

О. И. Шинский, д-р техн. наук, проф., зав. отделом

В. С. Дорошенко, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,

e-mail: doro55v@gmail.com

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины (Киев, Украина)

ВАРИАНТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА РОТОРНО-КОНВЕЙЕРНЫХ ЛИНИЯХ СПОСОБОВ ЛИТЬЯ С КРИСТАЛЛИЗАЦИЕЙ МЕТАЛЛА ПОД ДАВЛЕНИЕМ

В обзоре проанализированы наиболее характерные технические решения и примеры способов литья металла с кристаллизацией под давлением (ЛКД) и литья выжиманием с кристаллизацией под давлением (ЛВКД). Эти способы по сравнению с гравитационным литьем позволяют существенно повысить коэффициент использования металла, снизить брак отливок по газовым и усадочным порам, ликвации, анизотропии структуры и свойств, повысить плотность, а также механические и эксплуатационные свойства литого металла до уровней, не уступающих механическим свойствам металла поковок и проката. Кристаллизация под давлением широко применяется для цветных металлов и сплавов и недостаточно – для сталей и чугунов из-за низкой стойкости камер прессования и пресс-форм. Анализ известных технических решений подвода и выжимания металла в литейную форму, футеровки камер выжимания, металлопроводов, методов и величин приложения к металлу давления направлены на создание предпосылок использования, автоматизации ЛКД и ЛВКД в концепциях конструирования роторно-конвейерных линий (РКЛ) для реализации инновационных возможностей высокопроизводительных процессов литья. В ряде примеров описана ресурсосберегающая технология литья по газифицируемым моделям (ЛГМ), позволяющая получать высокоточные отливки и многократно регенерировать в закрытом трубопроводном конвейере текучий сухой формовочный песок с возможностью уплотнения его в формах при движении на РКЛ и упрощения выбивки отливок. На основе потенциала ЛГМ делается попытка создания концепций взаимного дополнения возможностей ЛГМ, ЛКД и ЛВКД с техническими решениями проектирования РКЛ. Рассмотрены сравнительные технико-экономические характеристики методов получения отливок сложной формы. А также указаны значительные перспективы использования для РКЛ магнитодинамических миксеров-дозаторов, которые обеспечивают высокую скорость подачи металла при заливке литейных форм или камер выжимания.

Ключевые слова: литье, отливки, роторно-конвейерные линии, литье выжиманием, кристаллизация под давлением, литейный конвейер, камера выжимания, литье по газифицируемым моделям.

Преодоление последствий деиндустриализации отечественной экономики среди важнейших приоритетов выдвигает скорейшее восстановление традиционных отраслей промышленности на новой технологической основе. Актуализация значимости промышленности и повышения ее доли в структуре ВВП также активно обсуждается в европейских странах. Европейская комиссия опубликовала коммюнике «За европейский промышленный ренессанс» [1], в котором подчеркнута актуальность формирования устойчивой модели роста, при котором центральную роль играет промышленность. Отмечено, что только обновленная промышленная база способна сделать реальный сектор экономики лидером в экономическом восстановлении Европы.

Решение поставленных задач возможно в том числе путем создания технологических систем на базе роторно-конвейерных линий (РКЛ). Принципиальное отличие РКЛ от других типов технологического оборудования для изготовления штучной продукции заключается в выполнении технологических операций в процессе непрерывного транспортирования такой продукции (материалов, объектов) совместно с

оснасткой, исполнительными и рабочими органами функциональных механизмов и устройств, осуществляющими заданную операцию.

К началу 90-х годов прошлого века в различных отраслях машиностроительной промышленности СССР эксплуатировалось несколько тысяч РКЛ для обработки металлов давлением и резанием, термохимической обработки, сборки и упаковки штучной продукции, изготовления деталей из пластмасс методами прессования и литья под давлением и других технологических операций с производительностью от 50 до 1000 шт./мин [2]. Ряд литейных РКЛ было создано и запатентовано во ФТИМС НАН Украины [3–5].

В пищевой промышленности РКЛ широко используют для фасовки жидких и вязкопластичных продуктов (в том числе при температуре 85–90 °С и с точностью до ± 2 мл) в штучную тару (стеклянную, пластиковую или металлическую) под давлением, вакуумом или гравитационным способом, сыпучих продуктов в пакеты или тубы; для изготовления пластиковой тары (бутылок, флажек) и металлических банок; для фасования или дозированного пакетирования сыпучих продуктов, в том числе с герметизацией тары, использованием вакуума и метода подпрессовки, а также образованием пакетов в непрерывной полимерной ленте (или из бумаги, фольги), нередко служащей транспортным конвейером [6]. Дозирование может осуществляться гравитационными, вибрационными или шнековыми дозаторами как по объему, уровню, так и по массе фасуемого материала. Возможна одновременная установка нескольких видов дозаторов для фасования и смешивания различных составляющих в одном пакете.

На ряде РКЛ после прохождения теста на герметичность тара направляется в зону стерилизации (возможно также обдувание или мойка), где внутренняя поверхность тары обрабатывается сначала перегретым паром и горячим воздухом, а после перекачкой водорода; затем после наполнения продуктом и заварки горловины продукция покидает асептическую зону. Для обеспечения высокой производительности линии комплектуются средствами автоматической загрузки, устройством, осуществляющим поштучный захват, ориентирование и подачу тары на вход линии, что применимо также для опок, пресс-форм и литейных моделей в случае проектирования литейных РКЛ. Если на заданную позицию технологического ротора не поступает необходимый элемент, то операция не выполняется, что позволяет практически исключить повреждение тары или утечку разливаемого продукта. Обычно занимаемая площадь РКЛ на 50 % меньше, чем у стандартных отдельно функционирующих машин [6].

Также отмечается, что широкое внедрение технологических систем на базе РКЛ обеспечит переход от старого технологического базиса «индустриальной эры» к качественно новому информационному базису технологий в виде единых высокоавтоматизированных компьютерно-интегрированных производств [6]. После этого научно-технический прогресс в перерабатывающей отрасли будет осуществляться эволюционно на основе совершенствования технической и информационной базы, а также электронной технологии управления.

Многие операции по скоростной разливке [3] и дозированию жидких (расплавов, хладагентов, красок), жидкоподвижных (формовочных смесей, шликеров, сплавов для тиксолия) и сыпучих материалов, обработке паром, инфракрасным или ультрафиолетовым излучателем тары (пресс-форм для разовой модельной оснастки) из пищевой промышленности можно адаптировать для литейно-металлургической отрасли. Ряд модификаций автоматизированных роторных морозильных агрегатов для быстрого замораживания морепродуктов, созданных учеными и конструкторами Калининградского технического университета [7], перспективны для использования в конструкциях РКЛ для литья металла в замороженные формы или по ледяным моделям.

