

Исследование напряженно-деформированного состояния узла крепления стопора-моноблока промежуточного ковша МНЛЗ

Представлены результаты математического моделирования и лабораторных исследований процесса разрушения стопора-моноблока вследствие развития предельно опасных деформаций, вызванных неконтролируемой затяжкой резьбового соединения несущего металлического стержня с огнеупорным элементом.

Ключевые слова: промковш, стопор, МНЛЗ, деформация, разрушение, огнеупор

Надежность функционирования стопорной системы промежуточного ковша машины непрерывного литья заготовок во многом определяет возможности повышения серийности разливки, от которой в значительной мере зависят показатели эффективности современного сталеплавильного производства [1].

Практика применения устройств стопорного типа для дозированной подачи жидкого металла в кристаллизатор МНЛЗ показала, что одной из главных причин преждевременного выхода их из строя является разрушение корпуса огнеупорного моноблока в зоне размещения его узла крепления к несущему металлическому стержню [2].

На основании результатов ранее проведенных исследований установлена связь между процессом зарождения трещин в верхней части стопора-моноблока с наличием концентраторов напряжений в месте запрессовки фиксирующих деталей узла его крепления и действием повышенных механических нагрузок, возникающих при неконтролируемой затяжке резьбового соединения, а также из-за перекоса огнеупора во время перекрытия сталевыпускного канала промежуточного ковша [3, 4].

В связи с этим дальнейшее изучение условий приложения нагрузки к узлу крепления системы стопора-моноблока должно быть сориентировано на разработку рекомендаций по ослаблению негативного влияния факторов, вызывающих аварийное разрушение стопорного устройства. Прежде всего, необходимо определить значения нагрузок, способных вызвать предельно опасные деформации элементов, входящих в состав узла крепления стопорной системы, а также назначить технические параметры, которые должны быть выдержаны в процессе технического обслуживания и эксплуатации разливочного устройства.

Поскольку до настоящего времени не получены строгие теоретические зависимости для расчета значений указанных величин, то для их определения использовали математическое моделирование напряженно-деформированного состояния узла

крепления огнеупорного стержня стопора-моноблока, которое выполнили на основе метода конечных элементов (МКЭ), позволяющего оценить значения эквивалентных напряжений в теле огнеупорного элемента стопорной системы.

Известно, что моделирование напряженно-деформированного состояния объектов с использованием МКЭ базируется на положениях теории упругости и пластичности [5], согласно которым объемное напряженное состояние описывается законом Гука

$$\{\sigma\}^T = [E]\{\varepsilon\}^T,$$

где $\{\sigma\}^T = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}\}$ – вектор напряжений; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ и $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ – нормальные и касательные напряжения по осям OX, OY, OZ.

$\{\varepsilon\}^T = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}\}$ – вектор деформаций; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ и $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$ – относительные линейные и угловые деформации по направлению осей OX, OY, OZ.

$$[E] = \begin{bmatrix} \lambda + 2\nu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\nu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \nu \end{bmatrix} -$$

матрица упругости, где $\lambda = E\mu/[(1+\mu)(1-2\mu)]$ – постоянная Ляме; $\nu = E/2(1+\mu)$ – модуль сдвига (в этих выражениях E – модуль упругости и μ – коэффициент Пуассона материала объекта исследования).

Деформации связаны с перемещениями $\{\varepsilon\}^T = [D]^T\{q\}$, где $\{q\}$ – вектор перемещений, $[D]^T$ – матрица дифференцирования

$$\{q\} = \begin{Bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{Bmatrix}$$

$$[D]^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix};$$

Для определения перемещений исследуемый объект (расчетная область Ω) условно разделяется на конечные элементы (КЭ) определенной геометрической формы (для объемных объектов – параллелепипеды или тетраэдры). Поле перемещений в каждом КЭ описывается при помощи интерполяционных функций, обладающих следующими свойствами [6]:

- каждая интерполяционная функция f_i выражает закон изменения перемещений по области КЭ, когда узловое перемещение i отлично от нуля, а все остальные равны нулю;

- каждая интерполяционная функция для КЭ в форме тетраэдра является полиномом вида

$$f_i = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z),$$

где a_i, b_i, c_i, d_i – коэффициенты, значения которых определяются через координаты узлов КЭ; V – объем КЭ;

- интерполяционная функция f_i в узле i принимает значение равное 1; в остальных узлах – нулю.

