

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-130-139

Понамарева Е.А.

Институт физики горных процессов

E-mail: ponamary.ifgp@mail.ru

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ПРОВЕРКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МОДЕЛИ КАТАПУЛЬТЫ ДЛЯ ОТКРЫТИЯ КОВШОВОГО ЗАТВОРА

Аннотация. Описана актуальная проблема обеспечения гарантированного начала разливки стали в условиях образования препятствия на входе в сталевыпускной канал огнеупорного комплекта ковшового шиберного затвора. Подобное явление возможно при смачивании и спекании поверхностных слоев стартовой смеси, которой заполнена полость сталевыпускного канала перекрытого затвора, жидким металлом в процессе заполнения металлургического ковша. Рассмотрены пути предотвращения возникновения подобного препятствия и его разрушение посредством специальных механизмов. В результате подробного анализа таких устройств предложена усовершенствованная конструкция катапульты для открытия ковшового затвора, преимуществом которой становится возможность размещения на затворе совместно с тепловым экраном, защищающим разливочное оборудование от теплового излучения и брызг металла при разливке стали. Приведено описание ключевых узлов и принципа срабатывания усовершенствованной модели катапульты, оговорены базовые требования относительно ее органичного встраивания в систему ковшового затвора. Работоспособность предложенной катапульты проверена путем проведения лабораторного эксперимента, для чего была изготовлена физическая модель, подобная натурному объекту. В ходе эксперимента реализованы сценарии с разрушением твердой спекшейся корки в пластичном и хрупком состояниях, что стало возможным за счет использования имитаторов переключки из различных материалов. Результаты экспериментальных исследований подтвердили эффективность применения усовершенствованной катапульты для разрушения препятствия на входе в сталевыпускной канал.

Ключевые слова: металлургический ковш, разливка стали, шиберный затвор, стартовая смесь, катапульта, физическая модель.

Введение. Проект развития металлургической отрасли Российской Федерации на период вплоть до 2030 года в качестве одной из ключевых стратегий определяет актуализацию требований к используемому оборудованию с учетом современных требований в области безопасности. Такой подход неразрывно связан с увеличением степени автоматизации основных технологических процессов, комплексным повышением эффективности применения технологического и вспомогательного оборудования, а также поэтапным уменьшением доли ручного труда на всех стадиях реализации производственных процессов.

Сегодня в качестве разливочных устройств металлургических ковшей на машинах непрерывной разливки стали повсеместно применяют шиберные затворы, которыми в конце 70-х годов прошлого века заменили стопорные устройства [1, 2]. За прошедшие 50 лет шиберные системы постоянно совершенствовались, что отразилось в поэтапной смене их трех поколений. Последнее из них объединяет ковшовые затворы кассетного типа, обладающие высокими рабочими характеристиками с кратностью использования комплекта огнеупорных изделий от 3 до 8 разливок.

Применение шиберных систем при разливке сталей на МНЛЗ по-прежнему демонстрирует наибольшие перспективы, и потому технической эволюции этого оборудования в общей картине совершенствования предприятий черной металлургии следует уделить максимум внимания.

Несмотря на то, что ведущим зарубежным фирмам удалось добиться значительных успехов в разработке высокоэффективных шиберных скользящих затворов, при их эксплуатации производственники по-прежнему довольно часто сталкиваются с проблемой обеспечения гарантированного начала разливки в штатном режиме. В процессе подготовки металлургического ковша к приему расплава полость сталевыпускного канала в комплекте огнеупоров затвора заполняют специальной стартовой смесью, представляющей собой огнеупорный порошок, устойчивый к смачиванию со стороны жидкой стали и спеканию под действием температуры около 1600–1650°C [3, 4]. При открытии затвора стартовая смесь должна свободно высыпаться, освобождая полость сталевыпускного канала для истечения стали.

Однако в ряде случаев, особенно, если процедура хранения и подготовки стартовой смеси была реализована с нарушениями технического

регламента, а смесь была переувлажнена и недостаточно просушена перед использованием, в зоне контакта поверхностных слоев порошка с жидким металлом образуется тонкая корка, представляющая собой результат одновременного смачивания и спекания, дополнительно уплотненная ввиду воздействия высокого ферростатического давления со стороны расплава в полости ковша [5, 6]. Подобная перемычка способна выдерживать действующее на нее усилие со стороны столба расплава и препятствовать свободному истечению металла при открытии ковшового затвора. Это явление в том числе наблюдается при разливке стали с повышенным содержанием марганца и алюминия [7, 8]. Также известны исследования, связывающие увеличение частоты спекания стартовой смеси в корку с присутствием хрома [9]. Таким образом, можно сделать вывод, что проблема образования непроницаемой перемычки на входе в сталевыпускной канал разливочного устройства актуальна при разливке легированных, особо ценных марок сталей.

Чтобы оперативно ликвидировать подобное препятствие, в полость огнеупоров вводят изогнутую металлическую трубку, через которую напрямую к корке подают кислород, фактически прожигая спекшуюся корку. Подобная операция реализуется вручную, силами рабочего, контролирующего процесс открытия шиберного затвора и начала разливки непосредственно на МНЛЗ в зоне размещения разливочного оборудования. Необходимость прожигания такой перемычки влечет за собой не только дополнительные потери по времени, но и представляет очевидную опасность для рабочего. Кроме того, вместе с уничтожением корки кислород повреждает и поверхность огнеупоров, что сказывается на кратности их использования в дальнейшем.

