затратами получить необходимую информацию и найти оптимальное конструктивное исполнение проектируемого механизма.

Наиболее термически нагруженным элементом конструкции является стакан-дозатор, поэтому на первом этапе исследований было принято решение рассмотреть распределение температур в нем. Стакан-дозатор

представляет собой элемент, состоящий из металлического кожуха, средней огнеупорной части и циркониевой вставки, материалы которых имеют разные теплофизические свойства. Учитывая длительность процесса разлива длинной серией, в ходе моделирования рассматривалась стационарная задача теплопроводности. При этом температурное поле стакана описывается уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( a \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( a \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( a \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{W}{c} = 0, \quad (1)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности, отражающий теплоинерционные свойства в рассматриваемой точке стакана-дозатора;  $a = \lambda/c$ ;

$c, \lambda$  – объемная теплоемкость и коэффициент теплопроводности материалов стакана;

$T$  – температура в рассматриваемой точке стакана-дозатора;

$x, y, z$  – координаты рассматриваемой точки;

$W$  – мощность источника тепла.

Температурное воздействие на стакан оказывается струей жидкой стали, проходящей через канал, а также излучением зеркала металла, находящегося в кристаллизаторе.

В виду сложной пространственной конструкции стакана, решение задачи выполнялось с помощью прикладного пакета ANSYS, реализующего метод конечных элементов [5]. Так как стакан-дозатор является осесимметричным элементом, то для расчета была создана геометрическая модель, соответствующая четверти стакана (рис.2 а). В качестве граничных условий использовались следующие: на поверхности сталеразливочного канала – конвективная теплоотдача от жидкой стали с температурой 1600 °С (коэффициент теплоотдачи 0,27 МВт/(м<sup>2</sup>·К) [6]); на нижней поверхности цилиндрической части – теплоотдача излучением с плотностью теплового потока 20 кВт/м<sup>2</sup> [6]; на внешней поверхности кожуха стакана – конвективная теплоотдача в окружающую среду (температура воздуха принята 30 °С). В ходе моделирования рассматривались два варианта (№1 и №2) конструкции стакана-дозатора, отличающиеся высотой борта кожуха. При этом конечно-элементные модели (рис.2 б) состояли из 33775 и 33499 элементов соответственно.

В результате выполненных расчетов получено распределение температурных полей в конструкции стакана-дозатора (рис.3).

Как можно увидеть, наибольшую температуру имеет циркониевая вставка, далее в средней части происходит интенсивное падение темпера-

туры. Температура кожуха находится в диапазоне 60 ... 250 °С.

