

**Дорошенко В. С., Кравченко В. П.**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

**ПОСТЕПЕННОЕ ОБНОВЛЕНИЕ ПАРАДИГМЫ В ТЕОРИИ  
ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ ПО ТЕМЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
МЕТАЛЛА С ПЕСЧАНОЙ ФОРМОЙ**

*Современные литейные процессы регулируются присутствующими в составе их технологических операций изменяемыми градиентами (перепадами) таких физических характеристик, как температура, газовое давление, концентрация модельного материала в песке и др. Использование этих градиентов в концепции термодинамики неравновесных процессов может служить основой новой парадигмы в теории литейных процессов, касающейся взаимодействия металла и песчаной формы.*

**Ключевые слова:** литейные процессы, песчаная форма, термодинамика, взаимодействие металла и формы, специальные способы литья

Центральное место в теории литейных процессов занимает изучение темы взаимодействия металла отливки с литейной формой, в частности, песчаной формой, в которой получают 75-80 % тоннажа отливок. Процессы получения формы, с точки зрения экономики, занимают не менее половины затрат на производство отливок, а экологические загрязнения, связанные с материалами и технологией формы, могут достигать 80 %. Последние достижения формовочной технологии связаны с совершенствованием смесей и форм, твердеющих в контакте с оснасткой, при отверждении газообразным реагентом (Cold-box), разработкой новых самотвердеющих смесей (No Bake) и связующих на базе новейших достижений химии, что, как правило, связано с применением дорогостоящих синтетических смол, обогащенных кварцевых песков, а также энерго- и капиталоемких процессов по регенерации отработанных смесей. Ужесточение экологических норм (с учетом регламента Киотского протокола) без возможности снижения загрязнений по вине песчаной формы вызывает вопрос (Е. Н. Буданов), стоит ли далее развивать технологию ХТС.

С другой стороны, с начала 70-х годов прошлого века в цехах появились способы литья в вакуумируемые формы из сухого несвязанного песка, уплотняемого и удерживаемого с помощью перепада газового давления. Удаление из формы связующего способствует снижению вредных выбросов в атмосферу цеха на порядок, включая способы литья по одноразовым моделям, а улавливание и удаление газов с границы «металл-форма» через вакуумные трубопроводы, вакуумные насосы, систему пылеосаждения и каталитического дожигания кардинально улучшает экологическую безопасность внутри литейных цехов и вокруг них.

Если каждое новое столетие приносит обнов-

ление научной парадигмы, то такое постепенно происходит и в теории литейных процессов, приоритеты в развитии которых переориентируются в сторону оптимального сочетания высокой производительности получения высококачественных отливок с растущими требованиями совместимости с окружающей средой. Теоретические же основы впитывают последние достижения фундаментальных дисциплин: термодинамики, теории теплообмена, гидродинамики, механики жидкостей и газов, физической химии и других с учетом новейших методов изучения разнообразных явлений, лежащих в пограничных областях этих наук.

На доскональное выявление закономерностей взаимодействия металла отливки и песчаной формы и его регулирование в целях изменения функциональных свойств отливок существенное влияние способна оказать термодинамика неравновесных процессов (ТНП), творцами основ которой являются два Нобелевских лауреата разных лет Л. Онсагер (1968 г.) и И. Пригожин (1977 г.). Наиболее яркие примеры теоретической интерпретации ТНП для литейных процессов были описаны А. И. Вейником [1]. Это новое направление, вошедшее в устоявшиеся научные традиции термодинамики XX столетия, возникло в результате растущего понимания основополагающей роли продуктивности и скорости реальных процессов как одного из основных показателей их эффективности.

Появление ТНП связано с введением в уравнения термодинамики времени как физического параметра и созданием на этой основе нового макрофизического метода исследования кинетики взаимосвязанных явлений переноса. Эта «квазитермодинамическая» теория необратимых процессов построена на основе выражения для скорости возникновения энтропии в ТНП и уста-

Авторы благодарны проф. О. И. Шинскому за постановку задачи и помощь в выполнении работы лежащих в пограничных областях этих наук.