Под действием внешней нагрузки в узлах каждого конечного элемента возникают внутренние силы, вектор которых для тетраэдра состоит из 12 компонентов

$$\{R\}^T = \{R_{x_1}, R_{y_1}, R_{z_1}, R_{x_2}, R_{y_2}, R_{z_2}, R_{x_3}, R_{y_3}, R_{z_3}, R_{x_4}, R_{y_4}, R_{z_4}\}.$$

Связь внутренних сил и перемещений узлов КЭ отражает уравнение

$$[K]\{q\} = \{R\},$$

где $[K]$ – матрица жесткости КЭ, значения элементов которой зависят от размера КЭ и механических свойств материала.

При образовании единой системы из m конечных элементов, составляющих исследуемый объект, учитываются следующие требования [5, 6]:

- условия неразрывности перемещений в узлах КЭ, составляющих модель объекта;

- условия равновесия сил в узлах этих КЭ, на основании которых справедлива зависимость

$$[K]_{\Omega}\{q\}_{\Omega} = \{P\}_{\Omega},$$

где $[K]_{\Omega}$ – глобальная матрица жесткости расчетной области; $\{q\}_{\Omega}$ – вектор-столбец узловых перемещений этой области; $\{P\}_{\Omega}$ – вектор-столбец внешних сил, действующих на объект исследования.

Для формирования глобальной матрицы жесткости $[K]_{\Omega}$ выполняют следующие действия: из рассматриваемой модели объекта поочередно выбирается КЭ; для выбранного КЭ рассчитывается локальная матрица жесткости $[K]$; определяют, номера каких глобальных узлов модели соответствуют локальным

номерам текущего КЭ; в глобальной матрице жесткости $[K]_{\Omega}$ заполняются ячейки, которые находятся на пересечении строк и столбцов с соответствующими глобальными номерами узлов модели; если в этих ячейках уже имеются значения от предыдущих рассмотренных соседних КЭ ввиду того, что узлы у них общие, то вновь поступающие значения в соответствующие ячейки $[K]_{\Omega}$ суммируются с уже находящимися.

Формирование глобальной матрицы жесткости $[K]_{\Omega}$ на основании локальных матриц $[K]_i$ можно записать:

$$[K]_{\Omega} = \sum [a_i]^T [K]_i [a_i],$$

где $[a_i]^T$ – матрица связи номеров степеней свободы при глобальной (для всей области) и локальной (для текущего элемента) нумерациях.

После исключения из матрицы $[K]_{\Omega}$ и векторов $\{q\}_{\Omega}$ и $\{P\}_{\Omega}$ столбцов и строк, номера которых соответствуют нулевым узловым перемещениям, определяют перемещения узлов КЭ, составляющих объект исследования, путем решения системы уравнений

$$\{q\}_{\Omega} = [K]_{\Omega}^{-1} \{P\}_{\Omega},$$

где $[K]_{\Omega}^{-1}$ – обратная матрица.

Полученный вектор узловых перемещений $\{q\}_{\Omega}$ используется для получения векторов деформаций $\{\epsilon\}$ и напряжений $\{\sigma\}$ для каждого КЭ расчетной области, при этом учитывается соответствие между глобальными и локальными номерами узлов.

Оценка прочности объекта исследования выполняется по эквивалентным напряжениям, которые в соответствии со второй теорией прочности для хрупких материалов описываются зависимостью

$$\sigma_{\text{эКВ}} = \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3),$$

где σ_1, σ_2 и σ_3 – главные напряжения, определяемые по найденным компонентам вектора напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ из системы уравнений

$$\begin{cases} \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3, \\ \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2 = \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1, \\ \sigma_x \sigma_y \sigma_z + 2\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{xz} - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{xz}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2 = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3. \end{cases}$$

Можно заметить, что МКЭ характеризуется значительной трудоемкостью вычислительных процедур, поэтому моделирование напряженно-деформированного состояния узла крепления огнеупорного стержня стопора-моноблока проводилось в прикладном пакете ANSYS, реализующем данный метод. При этом учитывали форму и геометрические параметры деталей, входящих в состав исследуемой системы и свойства материалов, применяемых для их изготовления, а также наличие концентраторов напряжений.

