

УДК 669.02.09: 621.791.75

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ СВАРНЫХ РЕБЕР ЖЕСТКОСТИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

А. В. ЛОЗА, В. В. ЧИГАРЕВ, А. Н. СЕРЕНКО

Приазовский гос. техн. ун-т. 87500, г. Мариуполь, пер. Республики, 7. E-mail: loza_a_v@pstu.edu

Рассмотрены основные причины образования трещин и местных прогибов в литых крупногабаритных корпусных конструкциях, используемых в металлургии. Выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния наиболее нагруженных зон чаши шлаковоза в процессе эксплуатации. Показано, что для уменьшения остаточных деформаций литых чаш необходимо использовать дополнительные элементы жесткости в виде приварных ребер. Расчет определены требуемые параметры ребер жесткости и сварных швов. Библиогр. 7, рис. 8.

Ключевые слова: литые изделия, термические нагрузки, чаша шлаковоза, сварка, деформация, ребра жесткости

В металлургии и машиностроении используются корпусные детали, металлургические емкости и другие узлы сложной формы, которые эксплуатируются при высоких температурах. Для их изготовления обычно используется способ литья, как наименее затратный способ производства деталей сложной формы. В то же время для литых стальных изделий характерным является наличие разнообразных как внутренних, так и наружных дефектов, которые ослабляют прочность конструкции, являются источниками образования трещин и могут привести к изменению заданного профиля и раннему выходу оборудования из строя или созданию аварийной ситуации. Поэтому решение проблемы обеспечения надежности литых изделий при эксплуатации является важной технической задачей.

Рациональным и технологически удобным приемом усиления конструкции является применение дополнительных ребер жесткости. Однако в крупногабаритных изделиях, например чашах металлургических шлаковозов (рис. 1), ребра жесткости, полученные методом литья, имеют самостоятельные металлургические дефекты [1], поэтому не обеспечивают повышение прочности детали, особенно в условиях сложного нагружения.

Эксплуатационные трещины в чашах очень часто образуются по литым ребрам, или связанным с ними дефектам даже в случае локального усиления конструкции (рис. 2).

Упрочнение крупногабаритных изделий за счет применения дорогостоящих легирующих не всегда целесообразно. Поскольку предвидеть место расположения металлургических дефектов в литых узлах на практике затруднительно, а воспрепятствовать развитию трещин невозможно, уве-

личить прочность изделия технологически удобно при помощи дополнительных конструктивных элементов, закрепленных сваркой. Их основные преимущества следующие:

- возможность применения материала с требуемыми свойствами;
- однородность свойств по сечению, что достигается применением катаных заготовок вместо литых.

Проектирование таких элементов для усиления конструкции предполагает выполнение двух этапов:

- конструирование упрочняющего элемента для изделия (ребра жесткости);

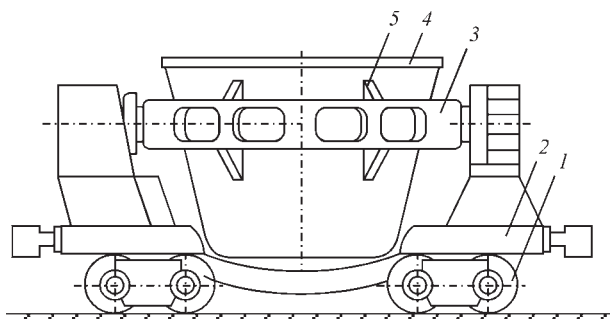


Рис. 1. Схема шлаковоза: 1 — ходовая часть шлаковоза; 2 — платформа шлаковоза; 3 — опорное кольцо для чаши; 4 — чаша шлаковоза; 5 — опорные элементы на чаше



Рис. 2. Трещины в шлаковых чашах в районе литых ребер жесткости

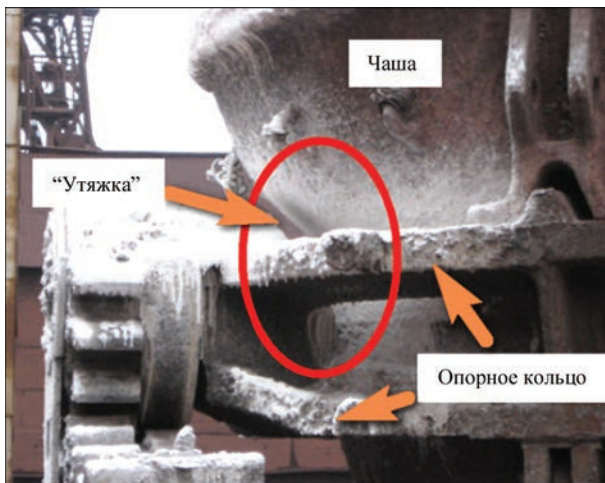


Рис. 3. Образование остаточных деформаций чаши в виде «утяжки»

– расчет сварного соединения для его закрепления.

