

УДК 669.14

д.т.н. Еронько С. П.,
к.т.н. Ткачёв М. Ю.,
Пономарёва Е. А.,
Цыхмистро Е. С.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕМЫЧКИ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ НА ВХОДЕ В КАНАЛ КОВШОВОГО ЗАТВОРА

Предложена математическая модель реализации режима нагружения перемычки сферической формы, образующейся на поверхности стартовой смеси, которой заполнен канал огнеупорного стакана в сталеразливочном ковше. Корректность предложенной модели проверена в экспериментальных условиях при помощи лабораторного стенда для испытания прочностных характеристик элементов, имитирующих перемычку. Полученная информация может быть использована как научная база для проектирования устройств, обеспечивающих гарантированное начало разливки из ковшей, которые оборудованы шибберными системами.

Ключевые слова: сталеразливочный ковш, шибберный затвор, стакан-коллектор, стартовая смесь, перемычка, разливка стали.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Использование шибберных затворов для регулируемого слива жидкой стали из разливочного ковша, как известно, предполагает во время его подготовки к приему металла очередной плавки заполнение канала ковшового стакана так называемой стартовой смесью — мелкодисперсным материалом, который не должен спекаться при температуре 1600...1650 °С, смачиваться расплавом и уплотняться под действием ферростатического давления [1]. Благодаря указанным свойствам данная смесь при первом открытии шибберного затвора в момент совмещения отверстий его огнеупорных плит должна высыпаться из сталевыпускного канала ковша для начала беспрепятственного истечения жидкого металла. Однако на практике по ряду причин не удается достичь 100%-ой вероятности начала разливки в штатном режиме из-за наличия над входным отверстием канала ковшового стакана перемычки, образующейся из слоев спекшейся смеси или затвердевшей стали и способной выдерживать действующую на нее силу тяжести столба расплава высотой до 5 м.

В этом случае прибегают к прожиганию перемычки кислородом, подаваемым по изогнутой металлической трубке, вводимой снизу через канал стакана-коллектора. Использование с этой целью кислорода влечет за собой нарушение целостности поверхности стенок выпускного канала и образование значительного количества оксидных включений, что в конечном итоге способствует ухудшению условий организации струи, истекающей из ковша стали, и загрязнению ее нежелательными примесями. Поэтому одним из направлений исследований, связанных с повышением эффективности функционирования шибберных затворов разливочных и литейных ковшей, является поиск новых технологических решений, которые позволили бы избежать появления твердой корочки в верхнем слое стартовой смеси, находящейся в канале разливочного стакана, или минимизировать дополнительные издержки, обусловленные применением специальных устройств и приспособлений, разрушающих имеющуюся перемычку одновременно с открыванием ковшового затвора [2].

Постановка задачи. Результаты анализа информации, опубликованной за последнее десятилетие в технической литературе, а также описаний изобретений, запатентованных в ряде промышленно развитых стран [3–7], позволили выявить три основных пути обеспечения начала разлива стали без промывания кислородом канала сталеразливочного ковша:

- за счет подбора новых составов стартовых смесей с ингредиентами, препятствующими их спеканию при контакте с жидкой сталью;

- благодаря формированию с помощью специальных приспособлений на свободной поверхности сыпучего материала в зоне размещения разливочного узла ковша лунок или углублений, профиль которых обеспечивает снижение несущей способности образующейся перемычки;

- посредством размещения в канале стакана-коллектора специальных пружинных катапульт, срабатывающих после полного открывания затвора и выталкивающих вверх металлические стержни, оказывающие динамическое силовое воздействие на образовавшуюся перемычку.