В настоящее время в металлургии используют различные способы обеспечения начала разливки с учетом возможного риска образования спекшейся корки на поверхности стартовой смеси, которая будет препятствовать истечению стали. Множество прикладных научных исследований посвящено разработке специальных стартовых смесей, подобранных в соответствии с химсоставом разливаемой стали, в составе которых присутствуют дополнительные ингредиенты, препятствующие спеканию порошка при контакте с расплавом [10-13]. Такой подход придерживается стратегии строгой индивидуализации применения стартовых смесей в соответствии с особенностями разливки различных марок сталей, что в существенной степени усложняет процедуру подготовки металлургических ковшей. Также известен российский патент [14],

предлагающий засыпку полости сталевыпускного канала в огнеупорах стартовой смесью поверх слоя силикагеля, который выступает в этом случае адсорбентом, устраняющим влагу из стартовой смеси и тем самым снижающим риск ее спекания при заполнении ковша металлом.

Более универсальным способом, при котором отсутствует какой-либо учет особенностей разливаемой стали или самой стартовой смеси, становится размещение в сталевыпускном канале специальных механизмов, срабатывающих после полного открытия затвора и способных разрушить спекшееся препятствие направлением к нему с определенным усилием некоего ударного элемента. Применение подобных устройств следует признать наиболее перспективным и экономически выгодным, поскольку эффективность их действия зависит лишь от собственных силовых характеристик, без учета дополнительных факторов.

Как показал анализ результатов патентного поиска, в настоящее время имеются патенты на конструктивные схемы пружинных катапульти, заявленных за рубежом для использования в составе шиберных затворов, которыми оборудованы сталеразливочные и промежуточные ковши МНЛЗ. Для подготовки нового технического решения следует рассмотреть модели, получившие промышленное применение, определить их достоинства и недостатки, а также дать заключение по повторяющимся уязвимостям, которые необходимо исключить в конструкции усовершенствованного устройства, обеспечивающего открытие шиберного затвора.

На рисунке 1 показана схема применения катапульти, защищенной патентом США [15]. Она предполагает установку в полости стакана-коллектора металлической капсулы с откидной крышкой, при этом шиберный затвор находится в перекрытом состоянии, а упомянутая откидная крышка зафиксирована упором в верхнюю поверхность огнеупорной плиты. Положение капсулы внутри сталевыпускного канала определяется упором в стенки за счет трех лепестков.

Процесс открытия затвора подразумевает сдвиг нижнего комплекта огнеупоров до полного совмещения осей отверстий, совместно образующих сталевыпускной канал. При этом поверхность огнеупорной плиты перестает фиксировать подпружиненную откидную крышку, и та уходит в сторону, освобождая пространство для выброса вверх ударного элемента, движение которого определено силой пружины сжатия под ним. Перемещаясь по сталевыпускному каналу, ударный элемент разрушает спекшуюся на поверхности стартовой смеси корку. Далее жидкая сталь

устремляется по сталевыпускному каналу, разрушая движением потока возможные остатки перемычки. Вместе с тем происходит расплавление

распорных лепестков, и капсула, вытесненная потоком металла, попадает в полость промежуточного ковша, где впоследствии расплавится.

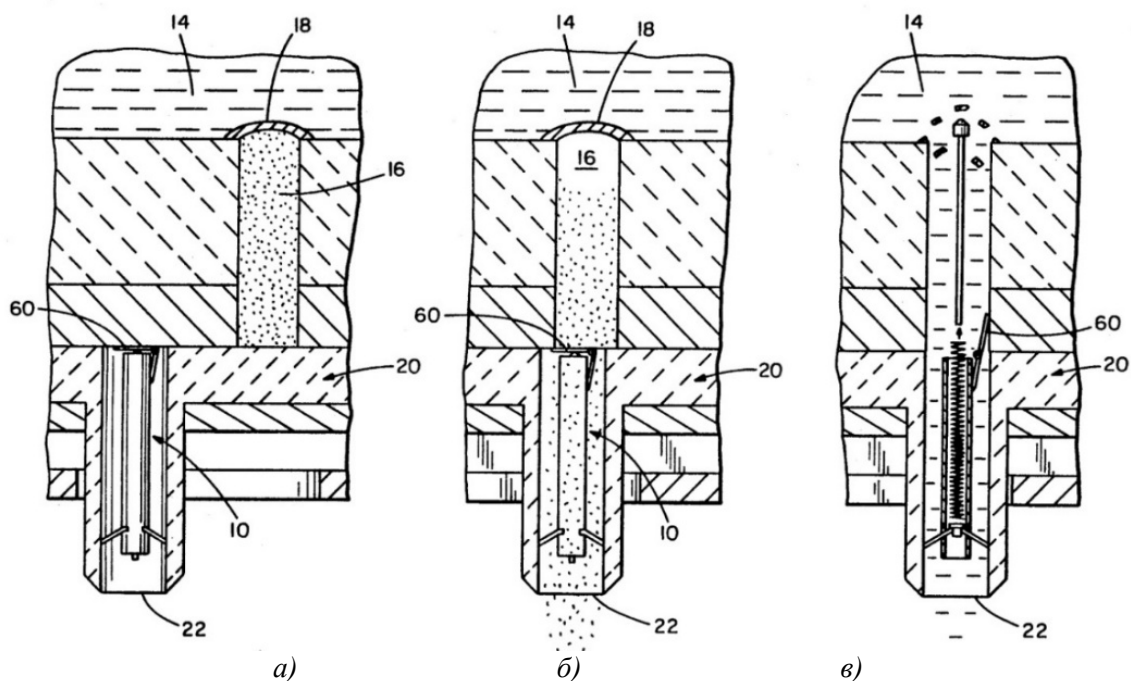


Рис. 1 Устройство для разрушения твердой корки на входе в сталевыпускной канал разливочного ковша: а) при закрытом затворе; б) в процессе сдвига шибберных плит; в) при открытии ковшового затвора

Недостатками приведенного устройства следует назвать значительную трудоемкость изготовления – в состав изделия входят 15 элементов, подготовка которых подразумевает целый комплекс операций механической и термической обработки до достижения требуемых свойств и обеспечения нужных функциональных характеристик. Разовое использование изделия с гарантированным разрушением в ходе каждой разливки влечет за собой повышенные эксплуатационные затраты на реализацию подобного технического решения.