В этой статье рассмотрены предпосылки использования на РКЛ способов литья с кристаллизацией под давлением (ЛКД), которые по сравнению с гравитационным литьем позволяют существенно повысить коэффициент использования металла, снизить брак по газовым и усадочным порам, ликвации, анизотропии структуры и

свойств, повысит плотность, а также механические и эксплуатационные свойства отливок [8]. Этот метод литья широко применяется для цветных металлов и сплавов и недостаточно – для сталей и чугунов из-за низкой стойкости камер прессования и пресс-форм. Также перспективным технологическим процессом является способ литья выжиманием с кристаллизацией под давлением (ЛВКД). Этот способ позволяет получать литые заготовки в постоянных, полупостоянных и разовых литейных формах, так как последние несут значительно меньшую термомеханическую нагрузку, чем пресс-формы литья под давлением, пригодны для производства тонкостенных сложнофасонных отливок небольших серий и не требуют огнеупорных труб для подачи металла в форму.

Влияние ЛВКД на структуру и свойства узкоинтервальной стали марки 15Л, склонной к транскристаллизации и анизотропии структуры и свойств, показано при исследовании образцов в работе [8]. Сравнение результатов гравитационной заливки и ЛВКД (с давлением до 5 МПа) при получении полых цилиндров с наружным и внутренним диаметрами 240 и 196 мм и высотой 300 мм в металлическом кокиле с песчаным стержнем показало, что основной причиной сокращения зоны столбчатых дендритов и повышения плотности дендритной структуры при ЛВКД является изменение теплофизических параметров затвердевания отливки. В частности, повышение в 1,5–2,0 раза линейной скорости кристаллизации металла происходило за счет увеличения до 5 раз продолжительности контактного теплообмена при замедлении формирования воздушного зазора между отливкой и формой.

Диспергирование дендритной структуры при увеличении скорости кристаллизации приводит к снижению степени дендритной ликвации, в частности, по углероду почти в 3 раза, как за счет уменьшения продолжительности разделительной диффузии, так и увеличения удельной межфазной поверхности. Метод ЛВКД на 0,15–0,20 г/см³ повышает плотность литого металла отливки, что связано с облегчением фильтрации расплава через зону двухфазного состояния и заполнения им формирующихся усадочных пор. Диспергирование дендритной структуры и снижение микрохимической неоднородности литого металла при ЛВКД обеспечивает формирование более дисперсной и однородной феррито-перлитной структуры после термической обработки (нормализация – при 920 °С, отпуск – при 670 °С) металла отливки. Процесс ЛВКД обеспечивает существенное (в 1,5–1,9 раза) повышение прочностных свойств стали ($\sigma_{\text{в}}$, МПа, с 395 до 575) без заметного снижения пластических и является эффективным способом улучшения структуры и свойств, которые трудно поддаются улучшению при гравитационной заливке [8].

Теплофизические процессы, происходящие в облицованной кварцевым песком камере выжимания после заливки в нее расплавленного металла, имеют следующие особенности [9]. Величину механического давления при затвердевании расплава в разовой неметаллической (песчаной) форме следует поддерживать в таких пределах, чтобы на отливках не образовался трудноотделимый механический пригар, снижающий класс точности размеров и нарушающий геометрию отливок. Поэтому механическое давление при кристаллизации металла рекомендовано применять для постоянных форм [9], а при изготовлении отливок в разовых формах необходимо давать комбинированное давление или только газовое изостатическое давление, которое для песчаных форм подробнее описано в работе [10]. Также появление пригара при контакте металла с песчаной поверхностью предотвращают тонкодисперсным составом противопопригарной краски, подобранным из огнеупоров и заполняющих поры между ними оплавляемыми компонентами.

РКЛ для ЛКД на основе способа литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) разработана на основе устройства [11], схематически представленного на рис. 1. Устройство содержит герметизируемый контейнер 1, в днище которого выполнено сквозное отверстие, крышку 2, герметизирующий элемент, например, синтетическую пленку 3, модельный блок из газифицируемого материала, включающий модель 4 отливки, модель 5 камеры прессования, модель 6 литникового канала, сыпучий формовочный

наполнитель 7, подпрессовочный поршень 8, размещенный в сквозном отверстии днища контейнера с возможностью вертикального перемещения, и возбудитель виброколебаний 9, расположенный в поршне 8.

Модель 5 камеры прессования размещают под моделью 4 отливки соосно с отверстием днища контейнера, объем ее составляет 1,05–1,15 объема модели отливки. Подпрессовочный поршень 8 размещают на расстоянии от нижнего торца модели 5 камеры прессования, равном 0,15–0,2 наружного диаметра поршня. Устройство работает следующим образом. В контейнер 1 устанавливают модельный блок из газифицируемого материала, заформовывают его сыпучим формовочным наполнителем 7 и уплотняют вибрацией. После этого контейнер 1 герметизируют синтетической пленкой 3, накрывают крышкой 2 и подключают к вакуумной системе. При достижении в форме остаточного давления 0,04–0,02 МПа в литниковый канал 6 заливают дозированную порцию металла, который газифицирует модель 5 камеры прессования и заполняет образовавшуюся при этом полость. После окончания заливки включают механизм перемещения поршня 8, в результате чего металл выдавливается из камеры прессования, заполняя полость, образовавшуюся при газификации модели 4 отливки. После завершения процесса затвердевания металла в форме поршень возвращают в первоначальное положение, отливку удаляют из контейнера, и процесс повторяется на следующей форме. Для дополнительного воздействия на жидкий и затвердевающий металл после выжимания металла из камеры прессования включают возбудитель виброколебаний 9.

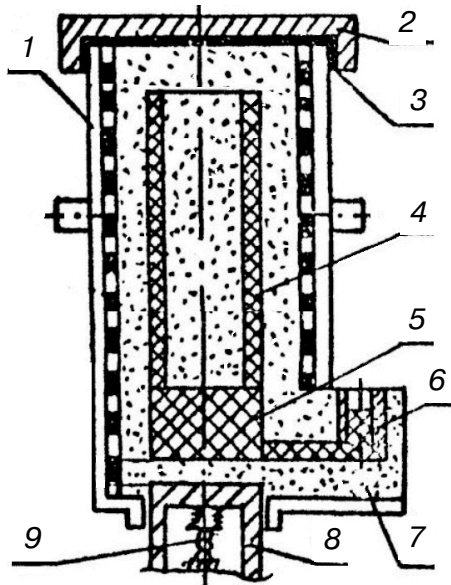


Рис. 1. Устройство для получения отливок по газифицируемым моделям с кристаллизацией под давлением [11]

Таким способом получены отливки фитингов со следующими показателями: масса отливки 15 кг, материал ВЧ 45-5, наружный диаметр поршня 0,2 м. Описанный способ ЛКД [11] по сравнению с аналогом – литьем вакуумным всасыванием такой же отливки позволил увеличить выход годного (%) с 63 до 77–87, а также уменьшить расход металла на литниковую систему (%) с 25 до 8, трудоемкость обрубочно-очистных работ (ч/т отливок) с 1,6 до 1,2, а брак по недоливам – на 7 % и по спаям – на 5%.