Существенное многообразие предлагаемых решений отмеченной проблемы можно объяснить отсутствием информации о реальных условиях протекания гидродинамических, тепловых и других процессов в зоне расположения огнеупорного гнездового блока разливочной системы ковша. В связи с этим при разработке мероприятий, призванных обеспечить беспрепятственное истечение жидкой стали после высыпания из канала затвора стартовой смеси, исследователи исходили из гипотетических предположений о прочности перемычки. Это связано с отсутствием по известным причинам возможности визуального наблюдения за поведением верхнего слоя сыпучего материала, подвергающегося воздействию падающей с высоты нескольких метров струи металла, из-за чего нельзя установить истинные форму и размеры образовавшейся короч-

ки, а также картину ее разрушения на отдельные фрагменты в случае наносимого снизу удара металлическим элементом, выбрасываемым вверх вдоль канала ковшевого стакана пружинной катапульты. Кроме того, части разбиваемой перемычки уносятся потоком металла, т. е. не могут быть отобранными для последующего контроля толщины образовавшегося твердого слоя и его прочностных характеристик. Данные обстоятельства побуждают к комплексному использованию методов математического и физического моделирования для качественной и количественной оценок значения параметров исследуемого процесса.

Изложение материала и его результаты. При разработке математической модели исходили из того, что перемычка, образующаяся над входным отверстием канала ковшевого стакана, представляет собой в первом приближении осесимметричную оболочку в виде полусферы (рис. 1). Нагрузкой на нее является равномерно распределенное давление жидкой стали, нормальное к поверхности. При этом толщина оболочки δ настолько мала, что она не может воспринимать изгибающие напряжения и практически не работает на сжатие из-за потери устойчивости. В этом случае в теле корочки могут возникать только растягивающие напряжения в кольцевом σ_t и меридиональном σ_m направлениях [8].

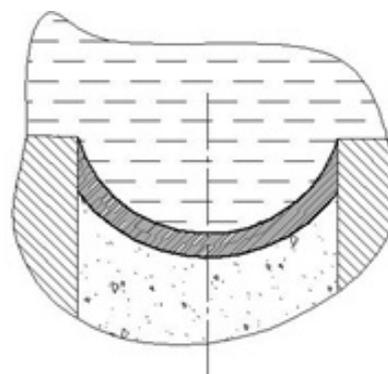


Рисунок 1 Форма образующейся перемычки на входе в сталевыпускной канал ковша

Рассмотрим находящийся в равновесии малый элемент оболочки, вырезанный бесконечно близкими меридиональными и кольцевыми сечениями. На данный элемент (рис. 2) действуют растягивающие силы в кольцевом направлении

$$F_t = \sigma_t \delta R_m d\varphi,$$

в меридиональном направлении

$$F_m = \sigma_m \delta R_t d\beta,$$

а также нормальная сила

$$F_n = PR_m d\varphi R_t d\beta.$$

Проецируя отмеченные силы на нормаль к выделенную элементу, получим

$$-PR_m d\varphi R_t d\beta = 0.$$

Так как оболочка имеет форму полусферы с радиусом R_c , принимаем

$$R_m = R_t = R_c.$$

Тогда

$$2\sigma_t \delta R_c d\varphi \cdot \sin \frac{d\beta}{2} + 2\sigma_m \delta R_c d\beta \cdot \sin \frac{d\varphi}{2} = PR_c^2 d\varphi d\beta.$$

Заменяя синусы углами, получим

$$2\sigma_t \delta R_c d\varphi d\beta + 2\sigma_m \delta R_c d\beta d\varphi = PR_c^2 d\varphi d\beta$$

или

$$\frac{\sigma_t}{R_c} + \frac{\sigma_m}{R_c} = \frac{P}{\delta}.$$

Для сферы $\sigma_t = \sigma_m = \sigma$, поэтому

$$\frac{\sigma}{R_c} + \frac{\sigma}{R_c} = \frac{P}{\delta}$$

или

$$\sigma = \frac{PR_c}{2\delta}. \quad (1)$$

Здесь P — статическое давление жидкой стали в разливочном ковше в зоне размещения его стакана

$$P = \rho_c g H_c,$$

где ρ_c — плотность жидкой стали, равная 7000 кг/м^3 ;

g — ускорение силы тяжести, $9,8 \text{ м/с}^2$;

H_c — высота столба жидкого металла над ковшовым стаканом, м.

Задаваясь значениями σ для стали при температуре начала ее кристаллизации, а также ферростатического давления P и радиуса канала ковшового стакана R_c , по формуле (1) рассчитали минимальные толщины перемычек, при которых начало разливки не может пройти в штатном режиме (данные табл. 1).