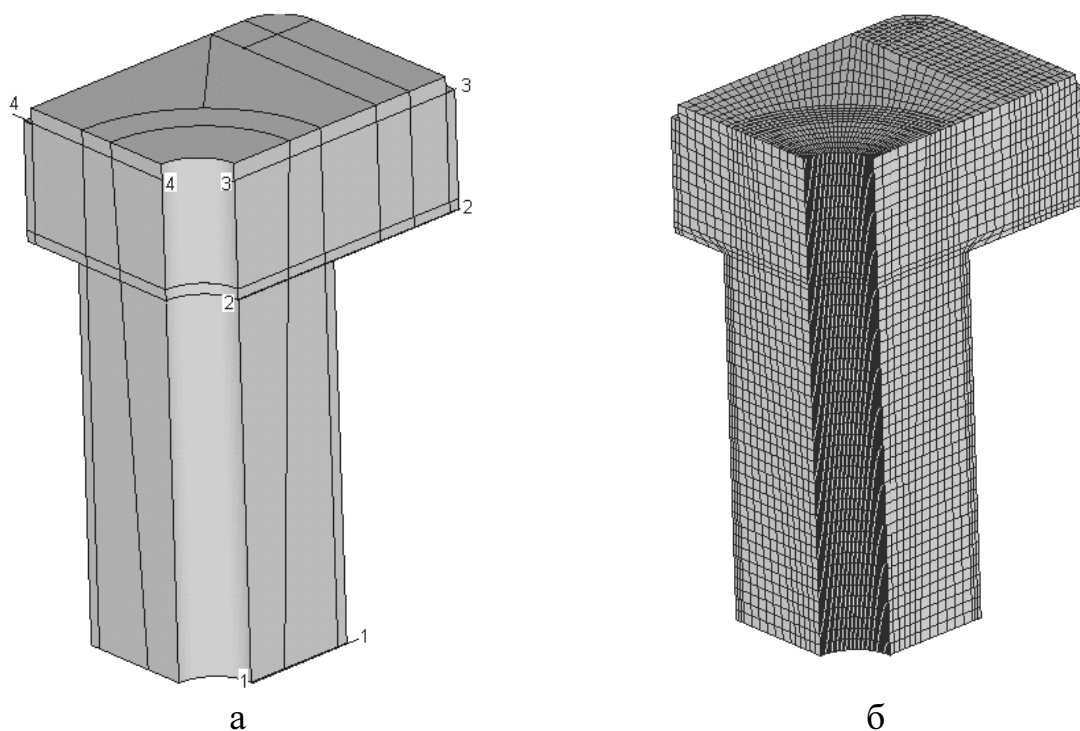


Рисунок 2 – Геометрическая модель (а) и конечно-элементная модель (б) стакана-дозатора (1, 2, 3, 4 характерные сечения)

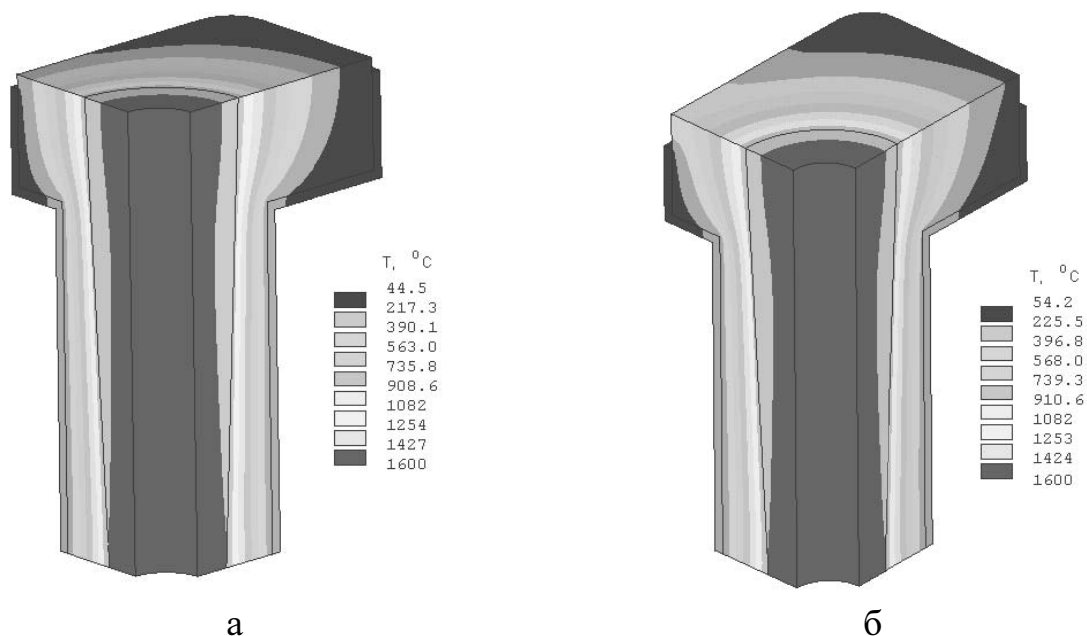
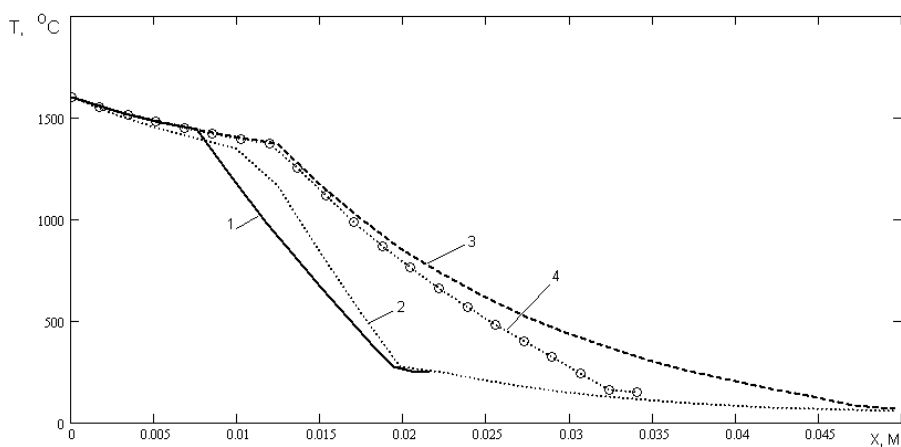