Исследуемый узел крепления стопора-моноблока (рис. 1) включал внутреннюю керамическую гайку 1, впрессованную в верхнюю цилиндрическую часть огнеупорного стопора 2 и связанную посредством резьбы с полым металлическим стержнем 3, зафиксированным с внешней стороны шайбой 4 и шестигранной гайкой 5.

Ввиду симметрии конструкции и для уменьшения

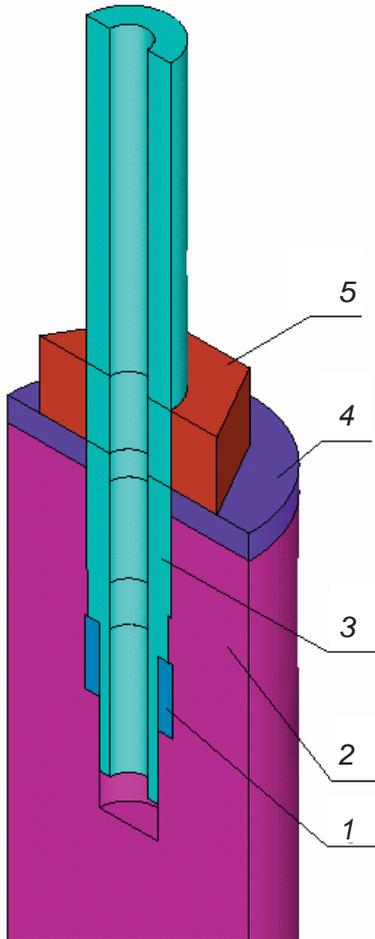


Рис. 1. Конструкция узла крепления стопора

размерности задачи (количества решаемых уравнений) была создана объемная геометрическая модель половины цилиндрической части огнеупорного стопора (рис. 2, а), на базе которой была сгенерирована конечно-элементная модель, состоящая из 16803 тетраэдров (рис. 2, б). Механические свойства материала цилиндрической части стопора (корундографит) задавали модулем упругости $E = 4000$ МПа и коэффициентом Пуассона $\mu = 0,32$. В качестве граничных условий выступали закрепление на контактной поверхности с шайбой и условие симметричности. Внешнюю нагрузку, возникающую при затяжке металлической гайки полого стержня узла крепления, задавали давлением, которое действовало на поверхность, контактирующую с внутренней керамической гайкой. Значение задаваемого давления определяли по формуле

$$q = \frac{F_a}{S},$$

где F_a – осевая сила, возникающая в стержне при затяжке резьбового соединения; S – площадь контактирующей поверхности.

Осевую силу находили через момент затяжки $M_{зат}$:

$$F_a = \frac{M_{зат}}{0,5d_2 \operatorname{tg}(\psi + \phi)},$$

где d_2 – средний диаметр резьбы, ψ – угол наклона винтовой линии по среднему диаметру резьбы, ϕ – приведенный угол трения.