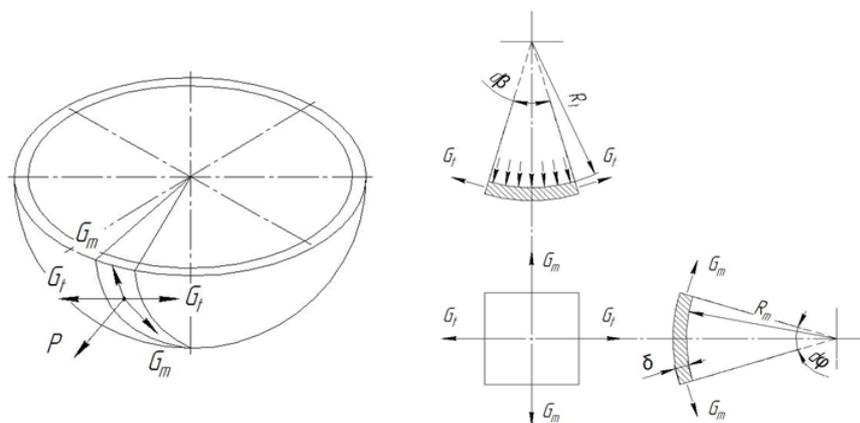


Рисунок 2 Схема для определения напряжений в теле оболочки

Таблица 1

Расчетные значения минимальной толщины корочки, выдерживающей давление столба стали при открытии затвора сталеразливочного ковша

Вместимость ковша, т	Высота столба металла в ковше, м	Ферростатическое давление, МПа	Радиус канала ковшового стакана, мм	Толщина перемычки на входе в канал ковшового стакана при различной прочности ее материала, мм		
				$\sigma=20$ МПа	$\sigma=30$ МПа	$\sigma=40$ МПа
100	3,0	0,21	25	0,13	0,09	0,07
150	3,5	0,25	30	0,19	0,13	0,09
200	4,0	0,29	35	0,25	0,17	0,13
250	4,5	0,32	40	0,32	0,21	0,16
300	5,0	0,36	45	0,41	0,27	0,20

Экспериментальную проверку корректности результатов расчета провели с использованием ранее предложенной методики, подробно описанной в работе [9]. Для решения поставленной задачи спроектировали и изготовили лабораторный стенд, схематично показанный на рисунке 3. Он включает опорную рамку 1 с вертикально установленным на ней огнеупорным разливочным стаканом 10. На верхнюю торцевую поверхность этого стакана опирается цилиндрический кессон 4, прижимаемый к стакану крышкой 6, имеющей форму диска, и посредством четырех шпилек 2 с гайками 5, связанной с опорной рамкой 1. В полости кессона над входным отверстием канала разливочного стакана на его верхней торцевой поверхности с обеспечением герметичности можно уста-

навливать имитаторы перемычки 3, имеющие различную форму и толщину. В центральное резьбовое отверстие крышки 6 вкручен тройник для подключения манометра 7 и трубки 8, подающей в полость кессона воздух от компрессора 9.

В качестве материала для изготовления имитаторов перемычки было решено использовать свинец, который в твердом состоянии обладает такими же реологическими свойствами, как и сталь сразу же после образования кристаллической структуры, т. е. при температуре ниже равновесной [10], что соответствует условиям появления твердой металлической перемычки над поверхностным слоем стартовой смеси во время заполнения жидким металлом разливочного ковша.