Преимущества применения ЛГМ для РКЛ в вакуумируемых песчаных формах состоят в возможности сочетания текучести расплавленного металла и «псевдотекучести» (по формулировке В. С. Шуляка) сухого формовочного песка, доступного, как для виброуплотнения на движущемся роторе РКЛ, например, навешиваемыми на литейный контейнер вибраторами, так и для несложной выбивки – извлечения отливки из формы. Также для сухого песка разработано ряд конвейерных систем регенерации в пневмопотоке с использованием закрытых трубопроводов и потерями при обороте песка не более 5 %. Причем, преимущество имеет пневмотранспорт на основе вакуумирования (в отличие от систем нагнетания воздуха), который исключает возможность попадания пыли в помещение цеха из трубопроводного транспорта.

Рассмотрим далее четыре характерных и сравнительно несложных способа для возможного использования на РКЛ из нескольких десятков описанных и запатентованных способов ЛКД и ЛВКД. В ряде способов применили камеру для выжимания металла (рис. 2), выполненную отдельно от литейной формы (в отличие от показанной на рис. 1). Подачу металла в литейную форму производили снизу сквозь литник в днище формы путем стыковки нижней части камеры (днища) с металлом в камере

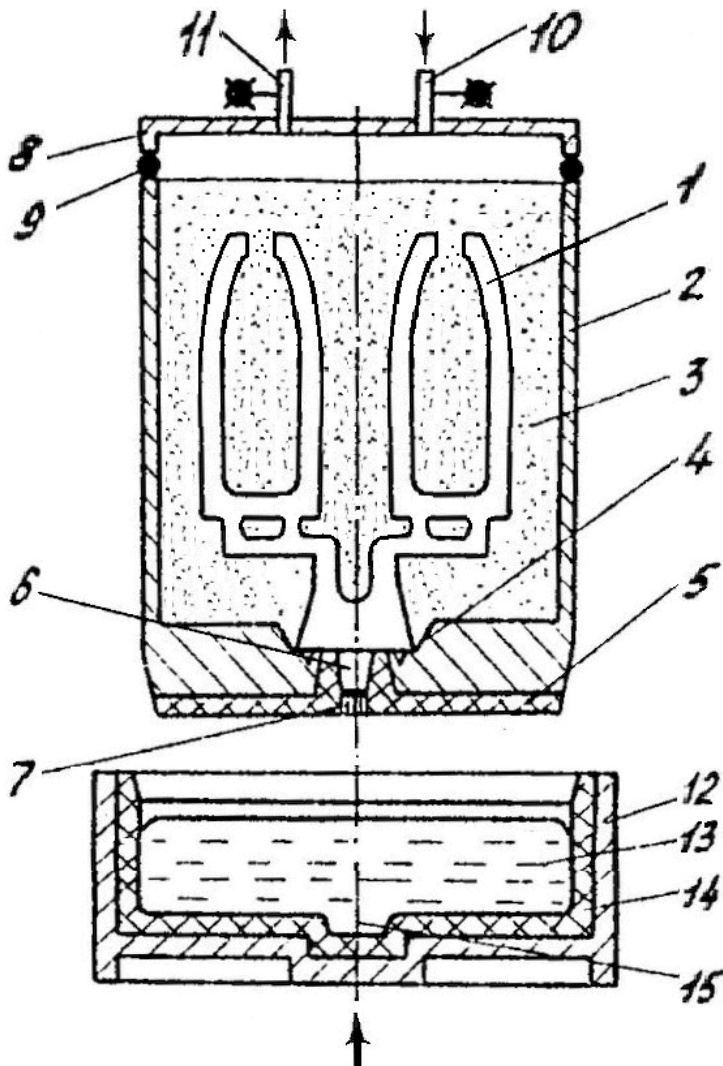


Рис. 2. Устройство для получения отливок методом ЛВКД [12]

выжимания и движения камеры вверх при неподвижной форме. Для выжимания металла опоку формы использовали как пуансон, а литником служило отверстие в плите под формой и днище формы или отдельный трубопровод (как показано ниже).

Для производства не крупных отливок типа лопаток газотурбинных двигателей или корпусов импульсного разрушения устройство (рис. 2) содержит песчаную форму 1 из твердой песчаной смеси 3, выполненную по разовым моделям и установленную в опоке (обойме) 2, соединенной с промежуточной плитой неразъемно [12]. На внутренней поверхности корпуса опоки 2 выполнена герметизирующая канавка 4, а снизу присоединена при помощи связующего или клея облицовка 5, выполненная из песчаной стержневой смеси. Литниковый ход 6 перекрыт фильтрующей сеткой 7. Сверху к опоке 2 присоединена крышка 8 через уплотнение 9, имеющая газопровод 10 для подачи сжатого газа при затвердевании отливок и патрубков 11 для отсоса воздуха (вакуумирования) из формы 1. Под формой расположена камера выжимания 12 с расплавом 13, облицованная слоем 14 железного порошка со связующим, в донной части которой выполнено углубление 15.

Устройство работает следующим образом. Литейная форма с полостью 1 изготавливается в опоке 2 или устанавливается в эту опоку, к донной части которой (снизу) присоединяется при помощи клея заранее изготовленная облицовка 5 (может

Нові методи та прогресивні технології лиття

наноситься пескодувным способом), сверху присоединяется крышка 8 через уплотнение 9. В камеру выжимания 12 заливается расплав легированной стали [12] и при температуре ликвидус производится его выжимание с заданной скоростью в литейную форму 1 через литниковый ход 6 и фильтрующую сетку 7 путем перемещения камеры 12 вверх (привод на рис. 2 не показан). При поступлении первой порции металла в форму 1 кольцевая канавка 4 заливается, опока 2 через патрубок 11 соединяется с вакуумной системой, а после заполнения формы 1 патрубок 11 перекрывается, и в опоку 2 через патрубок 10 подается сжатый газ под давлением 0,5 МПа. После этого производится выдержка под давлением до полного затвердевания отливок. Затем камера опускается вниз с пресс-остатком, который отрывается от литника из-за наличия теплового узла в углублении 15, и облицовка 5 разупрочняется и в виде песка остается на поверхности пресс-остатка, не образуя с ним пригара при взаимодействии через твердую корочку металла, образующуюся на поверхности расплава в камере 12 перед выжиманием. После затвердевания расплава в форме 1 давление газа в обойме 2 сбрасывается и извлекается блок отливок. Камера 12 поворачивается на 180° и производится выбивка облицовки и пресс-остатка, имеющего снизу пригар железного порошка, который не требует специальной подготовки пресс-остатка к переплаву. Такая конструкция устройства упрощает подготовку его к работе по сравнению с аналогами, особенно в условиях массового производства, а также подготовку к переплаву пресс-остатков.

Отметим, что устройство (рис. 2) также можно использовать для литья по ЛГМ-процессу с сыпучим наполнителем 3 после незначительной доработки оснастки. Чтобы сыпучий наполнитель 3 приобретал достаточную прочность при вакуумировании и не мог деформироваться при заливке металла под давлением, верхнюю поверхность сыпучего наполнителя 3 следует накрыть фильтровальной решеткой, закрепленной к стенке опоки 2. Эта решетка должна пропускать газ, но не пропускать мелкую фракцию наполнителя 3, который следует виброуплотнять после засыпки им газифицируемых моделей при изготовлении формы.