Практика эксплуатации оборудования показывает, что преждевременное разрушение детали или возникновение остаточных деформаций связаны с ее использованием в критических режимах [2]. Поэтому проектирование упрочняющего элемента, например, дополнительного ребра в случае необходимости увеличения жесткости конструкции, должно выполняться с учетом максимальных нагрузок, которые могут действовать на данное оборудование в нештатных режимах. Например, корпус чаши имеет расчетную температуру наружной стенки около 450 °С. Однако в производственных условиях периодически возникают ситуации, когда шлаковоз или состав из нескольких шлаковозов вынужденно простаивает после загрузки (приема расплавленного шлака с температурой 1500...1600 °С). В этом случае корпус шлаковой чаши испытывает неравномерный нагрев стенок до температур, более высоких по сравнению с проектными. В районе опорного кольца шлаковоза наружная поверхность чаши может иметь температуру 620 °С. Механические свойства материала корпуса (обычно — углеродистые стали) являются температурно зависимыми характеристиками [3]. Эксплуатация стальных изделий при высоких температурах приводит к ослаблению границ зерен [4]. При нагреве корпуса выше 580...600 °С предел текучести углеродистых сталей значительно снижается, что приводит к появлению остаточных деформаций в виде прогиба стенки, ее утонению и возникновению трещин.

При эксплуатации шлаковоза через 3...4 месяца от начала кампании возникают пластические деформации в районе поворотной цапфы (т. н. «утяжка»), которые со временем прогрессируют (рис. 3).

Установка дополнительных ребер жесткости является эффективной при максимальном при-

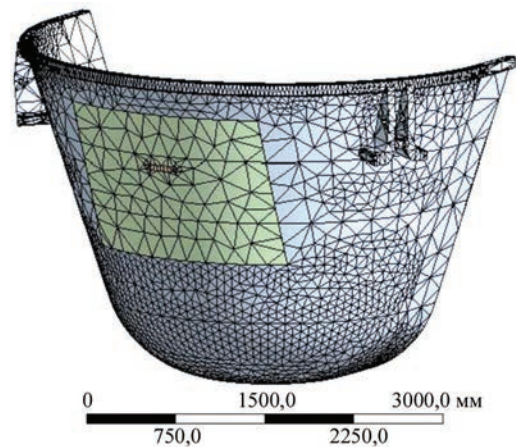


Рис. 4. Моделирование корпуса чаши с применением метода конечных элементов

ближении места их приварки к зоне наибольших деформаций корпуса чаши. Для оценки развития указанных дефектов необходимо выполнить расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) наиболее нагруженного узла шлаковоза — чаши. Такой расчет может быть выполнен, например, с использованием методики [5]. Это позволяет определить участки изделия, которые нуждаются в упрочнении для работы при значительных термических перегрузках.

Было выполнено моделирование состояния чаши под действием технологических нагрузок. Для создания трехмерной геометрической модели чаши шлаковоза (рис. 4) использованы принципы каркасного проектирования в прямоугольной системе координат.

При решении тепловой задачи определялось распределение температур в корпусе чаши шлаковоза. В ходе расчета программа сравнивает тепловой баланс с критерием сходимости, указанным в задаче. Проверка сходимости результатов основана на анализе температур и тепловых потоков. Результаты решения тепловой задачи используются для определения деформаций.

В ходе проведения моделирования оказалось, что деформации корпуса возникают от неравномерного нагрева материала стенок. Температура наружной поверхности корпуса 450...620 °С, внутренней рабочей — 800...900 °С. Тепловые нагрузки приводят к изгибу стенки чаши. Изменение профиля корпуса чаш происходит в определенной зоне поворотных цапф опорного кольца, которая является критической с точки зрения сохранения рабочего состояния чаши.

Расчеты температурных полей и возникающих деформаций для чаши с другими (большими) толщинами корпуса показывают, что увеличение толщины стенки чаши при тех же граничных условиях задачи практически мало влияет на значения прогибов стенки. Поэтому совершенствование конструкции чаши путем увеличения ее толщины

является бесперспективным и нерентабельным направлением.