Известно также катапультное устройство, конструкция и принцип действия которого описаны немецким патентом [16], представленное на рисунке 2. Сравнивая его с предыдущей системой механического разрушения спекшейся корки посредством выброса ударного стержня из закрытой металлической капсулы, следует назвать этот вариант катапульты куда более конструктивно простым, состоящим из меньшего количества элементов. Однако использование подобного изделия предусматривает наличие дополнительного металлического кольца-основания, которое размещают между стаканом-коллектором и погружным стаканом. Подобное условие выдвигает дополнительные требования к конструкции используемых в комплекте огнеупоров, при этом применение катапульты в отношении разливки

без погружного стакана становится фактически невозможным.

Установленная в канале пружина охватывает, удерживает в заданном положении и поджимает ударный стержень с упором в поверхность верхней огнеупорной плиты. При совмещении отверстий сталевыпускного канала в момент открытия затвора стержень также теряет свой упор и направляется вверх, пробивая возможное препятствие за счет сообщенной ему ранее пружиной некоторой силовой нагрузки. Указанное устройство также является одноразовым в использовании, поскольку свободное истечение жидкой стали по каналу после разрушения корки вытолкнет установленные в нем элементы системы, которые позже будут уничтожены расплавом.

Исходя из приведенного выше, можно утверждать, что известные системы катапульт для открытия канала сталеразливочного ковша зарубежного исполнения имеют сложную конструкцию и высокую стоимость изготовления, что с учетом одноразового использования и полного разрушения в ходе каждой разливки влечет за собой повышенные расходы, связанные с их эксплуатацией в составе разливочного оборудования.

На рисунке 3 представлена катапульта отечественного производства, защищенная патен-

том Российской Федерации [17]. Значимым конструктивным отличием от зарубежных аналогов является вынос пружинных элементов устройства за пределы полости сталевыпускного канала, в котором остается лишь непосредственно ударный элемент – стержень, осуществляющий разрушение перемычки на входе в ковшовый ста-

кан. Вместо витых пружин сжатия предусмотрены две плоские пружины, обеспечивающие необходимую силовую поддержку стержня, а при совмещении отверстий в огнеупорных плитах и открытии затвора – соответственно, направление ударного элемента вертикально вверх по каналу с последующим разрушением перемычки.

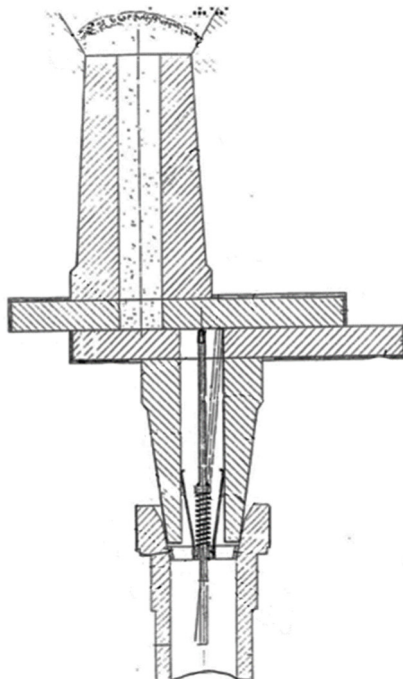


Рис. 2. Катапульта, предназначенная для разрушения твердой корки на стартовой смеси при разливке с погружным стаканом

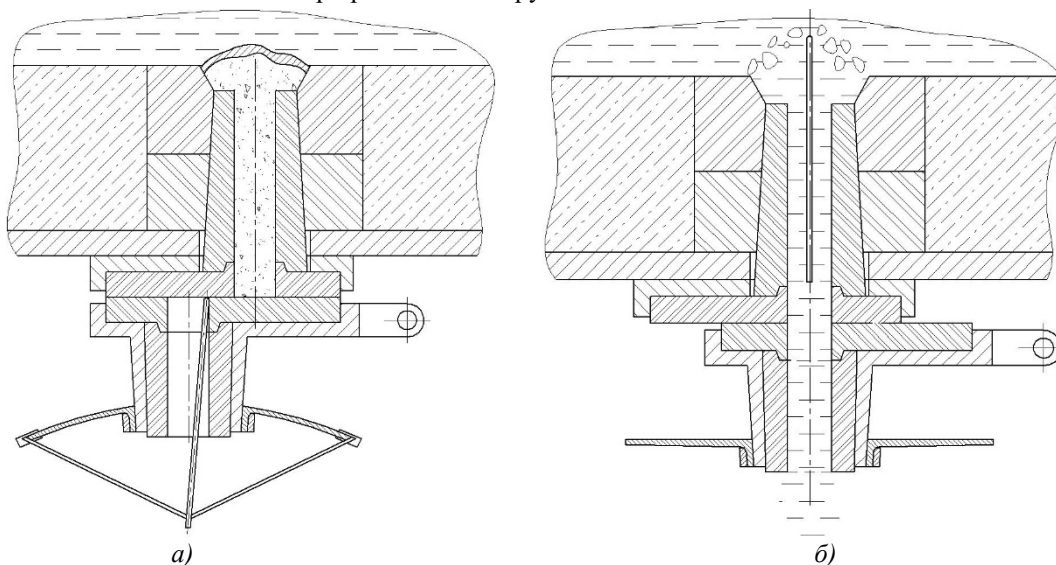


Рис. 3 Отечественная катапульта для разрушения твердой корки:
а) при перекрытом затворе; б) в момент открытия затвора и разрушения перемычки