новлении соотношений взаимности между феноменологическими коэффициентами различных потоков и сил, участвующих в процессах энерго-массопереноса. В случае векторных потоков эти термодинамические силы всегда оказываются связанными с градиентами свойств: тепловая сила – с градиентом температуры; диффузионная – концентрации диффундирующего вещества; электрическая – электрического потенциала и т. д. Применительно к изучению закономерностей взаимодействия металла отливки с литейной формой именно законы переноса, зависящие от градиентов, прежде всего, температуры, давления и концентрации, отражают сущность этого процесса, а усиление этих градиентов – один из способов его регулирования.

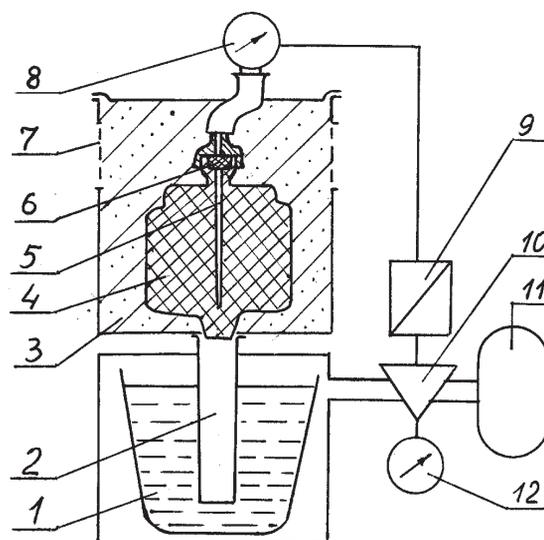
Следуя в направлении значительного сокращения временных и материальных затрат, экономическое развитие реального производства стремится к наукоемким технологиям по выпуску высокотехнологичных, а лучше – изделий с высоким уровнем добавленной стоимости, так как именно они в наибольшей мере используют «человеческий капитал» и позволяют сохранить природные богатства. Такие тенденции на основе анализа интенсивности потока патентной информации по способам литья и научно-технической литературы отмечены А. А. Минаевым по результатам сравнительных исследований закономерностей сегодняшнего развития литейного производства для ведущих технологически развитых стран и прогнозирования его совершенствования на ближайший период [2]. В его работе установлено стабильное развитие процессов литья в разовые песчаные формы с опережающим развитием этих технологий по отношению к технологическому оборудованию. Отмечено также преимущественное развитие специальных способов литья, в частности, непрерывного и литья под давлением (ЛПД). В то же время низкая динамика патентования процессов сырой формовки указывает на то, что она исчерпала возможности своего совершенствования.

Поскольку изобретения обладают потенциалом упреждения, а изобретения в области литейного производства внедряются в практику по оценкам экспертов примерно через 10 лет, то можно достаточно обоснованно ожидать, что стабильные тенденции в развитии технологии литейного производства ведущих стран на ближайшие 10 лет будут устойчивыми. Изобретения наиболее наглядно (по сравнению с теоретическими работами) отражают сущность и вектор новизны в виде отличительных особенностей новейших способов и конструкций.

В качестве примеров, характерных для технологических направлений, ниже описано два из последних изобретений, патентуемых в ФТИМС НАНУ. Они касаются весьма популярной по количеству выданных патентов в мире технологии литья по газифицируемым моделям (ЛГМ – Lost Foam Casting), в процессе которой происходят

замещение расплавленным металлом одноразовой модели и фильтрация (перенос) ее продуктов сквозь песок формы. Практически все мировые производители авто-тракторной техники и двигателестроения представлены в списке патентообладателей по теме ЛГМ, а число патентов, которое удалось отследить авторам, превышает несколько сотен.