Установлено, что в случае локального перегрева стенки выше 600 °С прогиб корпуса в этой зоне является неизбежным (рис. 5) для чаш существующих конструкций.

Литые ребра жесткости не обладают необходимым запасом пластичности и не могут обеспечить предотвращение остаточных деформаций стенки, а при циклическом изменении температуры в них образуются трещины, особенно при наличии внутренних литейных дефектов. Напротив, ребра жесткости из катаного металла с однородными свойствами, закрепленные сваркой, обладают требуемыми механическими характеристиками и способны решить задачу обеспечения жесткости корпуса при циклических термических и механических нагрузках. Свойства таких ребер можно вариативно оценить на стадии проектирования, задавая в расчетную модель характеристики материала заготовок из различных марок стали.

Для решения задачи об усилении конструкции чаши шлаковоза путем приварки ребер жесткости необходимых геометрических размеров в заданных зонах первоначально определяли дополнительно уравнивающую нагрузку $F_{уп}$ (рис. 6).

Задача решается с помощью метода конечных элементов (МКЭ). При этом определяется величина уравнивающей силы $F_{уп}$ (расчетного усилия), которая может свести деформации рассматриваемой пластины к нулю (или бесконечно малым величинам), т. е. к исходной форме профиля чаши шлаковоза. В результате решения такой задачи, применительно к используемым в настоящее время конструкциям чаш, получено значение расчетного усилия $P_1 = 150$ кН. Максимальное усилие на привариваемое ребро жесткости будет действовать в горизонтальной плоскости на уровне нижнего среза ребра.

Полученное расчетное усилие позволило определить оптимальную форму и размеры дополнительных упрочняющих элементов — ребер жесткости с минимальным расходом материалов. При анализе конструктивного исполнения ребра были рассмотрены несколько вариантов геометрических размеров. Задавали значения толщины ребра 10, 16, 20, 30, 40 мм. Моделировали нагружения ребра в случае приложения уравнивающей силы по горизонтали, рис. 7, а. Отдельно проверяли ребро на прочность при изгибе для случая опирания чаши на одно ребро (рис. 7, б) при нагрузке $P_2 = 120$ кН, (половина веса чаши).

Моделирование было проведено с использованием методики каркасного проектирования. Для решения систем уравнений рассматривался участок стенки чаши с наибольшими деформациями.

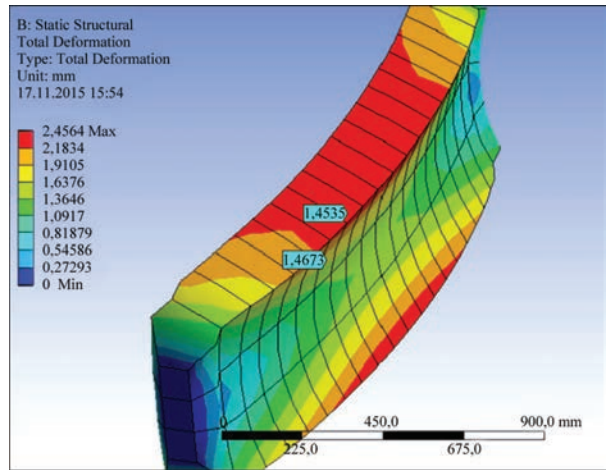


Рис. 5. Моделирование поведения участка стенки чаши шлаковоза в зоне перегрева в области опорного кольца

Крепление ребра к корпусу сваркой было смоделировано в виде жесткой заделки по линии контакта ребра и чаши. Анализ НДС нескольких вариантов конструкции позволил выбрать такой, который обладает минимальными значениями напряжений и возможных деформаций при заданных нагрузках и граничных условиях закрепления. Анализ показал, что условию прочности соответствует ребро толщиной 30 мм.

Расчет сварных швов, прикрепляющих ребро жесткости к чаше шлаковоза (рис. 8), проводили для случая использования угловых швов таврового соединения типа Т1 по методике, принятой в инженерной практике [6, 7].