Основным преимуществом данного технического решения стало существенное сокращение эксплуатационных затрат, связанных с использованием катапульты. Так расходная часть ограничена лишь ударным стержнем-стрелой, который после разрушения препятствия устремляется в полость промежуточного ковша, увлекаемый потоком металла. Все остальные элементы

устройства могут быть использованы неоднократно, их период эксплуатации ограничен лишь показателем заложенного ресурса. Эффективность применения подобной катапульты была проверена в ходе лабораторного эксперимента на физической модели [18].

Однако упомянутое устройство также не лишено недостатков. Установка такой навесной катапульты предполагает отсутствие на ковшовом затворе специального теплового экрана, предназначенного для защиты разливочной системы от негативного воздействия теплового излучения со стороны зеркала жидкого металла и его брызг в процессе разливки. Указанные факторы в существенной мере сокращают ресурс отдельных элементов как самого шиберного затвора, так и катапульты, за счет избыточного и достаточно продолжительного нагрева с многократными повторами. В частности, особенно уязвимыми будет пара плоских пружин, выполненных из рессорно-пружинной стали и подвергнутых закалке, тогда как под повторяющимся продолжительным нагревом можно ожидать повторный отпуск и, как следствие, потерю упругих характеристик. Попадание же капель металла на поверхность деталей может потребовать в дальнейшем дополнительной слесарной операции по их очистке.

Исходя из этого, закономерным развитием концепции применения пружинной ударной катапульты в составе ковшового затвора для обеспечения гарантированного начала разливки в штатном режиме должен стать поиск таких конструктивных схем, для которых не потребуются удаление из состава разливочного устройства защитного экрана.

Материалы и методы. Целью данного исследования стала разработка усовершенствованной версии пружинной катапульты для разрушения твердой корки на входе в сталевыпускной канал ковшового затвора. Для ее достижения использовались такие методы исследования, как системный анализ, синтез технических систем, физическое моделирование и лабораторный эксперимент. При проработке различных вариантов

ориентировались на ряд технологических требований:

- обеспечить возможность совместной установки на шиберный затвор как самого навесного устройства, так и теплового защитного экрана;
- сохранить ключевой принцип размещения в полости сталевыпускного отверстия только ударного стержня, с выводом всех остальных элементов за пределы огнеупорного комплекта;
- сохранить требуемые силовые характеристики навесного устройства, обеспечивающие поддержку и направление ударного стержня;
- предусмотреть минимальное конструктивное вмешательство в исходный формат корпусных частей ковшового затвора ради установки навесного устройства.

Итогом исследования должна стать усовершенствованная конструкция пружинной катапульты, чья работоспособность и эффективность проверены в ходе лабораторного эксперимента.

Основная часть. Первичный анализ конструкции отечественной катапульты показал, что главным фактором, ограничивающим совместное применение данного навесного устройства с защитным тепловым экраном, становится широкий разлет плоских пружин, соединенных с тетивой, поддерживающей ударный стержень. Замена плоских пружин на любые иные парные силовые компоненты, за счет собственной упругости способные обеспечить требуемое натяжение тетивы, также приводила к появлению указанного недостатка. В итоге было принято решение использовать схему с одинарным силовым компонентом, размещенным соосно стакану-коллектору, под выступ которого в защитном тепловом экране уже присутствует сквозное отверстие. Состав подобного устройства показан на рисунке 4.

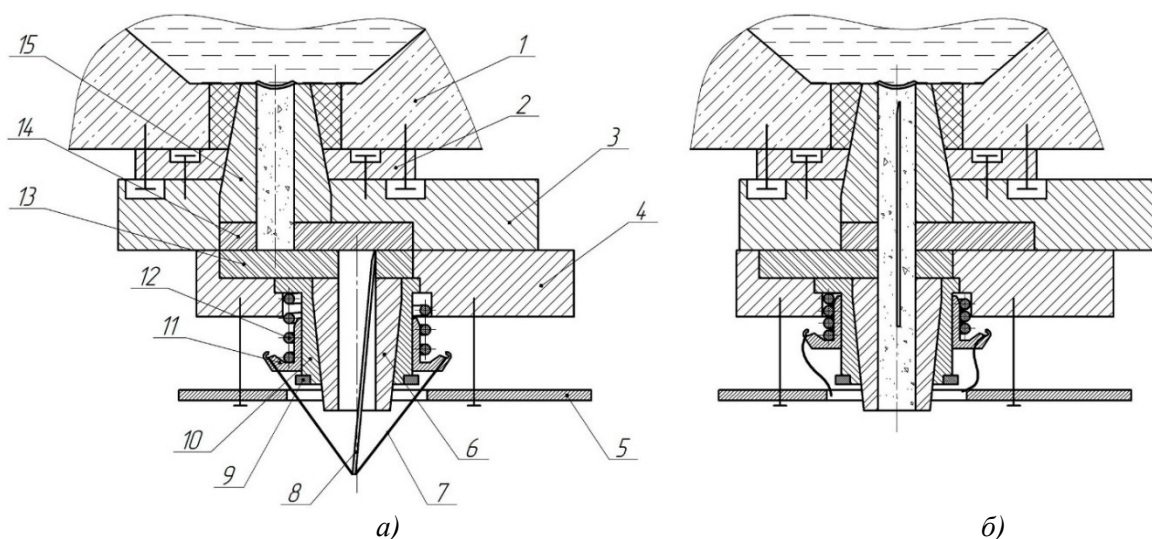


Рис. 4. Состав усовершенствованной катапульты:

а) катапульта во взведенном состоянии; б) срабатывание катапульты после совмещения отверстий в огнеупорных шиберных плитах

При разработке конструкции усовершенствованной катапульты учитывали то, что у всех современных ковшовых затворов удержание огнеупорного стакана-коллектора в заданном положении осуществляется посредством использования байонетной гнездовой втулки. Такое исполнение втулки позволяет в существенной степени упростить процедуру замены стакана-коллектора при замене огнеупорных шибберных плит во время вывода сталеразливочного ковша с затвором для обслуживания на стенде. В затворах, лишенных байонетного соединения, гнездовая втулка закрепляется относительно иных корпусных частей жестко (зачастую – с фиксацией накладными кольцами или аналогичными элементами на нескольких винтах), и ее съем возможен только в процессе полной разборки шибберного затвора.

Показанный на рис. 4 ковшовый шибберный затвор состоит из базовой платформы 2, зафиксированной на днище сталеразливочного ковша 1, неподвижного корпуса 3 и подвижной тележки 4. Внутри неподвижного корпуса 3 установлены верхняя огнеупорная плита 14 и ковшовый огнеупорный стакан 15, полости которых заполнены стартовой смесью. В подвижной тележке 4 размещена нижняя огнеупорная плита 13 и закреплена байонетная гнездовая втулка 10, удерживающая огнеупорный стакан-коллектор 6. Весь затвор в сборе защищен от теплового излучения и брызг стали металлическим экраном 5.

На байонетной втулке 10 установлена гильза 11, свободный ход которой подразумевает скольжение по поверхности байонетной втулки. Зазор

между ними заполнен высокотемпературной графитовой смазкой. Снизу перемещение гильзы 11 ограничено гайкой 9.

На гильзе 11 размещена пружина растяжения 12, верхний виток которой зафиксирован относительно тела байонетной втулки 10, а нижний – относительно тела гильзы 11 с тем расчетом, чтобы при упругой деформации пружины 12 гильза 11 скользила по цилиндрической поверхности.

Нижняя часть подвижной гильзы 11 оснащена двумя симметрично расположенными крючками. Они служат зацепами для удержания струны 7, которая, в свою очередь, реализует поддержку металлического ударного стержня 8, размещенного в сталевыпускном канале стакана-коллектора. Сборку всей системы осуществляют, когда шибберный затвор находится в перекрытом состоянии, и поверхность огнеупорной плиты верхней части комплекта закрывает отверстие сталевыпускного канала. Эта же поверхность служит упором для свободного конца стержня 8, тем самым фиксируя его положение перед открытием затвора. Когда же отверстия в шибберных плитах 13 и 14 совмещаются, стержень 8 теряет свой упор и устремляется вертикально вверх вдоль сталевыпускного канала. Если на поверхности стартовой смеси спеклась твердая корка – стержень 8 пробьет ее и тем самым обеспечит свободное истечение стали.

С целью проверки работоспособности предложенной катапульты был проведен лабораторный эксперимент. Для этого с учетом рекомендаций работы [19] в масштабе 1:2,5 изготовили физическую модель ковшового затвора и снабдили ее новой катапультной системой (фото на рис. 5).



Рис. 5. Конструктивное исполнение силового узла катапульты (а) и относительное положение ее элементов во взведенном (б) состоянии после установки на модель

Витая пружина растяжения была изготовлена из кремнемарганцевистой бронзы. Для ее навивки использовали проволоку диаметром 5 мм. К телу байонетной втулки пружину притя-

нули винтом, пропустив его сквозь крайний верхний виток, тем самым зафиксировав положение пружины относительно гнездовой втулки. Сквозь крайний нижний виток пружины пропустили еще два удлиненных винта, внедрив их по резьбе в

тело укороченной подвижной гильзы, при этом сам крайний виток лег на юбку детали. Оба удлиненных винта в данной конструкции выступают крюками, необходимыми за надежного зацепления струны тетивы. При сборке убедились в свободном скольжении гильзы относительно наружной поверхности байонетной втулки при растяжении пружины.

Данный силовой узел был установлен на действующую модель ковшового затвора. В отношении данной физической модели было реализовано конструктивное и динамическое подобие натурному объекту: модель была упрощена до огнеупорного комплекта с двумя независимыми частями с сохранением возможности сдвигового перемещения нижней части (стакан-коллектор и нижняя шибберная плита) относительно верхней (ковшовый стакан и верхняя шибберная плита). Дальнейшие экспериментальные исследования вели по методике, описанной в работе [17] и ранее опробованной при оценке эффективности срабатывания катапульты с двумя плоскими упругими элементами. Задачей эксперимента была симуляция процесса разрушения препятствия на входе в канал ковшового стакана при известных прочностных характеристиках образовавшейся перемычки.