Рассматриваемый способ литья (рис. 1) является сочетанием ЛГМ и ЛПД, точнее, литья в песчаную форму по газифицируемым моделям под действием перепада давления. Принцип действия способа состоит в том, что на металл 1 в тигле подается давление, и он по металлопроводу 2 подается в форму 3, где заформована в песке без связующего одноразовая пенопластовая модель 4. Модель имеет накол 5 для выхода газов вдоль движения металла при заполнении формы. Верхняя точка модели (на небольшом выпоре) каналом накола сообщена с местом подвода к модели заливаемого снизу металла. Канал в этой точке через огнеупорный фильтр 6 (прокладку) связан трубкой с датчиком давления обратной связи 8. Для сообщения с атмосферой форма 3 имеет сетчатые участки 7 на стенках контейнерной опоки. Опку после заполнения песком и его уплотнения могут накрывать сверху крышкой.



**Рис. 1.** Способ ЛГМ под перепадом давления: 1 – металл расплавленный; 2 – металлопровод; 3 – форма; 4 – пенопластовая модель; 5 – накол; 6 – фильтр; 7 – сетка; 8 – датчик давления обратной связи; 9 – регулятор; 10 – регулирующий орган; 11 – емкость (источник газового давления); 12 – датчик давления

Качество поверхности полости формы и отливки можно обеспечить в том случае, когда песок, контактирующий с пенопластовой моделью, после формовки останется неподвижным, особенно в процессе замещения этой модели металлом. При этом модель (в зазоре между зеркалом жидкого металла и моделью) в короткий период заливки металлом как опору песка сменяет удерживающая песок разница газового давления, подобная той, которая действу-

ет при вакуумно-пленочной формовке (ВПФ). Роль пленки при этом выполняет покрытие (слой краски) модели вместе с продуктами деструкции модели. Последние впитываются в поверхностный песчаный слой (там конденсируются) и существенно снижают его газопроницаемость, тем самым формируя его герметизирующие свойства.

При ВПФ разница газового давления создается путем вакуумирования песка формы с одновременной подачей атмосферного давления в полость формы. При ЛГМ в форме из сыпучего песка фактически применяют аналогичную разницу газового давления, только вместо атмосферного давления используют давление газов от газификации модели или в сочетании его с атмосферным давлением в случае выполнения вентиляционных каналов. Однако, если жидкий металл подавать в полость формы на удаляемую модель под давлением (под перепадом давления), то получим одно единое давление (в бинарной среде жидкости металла и газов от газифицирования модели) в полости формы (как в сосуде), где модель замещается жидким металлом. Это давление, когда его поддерживать в необходимых пределах, даст возможность создать необходимую разницу давления для получения качественной отливки без обвала песка. Таким образом, в варианте рассматриваемого способа величиной перепада давления на металл одновременно с заливкой металла обеспечивается разница давления на песок без применения вакуумирования, связанного с ним оборудованием и энергозатратами.

Величину указанной разницы газового давления целесообразно поддерживать в интервале 10–80 кПа сверх атмосферного при отсутствии вакуумирования. Минимальное значение указанного интервала выбрали из того соображения, что при атмосферном давлении  $1000 \text{ г/см}^2 = 98 \text{ кПа}$  (10 м вод. ст.) слой песка с удельной массой  $1,7 \text{ г/см}^3$  и высотой 60 см будет оказывать давление на горизонтальную площадку ( $60 \times 1,7 = 102 \text{ г/см}^2$ ), примерно равное 10 кПа. Если разница газового давления будет меньше, то форма со слоем песка толще (выше) 60 см обвалится. Формы меньших размеров в технике, обычно, не применяют.

Максимальное значение указанного интервала оправдано практикой применения традиционно отработанных противопригарных покрытий при литье в вакуумируемые песчаные формы, в которых разрежение создают водокольцевым насосом типа ВВН с разницей не более 80 кПа. Превышение указанного значения этой разницы давления дает механический пригар на отливках, особенно на их вогнутых местах, которые выполняются песчаными выступами типа «болванов».