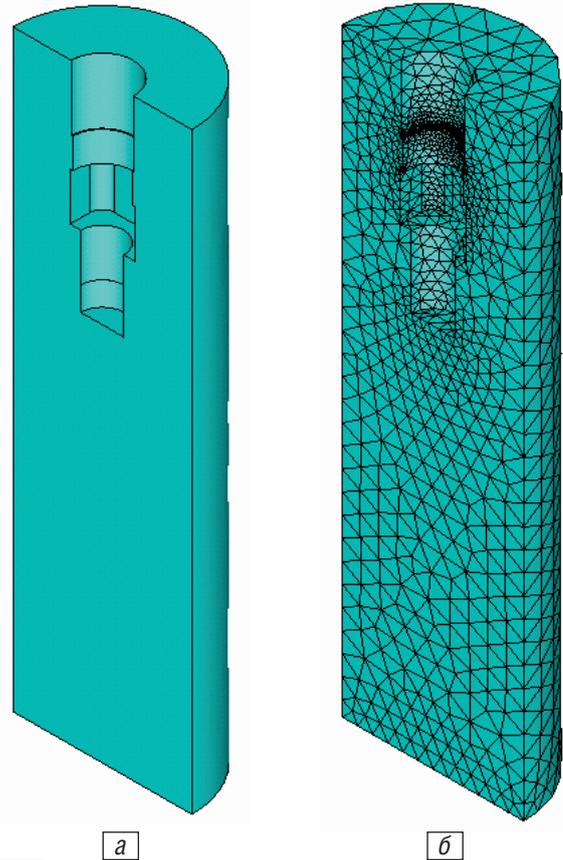


Рис. 2. Геометрическая (а) и конечно-элементная модель (б) огнеупорной цилиндрической части стопора

Расчет выполняли при разных значениях давления, соответствующих определенным значениям момента затяжки. В качестве результатов расчета анализировали картины распределения и максимальные значения эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв. max}}$ а также деформаций Δ_{max} цилиндрической части стопора. Полученные числовые результаты приведены в таблице, а на рис. 3 представлено распределение эквивалентных напряжений для разных моментов затяжки, что наглядно иллюстрирует распределение напряжений в теле огнеупорного стопора. При увеличении момента затяжки напряжения распространяются от места приложения давления к внешней поверхности цилиндрической части стопора, а их значения повышаются. Результаты

Результаты расчетов напряженно-деформированного состояния узла крепления стопора-моноблока

$M_{зат}$, Н/м	F_a , кН	p , МПа	$\sigma_{\text{экв. max}}$, МПа	Δ_{max} , мм
100	15,2	37,2	59,5	0,18
200	30,3	74,4	119	0,36
300	45,4	111,7	178	0,54
400	60,6	148,9	238	0,72
500	75,7	186,1	297	0,90
1000	151,5	372,2	595	1,8
1500	227,2	558,3	892	2,7
2000	303,0	744,4	1190	3,6
2500	378,7	930,5	1490	4,5
2700	404,5	993,8	1590	4,8