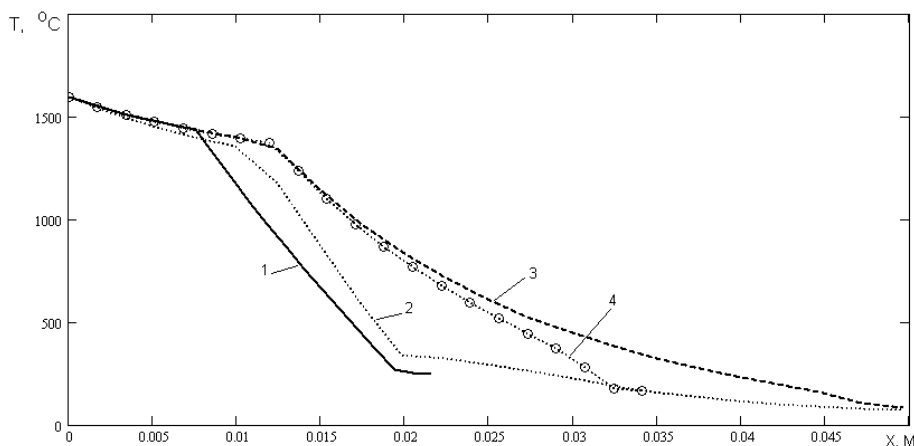
Рисунок 3 – Картины распределения температурных полей в стакане-дозаторе: а) вариант № 1; б) вариант № 2

Графики изменения температур вдоль отдельных сечений показаны на рис.4. Следует отметить, что в целом распределение температурных по-

лей подобно для обоих вариантов конструкции стакана, но для варианта №2 (с коротким бортом кожуха) температура кожуха на 10-17 °С выше.



а



б

Рисунок 4 – Изменение температуры в характерных сечениях стакана дозатора (1, 2, 3, 4 – характерные сечения): а) вариант №1; б) вариант №2

Под действием температурных полей в конструкции стакана-дозатора возникают термические напряжения, которые описываются соотношениями Дюгамеля-Неймана [7]:

$$\begin{cases} \sigma_x = 2\mu\varepsilon_x + \lambda e - (3\lambda + 2\mu)\alpha T; & \tau_{xy} = \mu\gamma_{xy}; \\ \sigma_y = 2\mu\varepsilon_y + \lambda e - (3\lambda + 2\mu)\alpha T; & \tau_{yz} = \mu\gamma_{yz}; \\ \sigma_z = 2\mu\varepsilon_z + \lambda e - (3\lambda + 2\mu)\alpha T; & \tau_{zx} = \mu\gamma_{zx}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – нормальные напряжения вдоль оси  $x, y, z$  соответственно;

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  – касательные напряжения;

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  – относительные линейные деформации по оси  $x, y, z$  соответственно;

$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$  – относительные угловые деформации;

$\mu, \lambda$  – коэффициенты Ляме, зависящие от коэффициента Пуассона  $\nu$  и

модуля упругости  $E$  материалов стакана-дозатора:

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} ; \lambda = \frac{E\nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} ; \quad (3)$$

$e$  – объемная деформация:  $e = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$ ;

$\alpha$  – коэффициент линейного расширения материалов стакана-дозатора;

$T$  – температура в рассматриваемой точке конструкции.

Задача о напряженно-деформированном состоянии стакана-дозатора, вызванного температурными воздействиями, также решалась с помощью пакета ANSYS. При этом в качестве нагрузки использовались температуры, полученные для каждого узла конечно-элементных моделей, а ограничения на перемещение были заданы на верхней поверхности стакана-дозатора, являющейся местом контакта с базовой огнеупорной плитой, размещенной во фланце днища промежуточного ковша.

В результате расчета получено распределение напряжений в теле стакана-дозатора (рис.5).