Во втором варианте способа применяют только вакуумирование песка, которым создают разницу газового давления на песок формы. Величины этой разницы достаточно для удержания нерушимого песка формы и, вместе с тем, создания перепада для расплавленного металла, заполняющего форму. Например, если в толще песка

создать давление 20 кПа, а на уплотнение песка достаточно разницы давлений 20 кПа, и форму сообщить литником с поверхностью металла, на который действует атмосферное давление 98 кПа, то тем самым для перепада давления на металл останется  $98 - 20 - 20 = 58 \text{ кПа}$ . Для жидкого алюминия плотностью  $2,38 \text{ т/м}^3$  такой перепад давлений способен поднять столб металла по литнику на высоту  $(58 \times 10)/(2,38 \times 98) = 2,49 \text{ м}$ . Этот простой расчет показывает, что одним вакуумированием песка можно обеспечить одновременно достаточное уплотнение песка и создать перепад давления столбом алюминия высотой 2,49 м. Обычно промышленно эксплуатируемые в нашей стране установки литья под электромагнитным давлением дают перепад давления в пределах 1 м столба жидкого алюминия от уровня его в тигле.

Отличительной особенностью способа является автоматическое регулирование давления (см. рис. 1.) по следующему принципу: первичный прибор (датчик давления обратной связи 8) получает импульс давления, превращает его в электрический сигнал, который подается на вход регулятора 9. Регулятор 9 сравнивает сигнал датчика с заданным и определяет знак и величину расхождения. Знак показывает, в какую сторону необходимо переместить регулирующий орган 10, а величина – длительность перемещения. С регулятора информация подается на преобразователь интерфейсов, из которого затем поступает на ЭВМ. Давление, которое обеспечивает емкость 11 (аккумулятор) с газом под давлением, после коррекции регулятором 9 контролируют датчиком давления 12, который может быть связан с оборудованием для записи.

В качестве регулятора 9 использовали микропроцессорный регулятор МИК-21 производства ООО «Микрол» (г. Ивано-Франковск). Этот тип регулятора непрерывного действия программируется через переднюю панель или через гальванически разделенный интерфейс RS-485, формирует исходный импульсный сигнал управления исполнительным механизмом типа МЕО соответственно с заданным режимом работы. Благодаря наличию в своем составе последовательного интерфейса RS-485 информация от регулятора передается на ЭВМ. В качестве датчиков 8 и 12, которые превращают импульс газового давления или разрежения в электрический исходный сигнал, используют приборы типа Сапфир 22М (ЗАО «Манометр», г. Москва) или преобразователь давления измерительный ПД-1 (ООО «ДП Укргазтех», г. Киев, ТУ У 30265715.002-99).

Таким образом, через канал накола 5 (см. рис. 1) вдоль модели, соответствующей получаемой отливке, на весь период от начала до конца контакта заливаемого металла с моделью в процессе ее замещения металлом обеспечивают требуемую разницу давления путем измерения датчиком 8 и автоматическим управлением регулятором 10 перепада давления на металл. Перепад давления на металл вместо регулирования газового давления также без труда можно создать электромагнитным способом, поддерживая разницу газового

давления в указанном интервале. Кроме того, этот способ позволяет путем надежного контроля разницы давления датчиком 8 в обоснованных выше пределах для легких сплавов обеспечить перепад давления на металл путем использования только вакуумирования песка формы. При этом вместо применения сетчатых участков 7 опоку выполняют сплошной и газонепроницаемой, вакуумирование проводят через размещенный в песке формы вакуум-фильтр (например, металлорукав), подключенный к вакуум-насосу, без наличия потребности в источниках и схеме регулирования повышенного газового давления.