Использование литейной формы и камеры выжимания как отдельных конструкций открывает возможность их изготовления на отдельных конвейерных модулях, а затем стыковать, предварительно в движении на конвейере заливая металлом ряд камер выжимания с использованием установок магнитодинамических насосов (МДН) или методом многоструйной разливочной машины по аналогии с применением промковша. Примеры или концепции этих вариантов описаны в работе [3]. Магнитодинамические миксеры-дозаторы, созданные по руководством акад. В. И. Дубоделова и поставляемые литейным предприятиям, обеспечивают скорость подачи металла при заливке литейных форм или рассмотренных металлоприемников-камер выжимания – до 15 кг/с чугуном [13] и до 10 кг/с алюминиевыми сплавами. Магнитодинамические миксеры-дозаторы жидкой стали имеют емкость до 6 т [14].

Кроме показанного на рис. 2, также известен вариант (рис. 3) подачи металла 1 при выжимании его пуансоном 4 через металлопровод 2 вверх для питания литейной формы (не показана) при движении камеры выжимания 5 к литейной форме с металлопроводом либо литейной формы с металлопроводом в сторону неподвижной камеры выжимания 5 [15].

Согласно патенту [15], камеру выжимания 5, облицованную изнутри огнеупорным материалом и нагретую до заданной технологическим процессом температуры, на конвейере заполняют жидким металлом 1, и манипулятор устанавливает сверху на камеру выжимания 5 пуансон 4 с огнеупорной облицовкой. Затем силовым гидроцилиндром литейная контейнерная форма, выполненная по

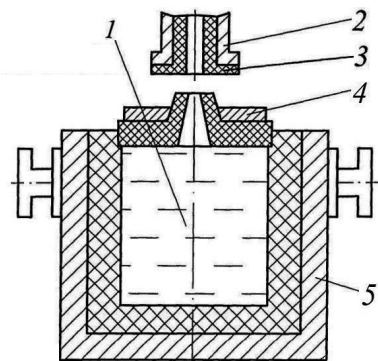


Рис. 3. Камера выжимания и пуансон в разрезе [15]

ЛГМ-процесу, перемещается с металлопроводом вниз к камере выжимания 5. Нижний торец цилиндрического металлопровода 2 со стояком (литником) модели 3 (рис. 3) прижимается к пуансону 4 и, используя как поршень, перемещает его внутрь цилиндрической части камеры выжимания 5. При перемещении пуансона 4 вниз жидкий металл 1 через центральное отверстие внутри пуансона 4 поступает по металлопроводу 3 вверх в полость литейной контейнерной формы, которая подобна схематично изображенной на рис. 2, только выполнена по технологии ЛГМ с вакуумированием песчаного наполнителя. После окончания заполнения полости литейной формы жидким металлом включается технологическая выдержка под более высоким давлением допрессовки, при которой проходит кристаллизация жидкого металла отливки под давлением. Этот способ ЛВКД на литейной линии [15] обеспечивает повышение плотности металла и качества его микроструктуры.

Рассмотрим еще одно устройство ЛКД [16] (рис. 4), в котором для заливки литейной формы на основе ЛГМ-процесса используют составной металлопровод с отдельной цилиндрической частью, выполненной из песчано-стержневой смеси подобно изготовлению обычного песчаного стержня. Это упрощает конструкцию металлопровода и технологию его изготовления, а песчаная часть металлопровода (пониженной теплопроводности) способствует получению отливок из жидкотвердых расплавов. Песчаная часть металлопровода соединена приклеиванием с фланцем, имеющим также небольшую тонкостенную цилиндрическую часть.

На рис. 4, а схематично изображены контейнерная литейная форма для получения отливки крестовины стрелочного перевода (перед заливкой), та же форма с плавильной печью (после заливки, рис. 4, б), и составной металлопровод (рис. 4, в). Устройство имеет пенополистирольную модель 1 (по ЛГМ-процессу), заформованную сухим кварцевым песком в разъемном контейнере 2 с герметизирующим уплотнением 3, металлопровод 4, смонтированный в кронштейне 6 через уплотнение 5. К верхней крышке контейнера 2 подключены газопроводы 7, 8, 9, соответственно, для вакуумирования, подачи газового давления и связи с атмосферой. В нижней части контейнера 2 расположена песчаная вставка 10, кольцевая канавка 11 для герметизации контейнера 2 в процессе заливки расплава. Для горизонтального перемещения металлопровода 4 имеется силовой привод 12 со штоком 13. Металлопровод 4 состоит из стального фланца 13 с тонкостенной цилиндрической частью 14 высотой 150–250 мм. Цилиндрическая часть металлопровода 15 с центральной полостью 16 выполнена из жидкостекло-песчаного стержневого состава.

Устройство работает следующим образом. Газифицируемые модели железно-дорожных крестовин (рис. 4, а) по способу ЛГМ формуют кварцевым песком в контейнере 2 с герметизирующим уплотнением 3. Плавка стали ведется по известному режиму. Приготовленная сталь охлаждается в печи до температуры солидус (1300 °С), при этом растворенные в стали газы удаляются, а затем сталь быстро нагревается до температуры 1340 °С (до жидкотвердого состояния) [16]. Металлопровод 4 погружается в расплав до уровня штриховой линии, показанной на рис. 4, в, чтобы цилиндрическая часть 14 фланца также находилась в расплаве. Контейнер 2 начинают вакуумировать через газопровод 7, на поверхности цилиндрической части 15 сразу образуется газонепроницаемая корочка твердого металла под действием присасывания вакуумом. Расплав стали по металлопроводу 4 методом вакуумного всасывания поступает в контейнер 2 со скоростью 5 м/с, газифицируя и замещая модель. Первые порции металла заливаются в канавку 11 и герметизируют контейнер 2 снизу. Продукты газификации моделей отсасываются из контейнера 2 вакуумом через газопровод 7. После заполнения рабочей полости форм включается гидроцилиндр 12, и штоком 13 металлопровод смещается вправо, отсекая расплав металла в металлопроводе от расплава металла в форме, после чего вакуумирование прекращается, в контейнер 2 через газопровод 8 подается сжатый воздух под давлением 0,5 МПа, и производится выдержка до затвердевания отливки, после чего контейнер 2 соединяется с атмосферой через газопровод 9, отливка извлекается из песка, и процесс повторяется с новой формой.