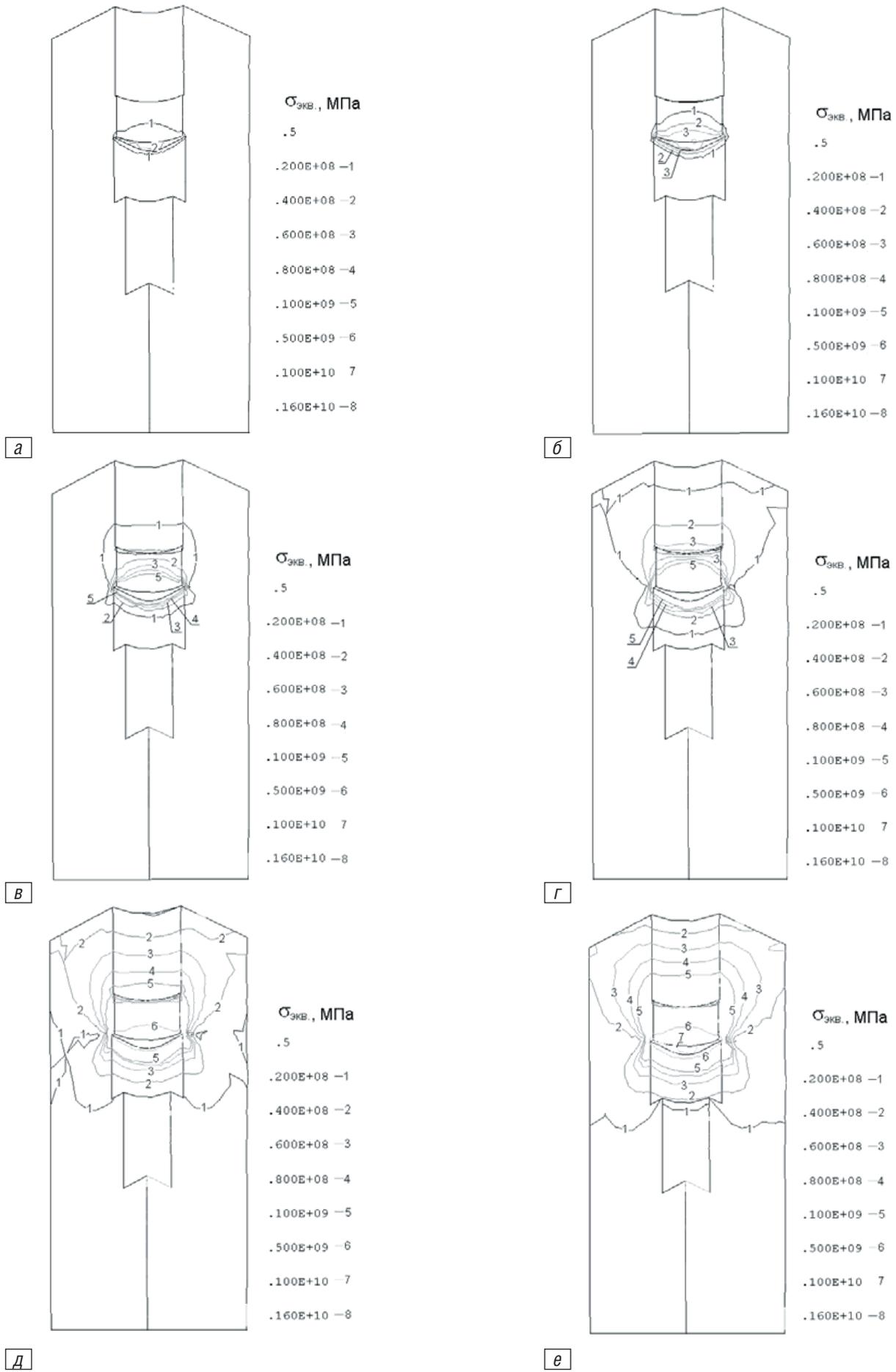


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений для моментов затяжки $M_{зат}$: 100 Н/м (а); 200 Н/м (б); 500 Н/м (в); 1000 Н/м (г); 2000 Н/м (д); 2700 Н/м (е)

расчета свидетельствуют о том, что при моменте затяжки 400 Н/м возникают деформации, которые могут вызвать образование внутренних трещин в теле огнеупора. При дальнейшем повышении нагрузки

эти трещины будут увеличиваться, распространяться к верхней части стопора и в конечном итоге могут привести к полному разрушению узла крепления стопора-моноблока.

Поскольку выполнение проверки правильности теоретических результатов экспериментальным путем в производственных условиях не представляется возможным из-за экстремальных тепловых нагрузок на измерительную аппаратуру, контроль напряженно-деформированного состояния узла крепления стопора-моноблока проводили на лабораторном стенде, внешний вид и схема которого показаны на рис. 4.

Стенд включает две колонны 7, жестко закрепленные на тумбе 1 и фиксирующие от смещения поперечную балку 8, установленную на опорах 5. Балка имеет сквозное цилиндрическое отверстие, через которое проходит силовой винт 4, взаимодействующий с гайкой 2, вмонтированной в червячное колесо 3, находящееся в зацеплении с червяком 16. К хвостовику червяка прикреплен рычаг 15, второй конец которого связан с подвеской 13 для размещения набора грузов 14. Силовой винт 4 посредством специального захвата 6 соединен с резьбовым стержнем 9 испытываемого стопора-моноблока 12, опирающегося своей шайбой 11 на металлическую гильзу 10, размещенную на поперечной балке 8. На внешней цилиндрической поверхности гильзы закреплен тензорезисторный преобразователь, включающий четыре фольговых датчика, соединенных по мостовой схеме. Преобразователь позволяет фиксировать электрический сигнал, пропорциональный осевой нагрузке, действующей на резьбовой стержень узла крепления стопора-моноблока. Аналоговый сигнал, снимаемый с моста сопротивлений, усиливался и после преобразования АЦП в цифровой код подавался на вход системного блока ПЭВМ для обработки и одновременного визуального отображения на экране монитора, а также его распечатки на принтере с целью последующего анализа полученных результатов.