При выборе схемы силового воздействия на сварные швы как для первого, так и второго варианта (рис. 8, а, б), необходимо учесть, что силы P_1 и P_2 располагаются вдали от шва, поэтому их напряженное состояние будет определяться одновременным действием вращательного момента и усилия, направленного под углом к продольной оси шва. Если привести все силы к центру C и разложить силы P_1 и P_2 на нормальную N и тангенциальную Q составляющие (см. рис. 8, в, г), получим такую плоскую систему сил, действующих на сварной шов

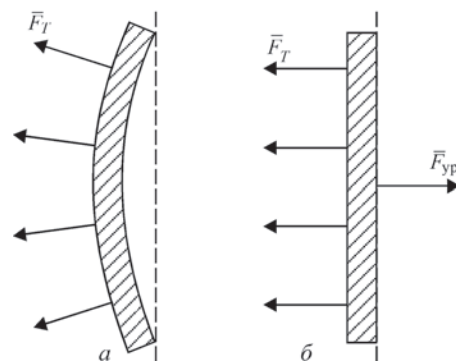


Рис. 6. Расчетная схема приложения нагрузок для определения уравнивающей силы F_T — приводящий к изгибу стенки за счет неравномерного нагрева

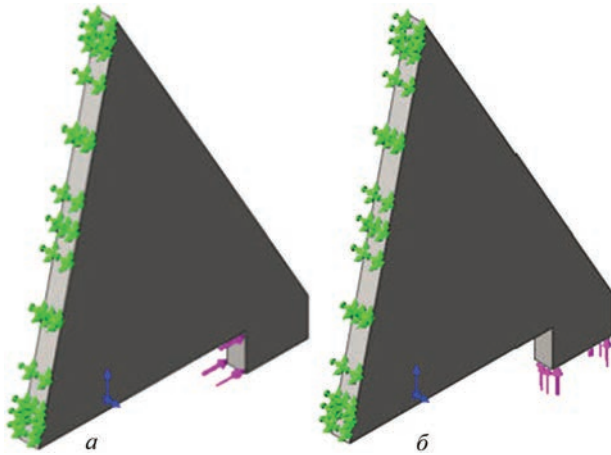


Рис. 7. Схема расчета ребра жесткости чаши для двух вариантов нагружения

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= P_1 h_1; & M_2 &= P_2 h_2 \\ N_1 &= P_1 \cos \alpha; & N_2 &= P_2 \sin \alpha \\ Q_1 &= P_1 \sin \alpha; & Q_2 &= P_2 \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где h_1, h_2 — плечи сил P_1 и P_2 соответственно; $\alpha = \arcsin(BE/BD)$ — угол отклонения шва от вертикали.

Наибольшие напряжения от вращательного момента возникают на концах сварных швов (точки В и D на рис. 8) и определяются по формулам

$$\tau_{1M} = \frac{M_1}{W_1} = \frac{P_1 h_1}{W_1}; \quad \tau_{2M} = \frac{M_2}{W_2} = \frac{P_2 h_2}{W_2}, \quad (2)$$