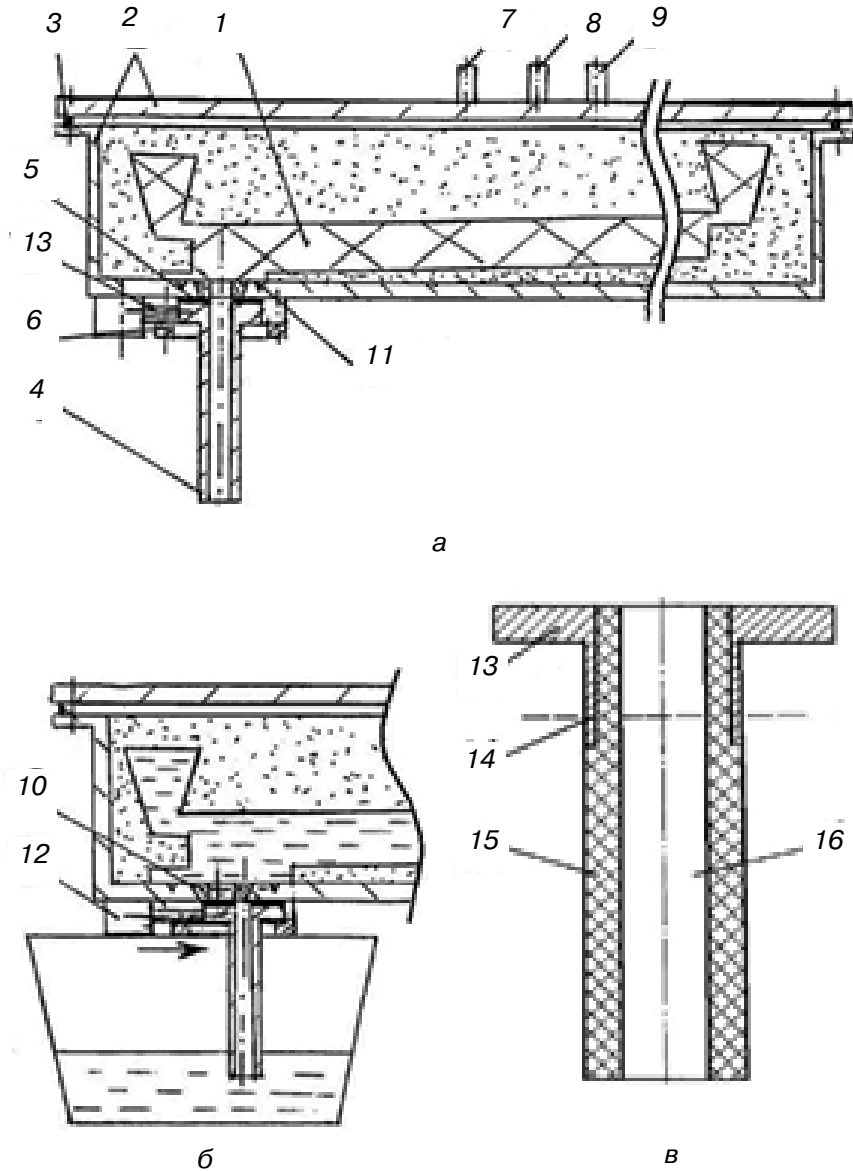


Рис. 4. Схема устройства ЛКД [16]: а – литейная форма перед заливкой; б – литейная форма после заливки и плавильная печь; в – составной металлопровод

Составной разовый металлопровод, включающий отдельную цилиндрическую часть, выполненную из песчано-стержневого состава, имеет простую конструкцию и несложную технологию изготовления, что снижает себестоимость получаемой отливки. А сочетание методов ЛГМ, вакуумного всасывания с ЛКД позволяет отнести способ литья [16] к высокой технологии получения высококачественного литья. При заливке формы в движении (в концепции РКЛ) форму можно двигать с металлопроводом в расплаве печи до отсечения расплава металла в металлопроводе, опуская конвейерным устройством форму при попадании металлопровода в створ печи и поднимая из печи после указанного отсечения. Металлопровод можно выполнять с канавкой для отламывания песчаной части и осуществлять эту операцию вслед за указанным отсечением. В контакте со сталью жидкостекольные смеси претерпевают разупрочнение и операция отламывания (или отпиливания) песчаной части

Нові методи та прогресивні технології лиття

не требует сложного и громоздкого силового механизма, а форма, лишившись песчаной трубки металлопровода, при движении на конвейере существенно уменьшит свои габариты.

Рассмотрим также принцип ЛВКД с верхним расположением камеры выжимания на установке для литья колес железнодорожного транспорта по газифицируемым моделям с кристаллизацией под давлением [17] (рис. 5). Основное отличие этого варианта ЛВКД состоит в оснащении футерованной заливочной (металлоприемной) камеры выжимания калиброванными жаростойкими проходными стаканами с легкоплавкими профильными заглушками, которые расплавляются при достижении уровня жидкого металла верхней части камеры выжимания.

Установка (рис. 5) состоит из вертикально закрепленного на металлоконструкции 1 силового гидроцилиндра 2, подвижной шток 3 которого кинематически связан с футерованным пуансоном 4. Соосно под пуансоном 4 расположены футерованная металлоприемная камера выжимания 5 с механизмом ее фиксации 6 и литейная

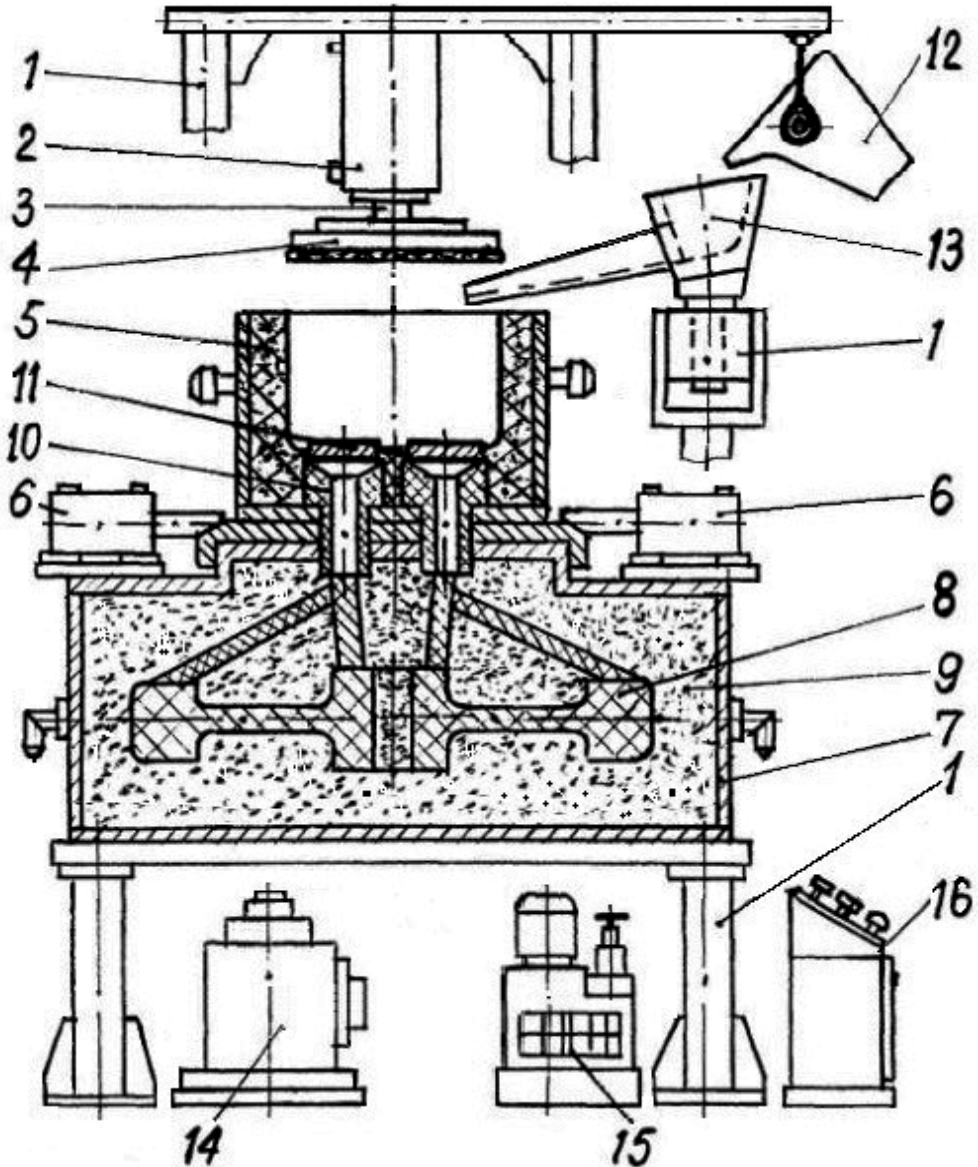


Рис. 5. Установка для литья колес железнодорожного транспорта по газифицируемым моделям с кристаллизацией под давлением