В качестве имитатора твердой спекшейся корки использовали набор плоских перемычек. Их вариационное разнообразие обеспечили ступенчатым изменением толщины (0,5 мм, 1 мм и 1,5 мм), а также использованием двух материалов с разными физико-механическими свойствами. Чтобы придать имитатору корки выраженные хрупкие свойства, использовали перемычки из оргстекла. Исследование разрушения перемычки в пластичном состоянии происходило за счет применения образцов из свинца. Такое распределение на две принципиально разные категории (хрупкая и пластичная корка) стало вынужденной мерой, необходимой для объективной оценки различий в работе катапульты, поскольку определить фактические характеристики подобного препятствия на натурном объекте в условиях реальной металлургической разливки не представляется возможным.

Известно, что по своим реологическим свойствам в твердом состоянии свинец подобен стали в момент, соответствующий времени сразу же после образования ее кристаллической структуры [20]. Исходя из этого, принято, что для изготовления имитатора перемычки, возникшей на поверхности стартовой смеси и демонстрирующей свойства повышенной вязкости, можно использовать плоскую заглушку из литого свинца. Применение же для той же цели оргстекла позволяет воссоздать условия, когда спекшийся слой

имеет пористую мелкоячеистую структуру повышенной хрупкости.

Экспериментальные образцы перемычек поочередно закладывали в конструкцию физической модели, после чего взводили катапульту в перекрытом состоянии затвора и переходили в режим наблюдения. При приложении сдвигового перемещения сквозные отверстия верхней и нижней частей огнеупорного комплекта совмещались, ударный стержень терял свой упор и устремлялся вертикально вверх, успешно пробивая препятствие. Разрушение было зафиксировано во всех шести опытах, для каждого образца перемычки. После срабатывания катапульты разрушенную перемычку извлекали для визуального анализа.

По итогам эксперимента было установлено, что в отношении имитаторов из свинца для перемычки, обладающей выраженными пластичными свойствами, было зафиксировано характерное пробитое отверстие с выгнутыми в направлении движения стержня кромками. Такой эффект был достигнут в том числе за счет малого лобового сопротивления стержня, чья ударная головка была спрофилирована определенным образом. В отношении имитаторов из оргстекла, для перемычки, обладающей выраженными хрупкими свойствами, была зафиксирована полная потеря целостности путем распада на осколки.

По результатам эксперимента усовершенствованную конструкцию катапульты следует признать полностью работоспособной и эффективной для разрушения твердой спекшейся корки, препятствующей свободному истечению расплава при открытии шибберного затвора.

Выводы. На основании анализа известных устройств, предназначенных для механического разрушения спекшейся корки, была предложена усовершенствованная конструкция пружинной катапульты. Новое устройство подходит для эксплуатации в составе ковшового затвора, снабженного экраном для защиты от брызг жидкой стали при разливке и теплового излучения. Результаты лабораторного эксперимента, который был проведен на физической модели шибберного затвора, оснащенного усовершенствованной катапультой с одинарным силовым компонентом, подтвердили правильность заложенных в конструкцию технических решений. Предложенная катапульта может быть рекомендована к промышленному использованию в составе шибберного затвора сталеразливочного ковша.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Еронько С.П., Быковских С.В. Разливка стали: Технология. Оборудование. К.: Техніка, 2003. 216 с.