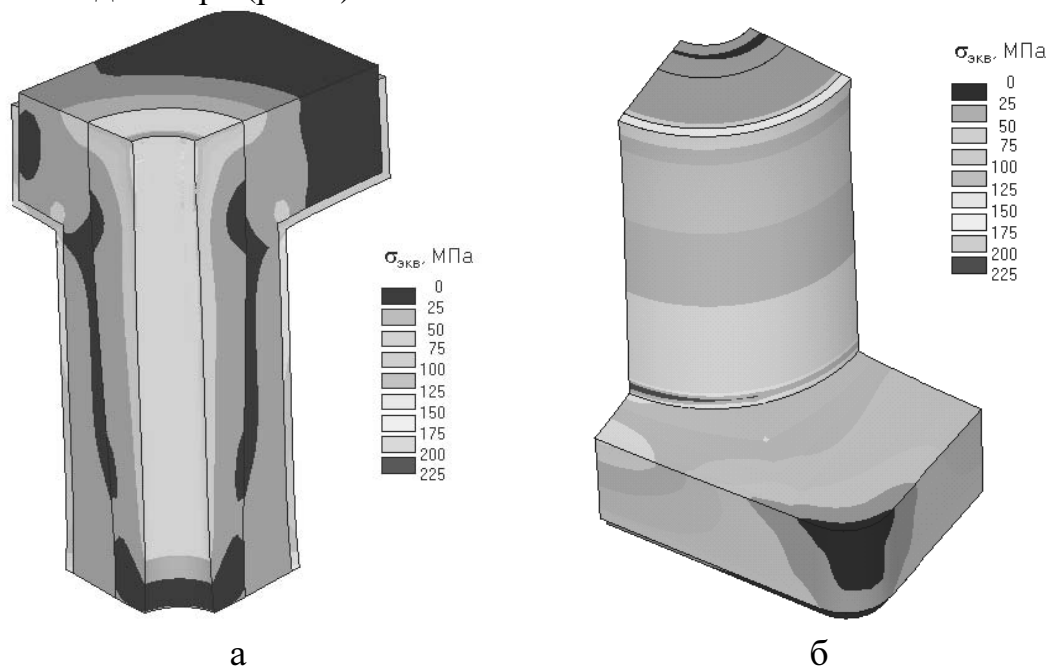


Рисунок 5 – Картины распределения эквивалентных напряжений в стакане-дозаторе

Установлено, что максимальные эквивалентные напряжения в огнеупорных частях стакана не превышают 37 МПа, а в металлическом кожухе – 210 МПа, что ниже допустимых значений – 52 МПа и 240 МПа. Для конструкции стакана с коротким бортом (вариант № 2) напряжения в целом на 5..10 % выше. Максимальные напряжения возникают на поверхности стакана-дозатора, обращенной к зеркалу металла в кристаллизаторе, а

также на кожухе в месте соединения цилиндрической и плоской частей. Максимальные линейные деформации в направлении осей  $x$  и  $y$  (расширение конструкции) достигают 1 мм, а в направлении оси  $z$  (удлинение конструкции) не превышают 2 мм. Полученные расчетные значения деформаций огнеупорного элемента учитывали при назначении конструктивных размеров и гарантированных зазоров в опорных и направляющих узлах механической системы опытно-промышленного образца разработанного разливочного устройства [8].

Таким образом, результаты выполненного математического моделирования напряженно-деформированного состояния огнеупорных элементов разливочной системы промежуточного ковша, позволили определить условия отсутствия заклинивания в ней сопрягаемых деталей при быстрой замене стаканов-дозаторов и выдать рекомендации для выполнения расчетно-конструкторских работ при проектировании опытно-промышленного образца нового устройства.

### **Литература**

1. Дюдкин Д.А. Качество непрерывнолитой стальной заготовки. – К.:Техніка, 1988.- 253 с.
2. Процессы непрерывной разливки/ А.Н. Смирнов, В.Л. Пилушенко, А.А. Минаев и др. – Донецк: ДонНТУ, 2002.- 536 с.
3. Совершенствование конструкции устройства для быстрой смены стаканов-дозаторов промковша МНЛЗ/ С.П. Еронько, А.Н. Смирнов, Д.А. Яковлев и др.// *Металлургическая и горнорудная промышленность.*- 2006.- № 8.- С. 107 – 109.
4. Патент 74507. Україна. Пристрій для заміни стакана-дозатора проміжного ковша машини безперервного лиття заготовок / С.П. Єронько, О.М. Смірнов, О.Ю. Цупрун та ін.// Бюл. 2005. №12.
5. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
6. Огурцов А.П., Жульковская И.И., Кулик А.Д. Расчет температурного состояния ковшового шибера затвора при различных способах разливки стали // *Изв. вузов. Четная металлургия.* – 2001. – №4. – С.11– 15.
7. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности. / Г.С. Варданян, В.И. Андреев, Н.М. Атаров, А.А. Горшков. – М.: Издательство АСВ, 1995. – 568 с.
8. Устройство для быстрой замены стаканов-дозаторов промежуточного ковша сортовой МНЛЗ/ С.П. Еронько, А.Н. Смирнов, Д.А. Яковлев и др. // «Черметинформация». Бюлл. «Черная металлургия». – 2007. – №2 – С. 70-73.

**© Еронько С.П., Ошовская Е.В., Яковлев Д.А. 2007**