Нові методи та прогресивні технології лиття

(контейнерная) форма 7 с пенополистирольной моделью 8. В днище камеры выжимания 5 и верхней части литейной формы 7 с огнеупорным сыпучим наполнителем 9 расположены калиброванные жаростойкие проходные стаканы 10 для герметизации соединения камеры с формой и подачи жидкого металла в форму 7. Стаканы 10 сверху закрыты легкоплавкими профильными заглушками 11, которые расплавляются при достижении уровня жидкого металла верхней части камеры выжимания 5. Жидкий металл в камеру выжимания 5 заливают с ковша 12 через поворотный сточный желоб 13. Газы от термодеструкции пенополистирольной модели 8 в литейной форме 7 отсасывают вакуумным насосом 14. Для подачи рабочей жидкости к силовому гидроцилиндру 2 и механизму фиксации 6 имеется гидростанция 15. Управление установки выполняется пультом 16.

Установка работает следующим образом. Металлоприемная камера выжимания 5, облицованная изнутри огнеупорным материалом и нагретая до заданной технологическим процессом температуры, устанавливается на металлоконструкцию 1, фиксируется и соединяется с литейной формой 7. Жидкий металл из ковша 12 через желоб 13 заливается в футерованную камеру выжимания 5. При достижении уровня жидкого металла верхней части камеры выжимания легкоплавкие профильные заглушки 11 расплавляются, и жидкий металл под действием гравитации сплошным потоком без примесей воздуха через калиброванные жаростойкие проходные стаканы 10 с необходимой скоростью заполняет полость литейной формы 7. Затем подача жидкого металла с разливного ковша 12 прекращается, поворотный сточный желоб 13 отводится с рабочей зоны, включается силовой гидроцилиндр 2, футерованный пуансон 4 опускается, входит внутрь камеры выжимания 5 и нажимает на поверхность жидкого металла под давлением допрессовки, при которой происходит кристаллизация жидкого металла отливки под повышенным давлением, после чего подвижный шток 3 с пуансоном 4 поднимается вверх в исходное положение. Отработанная камера выжимания 5 с литейной формой 7 следуют на позиции охлаждения отливки и выбивки, а на их место подают следующую форму 7 с камерой 5.

Рассмотренный способ литья по патенту [17], по сравнению со способом [16], позволяет получать достаточно высокие (от 0,4 м по высоте) отливки из железоуглеродистых сплавов, поскольку заливка вакуумным всасыванием полостей форм такой высоты указанными сплавами по способу [16] была бы затруднительной. Принцип литья на установке [17] при реализации на РКЛ удобно сочетать с автоматической разливкой металла при помощи магнитодинамических миксеров-дозаторов [13, 14].

Подчеркнем подробнее преимущества способа ЛКД применительно к повышению свойств литого металла. Традиционно при изготовлении подавляющего большинства отливок формы заполняют свободной заливкой из литейного ковша перегретым над линией ликвидус расплавом под действием гравитационных сил, а затвердевание отливок происходит под атмосферным давлением, – это способ гравитационной заливки с кристаллизацией под атмосферным давлением. При такой заливке в форму из ковша заливают расплав с перегревом его над линией ликвидус, и в форме сначала от расплава отводится теплота перегрева, только после этого начинается процесс кристаллизации (с образованием центров кристаллизации), сопровождающийся формированием крупного первичного зерна и химической неоднородности металла. Последующее затвердевание металла отливки под атмосферным давлением приводит к образованию микропористости, что определяет более низкие механические свойства таких отливок по сравнению с деформированным металлом – поковокками и прокатом, особенно при литье в песчаные формы. По мнению академика В. А. Ефимова, «Основным недостатком, приводящим к образованию повышенной усадки и ко всем видам физической неоднородности, является перегрев разливаемого расплава. Разливка расплавов с перегревом при литье и кристаллизации отливок вызывает образование горячих трещин, усиление дендритной и зональной неоднородности и ряд других дефектов литья» [18].

Исследованиями установлено, что качество литого металла можно значительно повысить в процессе формирования отливки, например, используя всестороннее га-

Нові методи та прогресивні технології лиття

зовое давление, налагаемое на затвердевающую отливку. При давлении газа 0,5 МПа плотность стали 35ХГСЛ повышается на 2 %, а прочность – на 30 %, пластичность – в 2 и более раз [16]. Для измельчения зерна и повышения химической однородности литого металла необходимо стремиться к увеличению количества центров кристаллизации, а микропористость в литом металле можно устранить воздействием на него давлением при кристаллизации, чем достигают объемного затвердевания, применяя как можно меньший перепад температур в сечении отливки.

Для этого необходимо, чтобы расплав поступал в литейную форму без перегрева (например, в интервале кристаллизации) под механическим давлением. Тогда по всему объему отливки, сразу после заполнения формы, уже имеются готовые центры кристаллизации, что обеспечивает мелкое первичное зерно и химическую однородность литого металла. А затвердевание отливки под давлением (механическим, газовым или комбинированным) в пределах 1 МПа (оптимально 0,5 МПа) обеспечивает устранение микропористости – подавляется выделение газов, образующих микропоры, и устраняется усадочная пористость [4, 8, 9, 16, 19].

Способ ЛВКД предусматривает заполнение литейной формы жидкотвердым расплавом с готовыми центрами кристаллизации и кристаллизацией его в форме под давлением. В случае использования узкоинтервальных, эвтектических сплавов и чистых металлов используют малые добавки модификаторов 2-го рода, в том числе наночастицы тугоплавких химических соединений типа TiCN [16]. Экспериментально подтверждено, что механические свойства литого металла при ЛВКД повышаются до уровня поковок и проката. Способ ЛВКД позволяет получать отливки из любых сплавов в любых литейных формах с кристаллизацией под механическим, газовым или комбинированным давлением, за счет литья в интервале кристаллизации снизить температуру расплава примерно на 50 °С с соответствующей экономией электроэнергии и сокращением потерь теплоты в окружающую среду. Сравнительные технико-экономические характеристики методов получения сложнофасонных отливок приведены на диаграмме (рис. 6) [4].