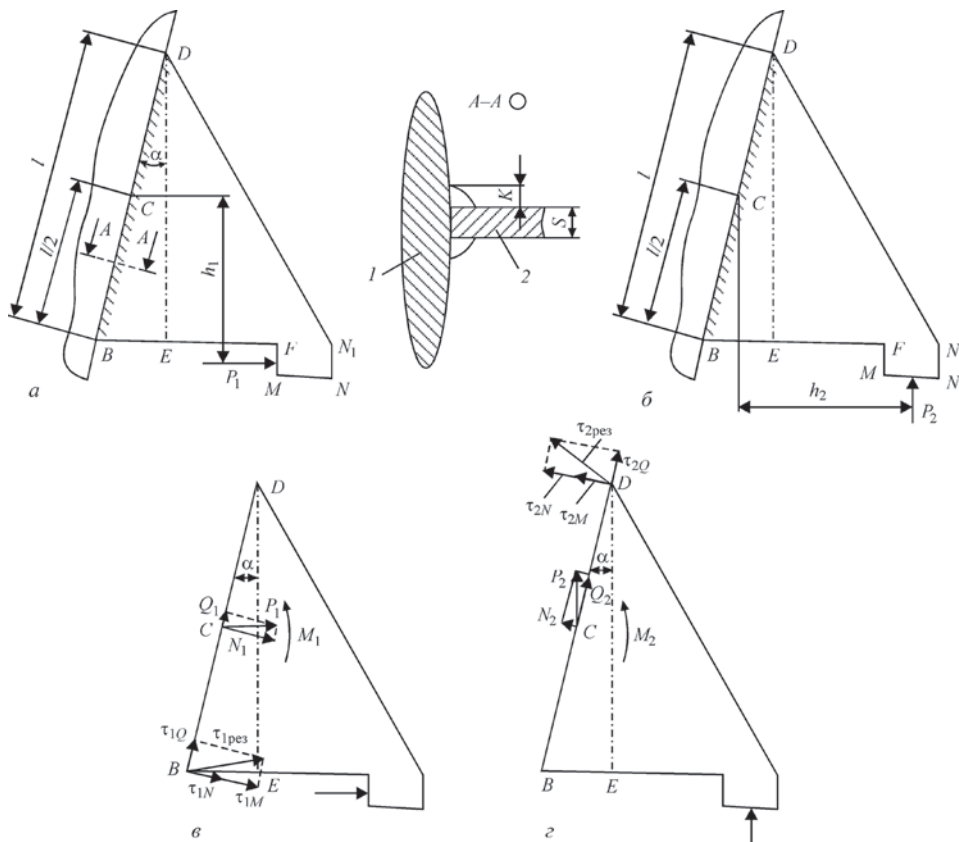


Рис. 8. Схема приварки ребра жесткости к чаше и силового воздействия на него: 1 — стенка чаши; 2 — ребро

где W_1, W_2 — моменты сопротивления расчетных сечений угловых сварных швов для первого и второго вариантов нагружения.

Площадь среза углового шва определяется расчетной толщиной углового шва h_p и его длиной. Расчетная толщина шва зависит от способа выполнения шва, его вида и связана с катетом шва K зависимостью

$$h_p = \beta K, \quad (3)$$

где β — коэффициент для определения расчетной толщины углового шва, принимаемый равным: 1,1 — для однопроводной автоматической сварки; 0,9 — для двух- и трехпроводной автоматической сварки и 0,7 — для ручной сварки.

Моменты сопротивления расчетных сечений сварных швов таврового соединения определяются по зависимостям:

$$W_1 = \frac{2h_{1p}l^2}{6} = \frac{\beta K_1 l^2}{3}; \quad W_2 = \frac{2h_{2p}l^2}{6} = \frac{\beta K_2 l^2}{3}, \quad (4)$$

где K_1, K_2 — катеты швов, рассчитываемые при первом и втором вариантах нагружения; l — длина швов соединения.

С учетом всех выше приведенных формул можно найти составляющие касательных напряжений от всех силовых факторов для точек В и D (рис. 8, в, з)

$$\left. \begin{aligned} \tau_{1M} &= \frac{3P_1 h_1}{\beta K_1 l^2}; \tau_{1N} = \frac{P_1 \cos \alpha}{2\beta K_1 l}; \tau_{1O} = \frac{P_1 \sin \alpha}{2\beta K_1 l}; \\ \tau_{2M} &= \frac{3P_2 h_2}{\beta K_2 l^2}; \tau_{2N} = \frac{P_2 \sin \alpha}{2\beta K_2 l}; \tau_{2O} = \frac{P_2 \cos \alpha}{2\beta K_2 l} \end{aligned} \right\} (5)$$

Тогда результирующие касательные напряжения в наиболее напряженных точках шва *B* для первого варианта нагружения и *D* для второго, будут определяться по формулам:

$$\begin{aligned} \tau_{1\text{рез}} &= \sqrt{(\tau_{1M} + \tau_{1N})^2 + \tau_{1O}^2} = \\ &= \frac{P_1}{\beta K_1 l} \sqrt{\left(\frac{3h_1}{l} + \frac{\cos \alpha}{2}\right)^2 + \frac{\sin^2 \alpha}{4}}, \end{aligned} (6)$$

$$\begin{aligned} \tau_{2\text{рез}} &= \sqrt{(\tau_{2M} + \tau_{2N})^2 + \tau_{2O}^2} = \\ &= \frac{P_2}{\beta K_2 l} \sqrt{\left(\frac{3h_2}{l} + \frac{\sin \alpha}{2}\right)^2 + \frac{\cos^2 \alpha}{4}}. \end{aligned} (7)$$