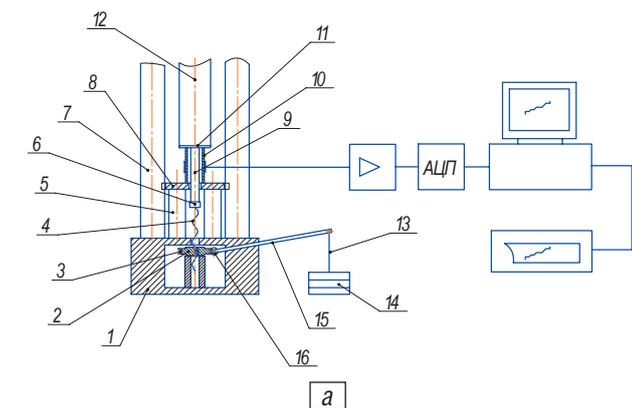


Рис. 4. Схема (а) и общий вид (б) лабораторного стенда

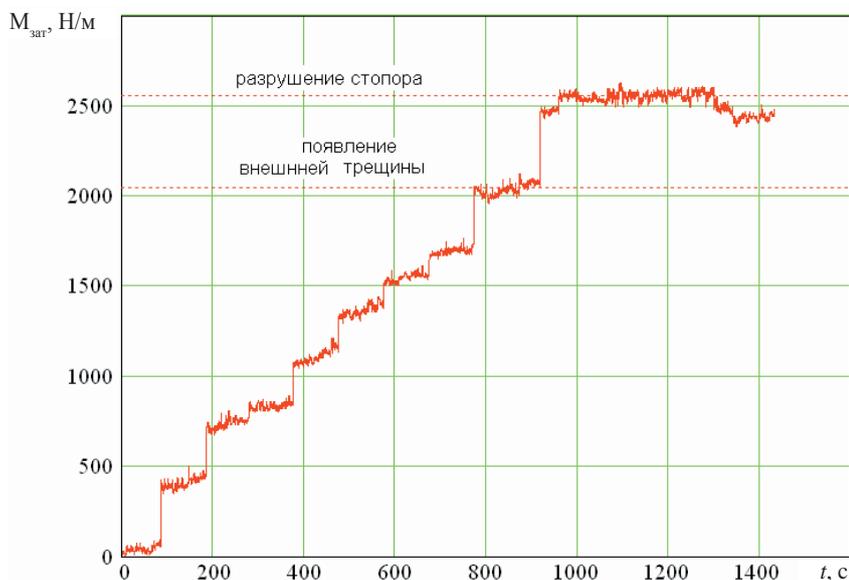


Рис. 5. Вид сигнала, зарегистрированного во время дискретного нагружения узла крепления стопора-моноблока

Суть эксперимента состояла в определении значений осевой силы, при которых в теле огнеупорного моноблока в районе размещения узла крепления возникают деформации, вызывающие зарождение и развитие трещин до полного его разрушения. Для решения поставленной задачи предварительно (в соответствии с рекомендациями работы [7]) выполнили тарировку тензорезисторного преобразователя, тестирование и настройку контрольно-измерительной системы. Стопор устанавливали на испытательный стенд. Узел крепления подвергали ступенчатому нагружению моментом затяжки (рис. 5). Фиксированный момент затяжки обеспечивали с помощью грузов, последовательно



Рис. 6. Динамика развития трещины в теле огнеупорного элемента стопорной системы

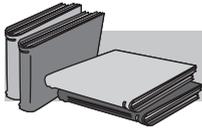
устанавливаемых на подвеску и создававших через рычаг крутящий момент в червячном зацеплении, который передачей винт-гайка преобразовывался в осевую силу, действующую на резьбовой стержень стопора-моноблока и керамическую гайку, находящуюся в его теле. При этом происходила деформация верхней части стопора. В процессе силового воздействия при каждом фиксированном значении приложенной нагрузки осуществляли фотографирование участка наружной поверхности огнеупорного элемента в

месте размещения узла крепления. Анализ и сопоставление полученных изображений и результатов измерений позволили установить момент появления трещины на наружной поверхности огнеупора (рис. 6, а) и проследить динамику ее развития (рис. 6, б, в) по мере увеличения осевой силы, действующей на узел крепления стопора-моноблока до полного его разрушения (рис. 6, г).