Рис. 6. Сравнительные технико-экономические характеристики методов получения сложнофасонных отливок: 1 – потребление шихтовых материалов; 2 – потребление формовочных и стержневых материалов; 3 – потребление электроэнергии; 4 – потребление газа; 5 общие затраты; 6 – затраты на основные технологические площади; 7 – себестоимость

В случае, если использование камер выжимания большого размера проблематично, то разработан способ изготовления отливок из жидко-твердого расплава с заполнением литейной формы металлом через металлопровод непосредственно из плавильной печи [16], что устраняет перелив металла из печи в ковш (экономия температуры составляет ~50 °С), а из ковша – в камеру выжимания (экономия также ~50 °С).

Способы ЛКД и ЛВКД обладают универсальностью – качественные отливки с высокими механическими свойствами (до уровня свойств металла поковок и проката) можно получать практически в любых литейных формах из любых сплавов. Осуществление этих способов не зависит от сил гравитации и атмосферного дав-

ления. Использование литейных форм с точными размерами при ЛКД и ЛВКД (оболочковых форм по выплавляемым моделям, форм по методу ЛГМ, сухих стопочных форм и др.) позволяет получать точные литые заготовки (КИМ до 0,95) [3, 4, 8, 16, 19]. Описанные способы позволяют снизить массу существующих отливок до 30 % за счет уменьшения толщины их стенок при сохранении конструктивной прочности, сократить расходы на обработку резанием. Низкие температуры расплава при заполнении литейных форм позволяют снизить расход энергии при производстве отливок на 25–50 кВт·ч/т жидкого металла и потери теплоты в окружающую среду.

Список литературы

1. For European Industrial Renaissance. Brussels, 2014. Jen. 22. URL: <http://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014DC0014&from=EN>.
2. *Прейс В. В.* Технологические роторные машины: вчера, сегодня, завтра. – М.: Машиностроение, 1986. – 128 с.
3. *Дорошенко В. С.* Роторно-конвейерные линии, разработанные ФТИМС НАН Украины, и концепции скоростной заливки форм металлом на таких линиях // Процессы литья. – 2019. – № 5. – С. 22–30.
4. *Шинський О. Й.* Роторно-конвеєрний комплекс одержання точних виливків під регульованим тиском по моделях, що газифікуються (ГАМОДАР-процес). – URL: <http://www.ptima.kiev.ua/work/te/rus/te-r40.pdf>.
5. Заявка u201903780 Україна від 12.04.2019. МПК В22 D7/00, В22 D47/00. Роторно-конвеєрний комплекс для виготовлення виливків з високоміцного чавуну у ливарних формах з сипкого піску / В. С. Дорошенко, В. О. Шинський.
6. *Прейс В. В.* Роторные машины и автоматические роторные линии в пищевых производствах: учеб. пособие. 2-е изд. перераб. и доп. – Тула: ТулГУ, 2012. – 108 с.
7. *Ионов А. Г., Мекеницкий С. Я.* Автоматизированные роторные морозильные агрегаты для замораживания пищевых продуктов. – М.: Пищевая пром-сть, 1981. – 176 с.
8. Структура и свойства стали марки 15Л при литье выжиманием с кристаллизацией под давлением / Е. Д. Таранов, В. Н. Баранова, И. Н. Примак и др. // Процессы литья. – 2009. – № 3. – С. 23–25.
9. *Караник Ю. А.* Литье выжиманием с кристаллизацией под давлением в постоянных и разовых формах // Литейное производство. – 2007. – № 3. – С. 26–29.
10. *Дорошенко В. С.* Литье по газифицируемым моделям с кристаллизацией металла под давлением // Литейное производство. – 2016. – № 1. – С. 25–28.
11. Патент 832 Україна, МПК В22D 18/00, В22D 18/06. Устаткування для виготовлення виливків за моделями, що газифікуються, з кристалізацією під тиском / О. Й. Шинський, А. І. Валигура, В. І. Лозенко та ін. – Опубл. 15.12.1993, Бюл. № 2.
12. Патент 1830204 Россия, МПК В22D18/02. Устройство для получения отливок / Ю. А. Караник. – Опубл. 20.02.1996, Бюл. №5.
13. *Дубоделов В. И.* Магнитодинамический миксер-дозатор жидкого чугуна. – URL: <http://www.ptima.kiev.ua/work/te/rus/te-r44.pdf>.
14. *Дубоделов В. І.* Створення високотехнологічної бази вітчизняних металургійних мікробиробництв на основі фундаментальних і прикладних досліджень у галузі магнітної гідродинаміки, електротехніки та металургії // Вісн. НАН України. – 2019. – № 6. – С. 62–65.
15. Патент 42003 Україна, МПК В22D 18/00, В22D 27/00. Лінія для лиття за моделями, що газифікуються, з кристалізацією під тиском / І. О. Шинський, О. Й. Шинський, П. М. Каричковський та ін. – Опубл. 25.06.2009, Бюл. № 12.
16. *Караник, Ю. А.* Снижение металло- и энергопотребления при производстве отливок деталей машин и механизмов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2008. – № 2. – С. 11–16.
17. Патент 42352 Україна, МПК В22D 18/00. Установка для лиття коліс залізничного транспорту за моделями, що газифікуються, з кристалізацією під тиском / І. О. Шинський, О. Й. Шинський, П. М. Каричковський та ін. – Опубл. 25.06.2009, Бюл. № 12.
18. *Ефимов В. А.* Специальные способы литья: справ. – М.: Машиностроение, 1991. – 436 с.
19. *Караник Ю. А.* Способ получения отливок со свойствами на уровне поковок и проката // Литейное производство. – 2006. – № 10. – С. 25–28.