2. Louhenkilpi S. Continuous casting of steel // Treatise on process metallurgy. Elsevier. 2024. Pp. 343–383. DOI: 10.1016/B978-0-323-85373-6.00009-0.
3. Rief A., Figueiredo A.O., Fasching M., Gruber V. Ladle well filler sands for all needs // Bulletin-The Journal of Refractory Innovations. 2022. Pp. 34–40.
4. Matos L., Bielefeldt W. V., Braganca S. R. Analysis of the technical and thermodynamic properties of steel ladle slide gate valve filler sands // Seminário de Aciaria, Fundação e Metalurgia de Não-Ferrosos. 2024. Pp. 2024–2024. DOI: 10.5151/2594-5300-41705.
5. Kuo C., Chen K.M., Chen L.H., Wu C., Hsiao C. Improvement in free opening performance of ladle filler sand // China Steel Tech Rep. 2020. Vol. 33. Pp. 36–42.
6. Li S.S., Zang X.M., Zhang J.K., Yang J., Kong L.Z., Wang G. A Novel Nonmetallic Inclusion in High-Mn and High-Al Steel Caused by the Interfacial Reaction Between Steel and Ladle Filler Sand // Steel research international. 2024. Vol. 95. № 10. 2400381. DOI: 10.1002/srin.202400381.
7. Nayak P., Sarkar S., Sahoo P.P., Ranjan R. Insights into Non-free Opening of Ladles: Filler Sand Chemistry Modifications for High Mn Steel Billet Casting // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2024. Vol. 77. № 9. Pp. 2423–2430. DOI: 10.1007/s12666-024-03334-8.
8. Kong L., Kang M., Zang X., Li S., Yang J. Reaction behavior of high manganese and high aluminum steel with chromium-containing ladle filler sand // Metallurgical Research & Technology. 2023. Vol. 120. № 6. 604. DOI: 10.1051/metal/2023072.
9. Yuan K., Deng Z., Zhu M. Sintering behaviours of different ladle filler sands with high-chromium stainless steel // Ironmaking & Steelmaking. 2024. Pp. 03019233241292910. DOI: 10.1177/03019233241292910.
10. Deng Z., Yang B., Zhu M. Laboratory study on the sintering behavior of Zircon-based ladle filler sands // steel research international. 2021. Vol. 92. № 9. 2100071. DOI: 10.1002/srin.202100071.
11. Yang B., Deng Z., Zhu M. Sintering behavior of new chromite-alumina mixed ladle filler sands for high Mn-high Al steel grades // Metallurgical and Materials Transactions B. 2022. Vol. 53. № 6. Pp. 3979–3991. DOI: 10.1007/s11663-022-02659-3.
12. Li S. S., Kong L. Z., Zang X. M. Effect of Cr₂O₃ Addition on Sintering Behavior of Novel Chromite-Based Ladle Filler Sand // Steel research international. 2024. Vol. 95. № 2. 2300452. DOI: 10.1002/srin.202300452.
13. Yuan K., Deng Z., Zhu M. Effect of Carbon on Sintering Behavior of Chromite-Based Ladle Filler Sands // Steel research international. 2024. Vol. 95. № 5. 2300670. DOI: 10.1002/srin.202300670.
14. Пат. 2682062, Российская федерация, МПК B22D 41/46. Способ подготовки шибера затвора сталеразливочного ковша / П.А. Зажи-гаев, Ю.А. Данилин, И.М. Захаров, А.В. Чиглин-цев, В.А. Егоров, П.Н. Федькин, А.С. Чиглинцев; заявитель и правообладатель Акционерное обще-ство «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургиче-ский комбинат». № 2018109108; заявл. 14.03.2028; опубл. 14.03.2019, Бюл. №8. 4 с.
15. Пат. 5,167,902 США, МПК B22D41/22. Device for piercing an obstruction in a well-block opening of a ladle for transporting molten steel / W.A. McCray, M.D. Cope, T.J. Connors, A. Csaszar; заявитель и патентообладатель Tri-C Corporation; заявл. 19.07.1991; опубл. 01.12.1992. 14 с.
16. Пат. 102005010842, Германия, МПК B22D41/46, B22D41/44. Katapult zum Öffnen des Kanals einer Stahlgießpfanne / Bernd-Detlef Jacob; заявитель и патентообладатель Besitzgesellschaft Jacob GMBH; заявл. 28.02.2008; опубл. 21.11.2007. 1 с.
17. Пат. 2751946, Российская Федерация, МПК B22D 41/08, B22D 41/46 (2020.08). Ката-пульта для открытия выпускного канала метал-лургического ковша с донным шибера затво-ром / С.П. Еронько, М.Ю. Ткачев, А.А. Байчоров, Е.А. Пономарева, Д.О. Федяев, А.А. Байчоров; заявитель и патентообладатель ООО «Волгодон-ский энергомеханический завод». № 2019128141; заявл. 06.09.2019; опубл. 21.07.2021, Бюл. № 21. 6 с.
18. Еронько С.П., Стародубцев Б.И., Пона-марева Е.А., Цыхмиро Е.С. Разработка новой конструкции и модельные исследования функци-онирования катапульты для ковшового затвора // Черная металлургия: Бюлл. ин-та «Черметинфор-мация». 2021. Т 77. №5. С. 540–546.
19. Еронько С.П. Физическое моделирова-ние технических систем сталеплавильного про-изводства: учебное пособие. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 324 с.
20. Выдрин В.Н. О реологических свой-ствах стали и свинца // Известия Академии наук СССР. Металлургия. 1967. № 2. С. 104–106.

Информация об авторе

Понамарева Елена Александровна, младший научный сотрудник. E-mail: ponamary.ifgp@mail.ru. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Институт физики горных процессов». Россия, 283048, Донецк, ул. Розы Люксембург, д. 72.

Поступила 27.05.2025 г.

© Пономарева Е.А., 2025

Ponomaryova E.A.*Institute of Physics of Mining Processes**E-mail: ponomary.ifgp@mail.ru*

DEVELOPMENT OF THE DESIGN AND CHECKING THE PERFORMANCE OF AN IMPROVED MODEL OF A CATAPULT FOR OPENING A LADLE

Abstract. *The article addresses the current issue of ensuring a guaranteed start of steel pouring under conditions where an obstruction forms at the entrance of the steel discharge channel of the refractory assembly of a ladle slide gate system. Such a phenomenon can occur when the surface layers of the starter mixture—used to fill the cavity of the closed slide gate's discharge channel—become wetted and sintered by molten metal during the ladle filling process. The study examines methods to prevent the formation of such obstructions and their removal using specialized mechanisms. Based on a detailed analysis of these devices, an improved catapult design for opening the ladle slide gate is proposed. Its key advantage lies in the ability to be installed on the gate together with a heat shield, which protects the casting equipment from thermal radiation and metal splashes during the steel pouring process. The article describes the main components and operational principle of the improved catapult model and outlines the basic requirements for its seamless integration into the ladle gate system. The functionality of the proposed catapult was tested through a laboratory experiment using a physical model that closely resembles a full-scale prototype. During the experiment, scenarios involving the destruction of a solidified crust—both in its plastic and brittle states—were simulated using various materials as barrier imitations. The results of the experimental studies confirmed the effectiveness of the improved catapult in eliminating obstructions at the entrance of the steel discharge channel.*

Keywords: *metallurgical ladle, steel casting, slide gate system, ladle filler sands, catapult, physical model.*