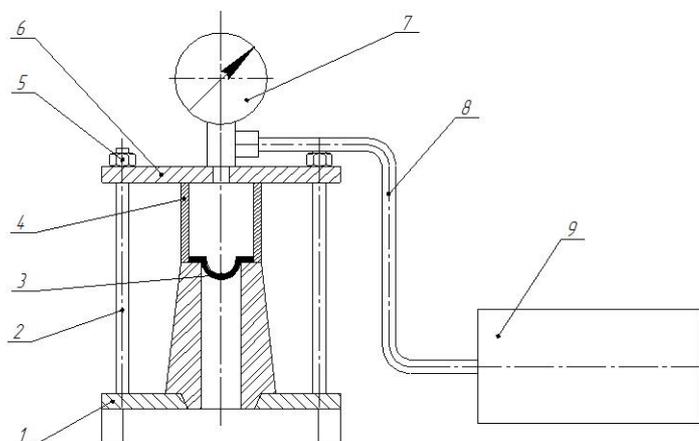


Рисунок 3 Схема лабораторного стенда

Форма, наружный диаметр и толщина имитаторов перемычек должны выбираться с учетом того, что комбинации указанных геометрических характеристик в реальных условиях могут быть различными из-за действия таких факторов, как вместимость разливочного ковша, температура и скорость циркуляции жидкой стали в зоне расположения его выпускного канала. Поэтому методом литья изготовлен комплект свинцовых перемычек вогнутой формы (рис. 4) с толщиной стенок сферических частей 0,5, 1 и 1,5 мм для стаканов с диаметром канала 60, 70 и 80 мм. Пробные опыты на изготовленном стенде (рис. 5) провели по следующей методике.

На верхнюю торцевую часть разливочного стакана наносили тонкий слой специального пластического материала, обеспечивающего герметичное прилегание к ней размещаемого сверху имитатора перемычки. После этого на стакан устанавливали кессон, который прижимали к огнеупору посредством трех шпилек, затягивая на их верхних резьбовых концах гайки. Затем, подключив к тройнику связанный с компрессором гибкий шланг, предварительно проверяли собранную систему на герметичность. Для этого осуществляли пробный пуск компрессора и после создания в кессоне избыточного давления воздуха порядка 0,01 МПа выключали его. Неподвижное состояние стрелки манометра свидетельствовало о наличии герметичности, в противном случае по слышимому характерному свисту воздуха устанавливали место его выхода из кессона в окружающее пространство и устраняли обнаруженную неплотность. Затем повторно запускали компрессор и фиксировали по положению стрелки манометра значение давления, при достижении которого она резко возвращалась в исходное (начальное) положение, что свидетельствовало о разрушении имитатора перемычки.

По окончании каждого опыта стенд разбирали для извлечения испытанного образца и изучения характера его разру-

шения. В качестве примера на рисунке 6 показана вогнутая перемычка диаметром 80 мм с остаточными повреждениями, наступившими при воздействии на нее избыточного давления, соответствующего условиям начала разлива стали из 250-тонного ковша.



Рисунок 4 Внешний вид свинцовой перемычки



Рисунок 5 Подготовленный к проведению эксперимента лабораторный стенд



Рисунок 6 Характер разрушения свинцового имитатора перемычки толщиной 0,5 мм под действием избыточного давления, эквивалентного давлению столба жидкой стали высотой 5 м

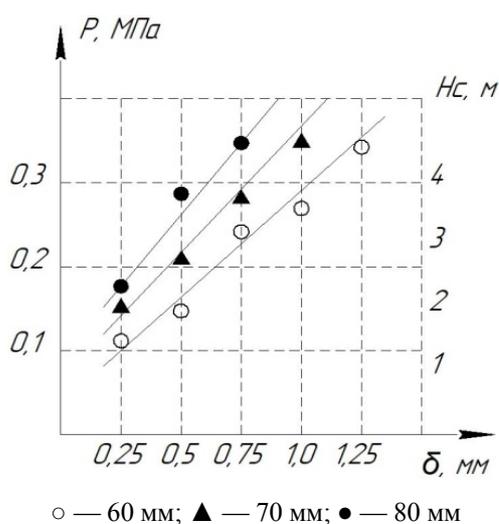


Рисунок 7 Зависимость давления, вызывающего разрушение свинцовой перемычки, от ее толщины при различном диаметре канала ковшевого стакана

После завершения всего запланированного комплекса лабораторных опытов при различных возможных комбинациях диаметров каналов ковшевых стаканов и гео-

метрических параметров имитаторов перемычек в результате обработки полученных данных построили графики зависимостей (рис. 7), позволяющих установить для конкретных условий разливки значение толщины образующейся металлической корки, при которой потребуется ее разрушение внешним силовым воздействием.