Поступила 23.09.2019

References

1. For European Industrial Renaissance. Brussels, 2014. Jen. 22. URL: <http://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014DC0014&from=EN>.
2. Prejs, V. V. (1986) Technological rotary machines: yesterday, today, tomorrow. Moscow: Mashinostroenie, 128 p. [in Russian].
3. Doroshenko, V. S. (2019) Rotor-conveyor lines developed by the PTIMA NAS of Ukraine, and the concept of high-speed casting of metal on such lines. *Processy litya*, no. 5, pp. 22–30 [in Russian].
4. Shinskij, O. J. Rotary-conveyor complex for obtaining accurate castings under controlled pressure by gasifying patterns (GAMODAR process). URL: <http://www.ptima.kiev.ua/work/te/rus/te-r40.pdf>.
5. Zayavka u201903780 Ukrayina vid 12.04.2019. МПК В22 D7/00, В22 D47/00. Rotary-conveyor complex for production of castings from ductile cast iron in molds from loose sand. V. S. Doroshenko, V. O. Shinskij.
6. Prejs, V. V. (2012) Rotary machines and automatic rotor lines in food production: ucheb. posobie. 2-e izd. pererab. i dop. Tula: TulGU, 108 p. [in Russian].
7. Ionov, A. G., Mekenickij, S. Ya. (1981) Automated rotary freezer units for food freezing. Moscow: Pishhevaya prom-st, 176 p. [in Russian].
8. Taranov, E. D., Baranova, V. N., Primak, I. N. et al. (2009) The structure and properties of steel grade 15L during extrusion molding with crystallization under pressure. *Processy litya*, no. 3, pp. 23–25 [in Russian].
9. Karanik, Yu. A. (2007) Squeeze casting with crystallization under pressure in constant and single molds. *Litejnoe proizvodstvo*, no. 3, pp. 26–29 [in Russian].
10. Doroshenko, V. S. (2016) Lost Foam Casting with crystallization of metal under pressure. *Litejnoe proizvodstvo*, no. 1, pp. 25–28 [in Russian].
11. Patent 832 Ukrayina, MPK B22D 18/00, B22D 18/06. Equipment for the production of castings by gasifying patterns with crystallization under pressure. O. J. Shinskij, A. I. Valigura, V. I. Lozenko et al. Opubl. 15.12.1993, Byul. no. 2.
12. Patent 1830204 Rossiya, MPK B22D18/02. Device for producing castings. Yu. A. Karanik. Opubl. 20.02.1996, Byul. no. 5.
13. Dubodelov, V. I. Magnetodynamic mixer-dispenser of molten iron. URL: <http://www.ptima.kiev.ua/work/te/rus/te-r44.pdf>.
14. Dubodelov, V. I. (2019) Creation of high-tech base of domestic metallurgical micro-industries based on fundamental and applied researches in the field of magnetic hydrodynamics, electrical engineering and metallurgy. *Visn. NAN Ukrayiny*, no. 6, pp. 62–65 [in Russian].
15. Patent 42003 Ukrayina, MPK B22D 18/00, B22D 27/00. Injection molding line using gasification patterns with crystallization under pressure. I. O. Shinskij, O. J. Shinskij, P. M. Karichkovskij et al. Opubl. 25.06.2009, Byul. no. 12.
16. Karanik, Yu. A. (2008) Reduction of metal and energy consumption in the production of castings of machine parts and mechanisms. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii*, no. 2, pp. 11–16 [in Russian].
17. Patent 42352 Ukrayina, MPK B22D 18/00. Installation for casting of wheels of railway transport by gasification patterns with crystallization under pressure. I. O. Shinskij, O. J. Shinskij, P. M. Karichkovskij et al. Opubl. 25.06.2009, Byul. no. 12.
18. Efimov, V. A. (1991) Special casting methods: sprav. Moscow: Mashinostroenie, 436 p. [in Russian].
19. Karanik, Yu. A. (2006) A method of producing castings with properties at the level of forgings and rolled. *Litejnoe proizvodstvo*, no. 10, pp. 25–28 [in Russian].

Received 23.09.2019

О. Й. Шинський, д-р техн. наук, проф., зав. відділу

В. С. Дорошенко, д-р техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: doro55v@gmail.com

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

ВАРИАНТИ ВИКОРИСТАННЯ НА РОТОРНО-КОНВЕЄРНИХ ЛІНІЯХ СПОСОБІВ ЛИТТЯ З КРИСТАЛІЗАЦІЄЮ МЕТАЛУ ПІД ТИСКОМ

В огляді проаналізовано найбільш характерні технічні рішення і приклади способів лиття металу з кристалізацією під тиском (ЛКТ) і лиття вижиманням з кристалізацією під тиском (ЛВКТ). Ці способи порівняно з гравітаційним литтям дозволяють істотно підвищити коефіцієнт вико-

Нові методи та прогресивні технології лиття

ристання металу, знизити брак виливків по газовим і усадочним порам, ліквідації, анізотропії структури і властивостей, підвищити щільність, а також механічні та експлуатаційні властивості литого металу до рівнів, які не поступаються механічними властивостями металу поковок і прокату. Кристалізація під тиском широко застосовується для кольорових металів і сплавів і недостатньо – для сталей і чавунів через низьку стійкість камер пресування і прес-форм. Аналіз відомих технічних рішень підведення і видавлювання металу в ливарну форму, футерування камер видавлювання, металопроводів, методів і величин прикладення до металу тиску спрямовані на створення передумов використання, автоматизації ЛКТ і ЛВКТ в концепціях конструювання роторно-конвеєрних ліній (РКЛ) для реалізації інноваційних можливостей високопродуктивних процесів лиття. У ряді прикладів описана ресурсозберігаюча технологія лиття за моделями, які газифікуються (ЛГМ), що дозволяє отримувати високоточні виливки і багаторазово регенерувати в закритому трубопровідному конвеєрі текучий сухий формувальний пісок з можливістю ущільнення його в формах під час руху на РКЛ і спрощення вибивання відливків. На основі потенціалу ЛГМ робиться спроба створення концепцій взаємного доповнення можливостей ЛГМ, ЛКТ і ЛВКТ з технічними рішеннями проектування РКЛ. Розглянуто порівняльні техніко-економічні характеристики методів отримання виливків складної форми. А також вказано значні перспективи використання для РКЛ магнітодинамічних міксерів-дозаторів, які забезпечують високу швидкість подачі металу при заливанні ливарних форм або камер видавлювання.

Ключові слова: лиття, виливки, роторно-конвеєрні лінії, лиття вижиманням, кристалізація під тиском, ливарний конвеєр, камера видавлювання, лиття за моделями, що газифікуються.

O. I. Shinsky, Doctor of Engineering Sciences, Head of Department

V. S. Doroshenko, Doctor of Engineering Sciences, Senior Researcher,
e-mail: doro55v@gmail.com

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

CASES OF APPLICATION ON ROTOR-CONVEYOR LINES OF CASTING METHODS WITH CRYSTALLIZATION OF METAL UNDER PRESSURE

The review analyzes the most characteristic technical solutions and examples of methods for casting metal with crystallization under pressure (CCP) and squeeze casting with crystallization under pressure (SCCP). These methods, compared with gravity casting, can significantly increase the utilization of metal, reduce casting defects by gas and shrink pores, segregate, anisotropy the structure and properties, increase the density, as well as the mechanical and operational properties of cast metal to levels not inferior to the mechanical properties of forgings and rolled metal. Crystallization under pressure is widely used for non-ferrous metals and alloys and not enough for steels and cast irons due to the low resistance of pressing chambers and molds. An analysis of the well-known technical solutions for supplying and squeezing metal into a mold, lining of squeezing chambers, metal wires, methods and values of application to pressure metal is aimed at creating the prerequisites for the use, automation of CCP and SCCP in the concepts of designing rotor-conveyor lines (RCL) to realize the innovative capabilities of high-performance casting processes. In a number of examples, resource-saving technology Lost Foam casting (LFC) with gasified patterns is described, which allows one to obtain high-precision castings and repeatedly regenerate flowing dry molding sand in a closed pipeline conveyor with the ability to compact it in molds when moving on the RCL and to simplify removing out castings. Based on the potential of LGM, an attempt is made to create concepts of complementing the capabilities of LFC, CCP and SCCP with technical solutions for the design of RCL. Comparative technical and economic characteristics of methods for producing castings of complex shape are considered. Also, significant prospects are indicated for the use of magneto-dynamic metering mixers for RCLs, which provide a high metal feed rate when casting molds or squeezing chambers.

Keywords: casting, metal castings, rotor-conveyor lines, squeezing casting, crystallization under pressure, casting conveyor, squeezing chamber, Lost Foam casting, gasified patterns.