В соответствии с полученной информацией, появление трещины на наружной поверхности стопора-моноблока было отмечено при осевой нагрузке, соответствующей моменту затяжки 2050 Н/м, а полное его разрушение произошло, когда момент затяжки достиг 2500 Н/м. Так как в реальных производственных условиях в процессе длительной разливки стали на стопор-моноблок одновременно с механическими действуют интенсивные тепловые нагрузки, с учетом рекомендуемого значения коэффициента запаса прочности для хрупких материалов, равного 4-5, допустимый момент затяжки резьбового соединения узла крепления стопора не должен превышать 400 Н/м. Результаты расчетов и экспериментальных измерений достаточно хорошо согласуются между собой. Их использование на практике позволило разработать технические решения, направленные на совершенствование конструкции стопора моноблока промежуточного ковша МНЛЗ [8], новизна которых защищена двумя патентами Украины [9, 10].

Выводы

Таким образом, выполненные исследования напряженно-деформированного состояния узла крепления огнеупорного стопорного элемента к несущему металлическому стержню будут способствовать повышению надежности разливочных систем промежуточных ковшей и увеличению серийности непрерывной разливки стали на современных МНЛЗ.



ЛИТЕРАТУРА

1. Процессы непрерывной разливки / А. Н. Смирнов, В. Л. Пилюшенко, А. А. Минаев и др. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 536 с.
2. *Еронько С. П., Быковских С. В.* Разливка стали: Оборудование. Технология. – Киев: Техніка, 2003. – 216 с.
3. Исследование условий стабильности функционирования системы дозирования стали в промковше МНЛЗ / С. П. Еронько, И. А. Орлов, Д. А. Яковлев и др. // *Металлургическая и горнорудная пром-сть.* – 2004. – № 8. – С. 126-129.
4. Условия работы стопора-моноблока при регулировании истечения стали из промковша МНЛЗ / А. Н. Смирнов, С. П. Еронько, И. А. Орлов и др. // Там же. – 2004. – № 4. – С. 96-99.
5. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности / Под ред. Г. С. Варданяна. – М.: Изд-во АСВ, 1995. – 568 с.
6. *Сегерлинд Л.* Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
7. *Vaughan J.* Anwendung von V&K-Geräten für Dehnungsmessungen. – Danemark, 1978. – S. 126.
8. *Смирнов А. Н., Еронько С. П., Орлов И. А.* Совершенствование конструкции узла крепления стопора-моноблока промежуточного ковша МНЛЗ // *Металлургическая и горнорудная пром-сть.* – 2006. – № 4. – С. 70-72.
9. Пат. 74461 України, В 22 D 41/16. Стопор-моноблок / О. М. Смірнов, С. П. Єронько, І. О. Орлов та ін. – Опубл. 2005, Бюл. № 12.
10. Пат. 74462 України, В 22 D 41/16. Стопор-моноблок / О. М. Смірнов, С. П. Єронько, І. О. Орлов та ін. – Опубл. 2005, Бюл. № 12.

Анотація

Еронько С. П., Ошовська О. В., Орлов І. О., Мечик С. В., Бабенко В. С.
Дослідження напружно-деформованого стану вузла кріплення
стопора-моноблока проміжного ковша МБЛЗ

Висвітлено результати математичного моделювання та лабораторних досліджень процесу руйнування стопора-моноблока внаслідок розвитку гранично небезпечних деформацій, які викликані неконтрольованим затягуванням різьбового з'єднання несучого металевго стрижня з вогнетривким елементом.

Ключові слова

промківш, стопор, МБЛЗ, деформація, руйнування, вогнетрив

Summary

Eronko S., Oshovskaya E., Orlov I., Mechik S., Babenko V.
The stress-strain state investigation of the stopper-monoblock's mounting
node for tundish ladle of the continuous casting machine

The results of mathematical modeling and laboratory studies of stopper-monoblock's destruction process through the development of an extremely dangerous strain caused by the uncontrolled tightening of threaded connections of carrying metal rod with a refractory element are shown.

Keywords

tundish, stopper, CCM, deformation, fracture, refractory

Поступила 26.05.10