REFERENCES

1. Eronko S.P., Bykovskikh S.V. Steel Pouring: Technology. Equipment [Razlivka stali: Tekhnologiya. Oborudovanie]. Kyiv: Tekhnika. 2003. 216 p. (rus)
2. Louhenkilpi S. Continuous casting of steel. Treatise on process metallurgy. Elsevier. 2024. Pp. 343–383. DOI: 10.1016/B978-0-323-85373-6.00009-0.
3. Rief A., Figueiredo A.O., Fasching M., Gruber V. Ladle well filler sands for all needs. Bulletin-The Journal of Refractory Innovations. 2022. Pp. 34–40.
4. Matos L., Bielefeldt W. V., Braganca S. R. Analysis of the technical and thermodynamic properties of steel ladle slide gate valve filler sands. Seminário de Aciaria, Fundição e Metalurgia de Não-Ferrosos. 2024. Pp. 2024–2024. DOI: 10.5151/2594-5300-41705.
5. Kuo C., Chen K.M., Chen L.H., Wu C., Hsiao C. Improvement in free opening performance of ladle filler sand. China Steel Tech Rep. 2020. Vol. 33. Pp. 36–42.
6. Li S.S., Zang X.M., Zhang J.K., Yang J., Kong L.Z., Wang G. A Novel Nonmetallic Inclusion in High-Mn and High-Al Steel Caused by the Interfacial Reaction Between Steel and Ladle Filler Sand. Steel research international. 2024. Vol. 95. No. 10. 2400381. DOI: 10.1002/srin.202400381.
7. Nayak P., Sarkar S., Sahoo P.P., Ranjan R. Insights into Non-free Opening of Ladles: Filler Sand Chemistry Modifications for High Mn Steel Billet Casting. Transactions of the Indian Institute of Metals. 2024. Vol. 77. No. 9. Pp. 2423–2430. DOI: 10.1007/s12666-024-03334-8.
8. Kong L., Kang M., Zang X., Li S., Yang J. Reaction behavior of high manganese and high aluminum steel with chromium-containing ladle filler sand. Metallurgical Research & Technology. 2023. Vol. 120. No. 6. 604. DOI: 10.1051/metal/2023072.
9. Yuan K., Deng Z., Zhu M. Sintering behaviours of different ladle filler sands with high-chromium stainless steel. Ironmaking & Steelmaking. 2024. Pp. 03019233241292910. DOI: 10.1177/03019233241292910.
10. Deng Z., Yang B., Zhu M. Laboratory study on the sintering behavior of Zircon-based ladle filler sands. Steel research international. 2021. Vol. 92. No. 9. 2100071. DOI: 10.1002/srin.202100071.
11. Yang B., Deng Z., Zhu M. Sintering behavior of new chromite-alumina mixed ladle filler sands for high Mn-high Al steel grades. Metallurgical and Materials Transactions B. 2022. Vol. 53. No. 6. Pp. 3979–3991. DOI: 10.1007/s11663-022-02659-3
12. Li S.S., Kong L.Z., Zang X.M. Effect of Cr₂O₃ Addition on Sintering Behavior of Novel Chromite-Based Ladle Filler Sand. Steel research international. 2024. Vol. 95. No. 2. 2300452. DOI: 10.1002/srin.202300452

13. Yuan K., Deng Z., Zhu M. Effect of Carbon on Sintering Behavior of Chromite-Based Ladle Filler Sands. *Steel research international*. 2024. Vol. 95. No. 5. 2300670. DOI: 10.1002/srin.202300670.
14. Zazhigaev P.A., Danilin Yu.A., Zakharov I.M., Chiglintsev A.V., Egorov V.A., Fed'kin P.N., Chiglintsev A.S. Method of preparing a slide gate system of a ladle. Patent RF, no. 2682062, 2019.
15. McCray W.A., Cope M.D., Connors T.J., Csaszar A. Device for piercing an obstruction in a well-block opening of a ladle for transporting molten steel. Patent USA, no. 5,167,902, 1992.
16. Jacob Bernd-Detlef. Katapult zum Öffnen des Kanals einer Stahlgießpfanne. Patent DE, no. 102005010842, 2007.
17. Eron'ko S.P., Tkachev M.Yu., Baychorov A.A., Ponamareva E.A., Fedyaev D.O., Baychorov A.A. Catapult for opening the outlet channel of a metallurgical ladle with a bottom slide gate system. Patent RF, no. 2751946, 2021.
18. Eronko S.P., Starodubtsev B.I., Ponamaryova E.A., Tsykhmistro E.S. Development of a new design and model study of functioning of catapult for ladle sliding gate [Razrabotka novoy konstruktсии i model'nye issledovaniya funktsionirovaniya katapul'ty dlya kovshovogo zatvora]. *Ferrous metallurgy: «Chermetinformatsiya»*. 2021. V 77. No 5. Pp. 540–546. (rus)
19. Eronko S.P. Physical modeling of technical systems of steelmaking: a tutorial [Fizicheskoe modelirovanie tekhnicheskikh sistem staleplavil'nogo proizvodstva: uchebnoe posobie]. Moscow; Vollogda: Infra-Inzheneriya. 2021. 324 p. (rus)
20. Vydrin V.N., Ageev L.M. On the rheological properties of steel and lead [O reologicheskikh svoystvakh stali i svintsa]. *News of the USSR Academy of Sciences. Metallurgy*. 1967. No. 2. Pp. 104–106. (rus)

Information about the authors

Ponamaryova, Elena A., Junior Research. E-mail: ponamary.ifgp@mail.ru. Institute of Physics of Mining Processes. Russia, 283048, Donetsk, Rosa Luxemburg St. 72

Received 27.05.2025

Для цитирования:

Понамарева Е.А. Разработка конструкции и проверка работоспособности усовершенствованной модели катапульты для открытия ковшового затвора // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 8. С. 130–139. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-130-139

For citation:

Ponamaryova E.A. Development of the design and checking the performance of an improved model of a catapult for opening a ladle. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2025. No. 8. Pp. 130–139. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-130-139