Выводы и направление дальнейших исследований. Полученные расчетные и экспериментальные данные о прочностных характеристиках имитатора корки, образующейся на входе в сталевыпускной канал разливочного ковша во время слива в него жидкого металла из печи или кислородного конвертера, послужат в качестве исходной информации при проектировании специальных устройств, обеспечивающих возможность начала разливки в штатном режиме при первом открывании ковшевого шиберного затвора.

Библиографический список

1. Пилюшенко, В. Л. Бесстопорная разливка стали [Текст] / В. Л. Пилюшенко, С. П. Еронько, В. Н. Шестопалов. — К. : Техніка, 1991. — 179 с.
2. Еронько, С. П. Разливка стали: Оборудование. Технология [Текст] / С. П. Еронько, С. В. Быковских. — К. : Техніка, 2003. — 216 с.
3. Земляной, К. Г. Стартовые смеси нового поколения [Текст] / К. Г. Земляной, А. А. Куровский // Новые огнеупоры. — 2008. — № 1. — С. 23–24.
4. Thermal insulating materials for sliding gate valves of ladles and tundishes [Text] / S. A. Suvorov [et al.] // Металлург. — 2001. — № 3. — С. 44–45.
5. Brevet 2467651 (7926505) France, IPC B23K7/00, B22D41/10. Dispositif pour déboucher l'orifice de coulée d'un récipient métallurgique [Texte] / J. Ch. Daussan, G. Daussan, A. Daussan. — Date de dépôt 25.10.1979 ; publié 30.04.1981, Bul. № 18.
6. Pat. 5167902 USA, IPC B22D41/22. Device for piercing an obstruction in a well-block opening of a ladle for transporting molten steel [Text] / W. A. McCray, M. D. Cope, T. J. Connors, A. Csaszar. — Filed 19.07.1991 ; published 01.12.1992.
7. Pat. 102005010842 Bundesrepublik Deutschland, IPC B22D41/46, B22D41/44. Katapult zum Öffnen des Kanals einer Stahlgießpfanne [Text] / B. D. Jacob. — Anmeldetag 07.03.2005 ; offenlegungstag 14.09.2006.
8. Шевченко, Ф. Л. Механика упругих деформируемых систем [Текст] Ч. 1. Напряженно-деформированное состояние стержней / Ф. Л. Шевченко. — К. : ИСИО, 1993. — 280 с.
9. Стенд для прочностных испытаний имитаторов перемычек, блокирующих выпускной канал ковша в начале разливки [Текст] / С. П. Еронько [и др.] // Инновационные перспективы Донбасса : сб. тр. 5-й Межд. научн-практ. конф. в 6 томах. Т. 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. — 2019. — С. 40–47.

10. Выдрин, В. Н. О реологических свойствах стали и свинца [Текст] / В. Н. Выдрин, Л. М. Агеев // Известия Академии наук СССР. Металлургия. — 1967. — № 2. — С. 104–106.

© Еронько С. П.
© Ткачёв М. Ю.
© Пономарёва Е. А.
© Цыхмистро Е. С.

*Рекомендована к печати к.т.н., проф., зав. каф. МЧМ ДонГТИ Куберским С. В.,
д.т.н, проф. каф. ОПМ ДонНТУ Ченцовым Н. А.*

Статья поступила в редакцию 16.11.2020.

**Doctor of Technical Sciences Yeronko S. P., PhD in Engineering Tkachyov M. Yu.,
Ponomaryova Ye. A., Tsykhmistro Ye. S. (DonNTU, Donetsk, DPR)**

**THEORETICAL AND MODEL EXAMINATION OF STRENGTH PARAMETERS OF
JUMPER BAR FORMED AT ENTRANCE TO A LADLE GATE CHANNEL**

A mathematical model of implementing the loading mode of ball shaped jumper bar formed on the surface of filler sand that fill nozzle channel in pouring ladle, is proposed. The accuracy of the proposed model was verified in experimental conditions using a laboratory bench for testing the strength characteristics of elements that simulate a jumper bar. The obtained information can be used as a scientific basis for designing devices that ensure the guaranteed beginning of casting from ladles fitted with slide systems.

Key words: casting ladle, slide gate, nozzle-collector, filler sand, jumper bar, steel teeming.