Учитывая, что вектор результирующих напряжений не перпендикулярен к продольной оси шва, его расчетную толщину и, следовательно, катет шва необходимо увеличить в γ раз, т. е. положить в формулах (6) и (7) вместо K_1 и K_2 $\gamma_1 K_1$ и $\gamma_2 K_2$, где

$$\gamma_1 = \frac{\sqrt{(\tau_{1M} + \tau_{1N})^2 + \tau_{1O}^2}}{(\tau_{1M} + \tau_{1N})} = \frac{\sqrt{\left(\frac{3h_1}{l} + \frac{\cos \alpha}{2}\right)^2 + \frac{\sin^2 \alpha}{4}}}{\frac{3h_1}{l} + \frac{\cos \alpha}{2}}, (8)$$

$$\gamma_2 = \frac{\sqrt{(\tau_{2M} + \tau_{2N})^2 + \tau_{2O}^2}}{\tau_{2M} + \tau_{2N}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{3h_2}{l} + \frac{\sin \alpha}{2}\right)^2 + \frac{\cos^2 \alpha}{4}}}{\frac{3h_2}{l} + \frac{\sin \alpha}{2}}. (9)$$

Подставив (8) и (9) в (6) и (7) после преобразований можно записать условие прочности для обоих вариантов нагружения в таком виде:

$$\tau_{1\text{рез}} = \frac{P_1}{\beta K_1 l} \sqrt{\left(\frac{3h_1}{l} + \frac{\cos \alpha}{2}\right)^2} \leq [\tau']; (10)$$

$$\tau_{2\text{рез}} = \frac{P_2}{\beta K_2 l} \sqrt{\left(\frac{3h_2}{l} + \frac{\sin \alpha}{2}\right)^2} \leq [\tau'], (11)$$

где $[\tau']$ — допускаемые напряжения в шве при срезе.

Из выражений (10) и (11) получим формулы для определения катетов швов:

$$K_1 \geq \frac{P_1}{\beta [\tau'] l} \sqrt{\left(\frac{3h_1}{l} + \frac{\cos \alpha}{2}\right)^2}, (12)$$

$$K_2 \geq \frac{P_2}{\beta [\tau'] l} \sqrt{\left(\frac{3h_2}{l} + \frac{\sin \alpha}{2}\right)^2}. (13)$$

По конструктивным соображениям размеры ребра (в мм) принимаются такими (см. рис. 8): $BD = 550$, $DE = 534$, $BE = 125$, $BF = 330$, $MN = 100$, $FM = 60$, $h_1 = 0,5(DE \pm FM)$, $h_2 = BF - 0,5BE + 0,5MN$. Длина шва $l = BD$. Материал ребер — сталь Ст3. Сварные швы выполняются электродами для ручной дуговой сварки типа Э42; $\beta = 0,7$; $[\tau'] = 0,6[\sigma] = 96$ МПа.

Подставив в формулы (12) и (13) необходимые значения входящих в них величин, получим следующие размеры катетов шва: для первого варианта нагружения (см. рис. 8, а) $K_1 \geq 8,55$ мм; для второго варианта нагружения (см. рис. 8, б) $K_2 \geq 5,62$ мм.

При одновременном действии обеих сил, что теоретически возможно при возврате горячей чаши после кантовки в исходное положение в момент выгрузки шлака $K \geq 14,17$ мм.

С учетом возможного разброса реальных размеров катетов швов, рекомендован технологический размер $K = 15$ мм.

Промышленное опробование чаш со сварными ребрами жесткости подтвердило рациональность предложенного метода снижения термодформаций крупногабаритных литых изделий.

1. Жегур А. А. О питании Т-образных термических узлов при литье по выплавляемым моделям / А. А. Жегур, С. И. Репях // Литейное производство. – 2010. – № 12. – С. 15–19.
2. Артюх В. Г. Нагрузки и перегрузки в металлургических машинах: монография / В. Г. Артюх. – Мариуполь: Изд-во ПГТУ, 2008. – 246 с.
3. Марочник сталей и сплавов: под ред. В. Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 639 с.
4. Горицкий В. М. О причинах трещинообразования в корпусах кислородных конверторов / В. М. Горицкий [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1987. – № 1. – С. 57–60.
5. Лоза А. В. Исследование деформаций в концевых слябах при непрерывной разливке стали / А. В. Лоза, В. В. Чигарев, Д. А. Рассохин, В. В. Шишкин // Известия вузов. Черная металлургия. – 2015. – 58, № 3. – С. 197–202.
6. Николаев Г. А. Сварные конструкции. Расчет и проектирование: учебник / Г. А. Николаев, В. А. Винокуров. – М.: Высшая школа, 1990. – 446 с.
7. Серенко А. Н. Расчет сварных соединений и конструкций. Примеры и задачи / А. Н. Серенко, М. Н. Крумбольдт, К. В. Багрянский. – Киев: Вища школа, 1977. – 336 с.

Поступила в редакцию 29.01.2016