Для получения серийных отливок достаточно определить разницу газового давления и записать микропроцессорным регулятором оптимальный перепад давления на металл в течение 3-5 заливок металла, а для последующих заливок повторением режима по этим записям отпадает необходимость определения разницы газового давления, регулятор лишь будет повторять записанный режим.

При выполнении и расположении в песчаной форме модели коллектора литниковой системы с закрепленными на нем моделями в виде блока, когда верхняя точка такого модельного блока расположена на конце коллектора или стояка, канал накола выполняют от этой точки. Это приемлемо для мелких отливок, когда коллектор или стояк выполняют вертикально с прикрепленными к нему со всех сторон питателями моделей. Вместо накола в этом случае приемлемо также применение трубчатого стояка.

Если литейщик по показанию датчика 12 или по записанному режиму заливок видит, что достаточного перепада давления можно достичь также путем поддержки металлостатического напора при гравитационном литье из ковша, например, при подаче металла в нижнюю часть модели сифонной литниковой системой, которая обеспечивает поддержку разницы газового давления в требуемом интервале, то расчет и применение такой литниковой системы для гравитационного литья снизят затраты на оборудование и энергопотребление для создания давления в форме. Достаточный перепад давления может дать напор заливаемого металла в столбе стояка (керамического) при гравитационной заливке сплавов с высокой удельной массой (железоуглеродистые, медные и другие), когда только газификация модели при ЛГМ обеспечит достаточную разность давления, чтобы получить качественную отливку, а датчиком 8 всегда можно проконтролировать эту разность давления. Такой контроль и регулирование давления в различных вариантах ЛГМ позволяют снизить затраты на оборудование и энергопотребление при создании разности давления на несвязанный песок формы действием перепада давления заливаемого металла, а в указанном случае выйти на гравитационное литье заливкой из ковша.

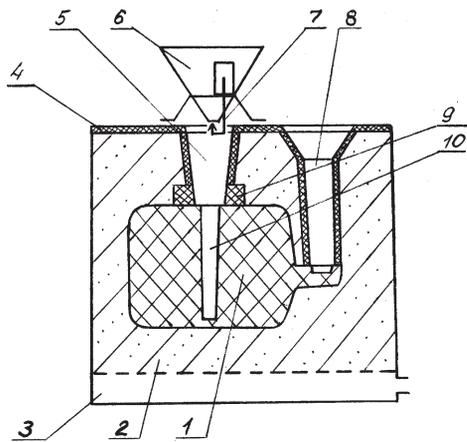
Следующий способ – из цикла изобретений

о литье по одноразовым легкоплавким моделям, в частности, ледяным, которые поглощаются песком формы. Этот способ, созданный в концепции ЛГМ-процесса, является развитием одного из его разновидностей – литье по ледяным моделям (ЛЛМ). После формовки ледяной модели необходимо применить быстрое направленное ее расплавление от трубчатого выпора (подводящего к модели атмосферное давление) к ее контактной зоне с поверхностью формы, чтобы впитать продукты расплавления в песок и освободить полость формы для заливки расплавленного металла отливки.

Однако, для полного или частичного расплавления модели также целесообразно применение расплава металла как высокотемпературного энергоемкого теплоносителя, подаваемого в виде порции. Это обосновано тем, что данный мощный носитель тепловой энергии, по деструктивному действию которого на модель трудно найти аналогов, всегда получают в литейном цехе. В пенопластовых моделях подачей порции металлического расплава часто также целесообразно выполнить прожигание сквозного вентиляционного канала, связанного с каналом выпора, через который выйдут газы и сгорят в факеле на контрладе формы, как при литье по патенту [3] (Full Mould Process). При этом тонкоструйная или капельная подача порции расплава способна поджечь встречный газовый поток продуктов деструкции, который горит почти без дыма.

Для ледяных моделей способ позволяет полностью выполнить быстрое направленное плавление модели, преимущественно сверху вниз от выпора, через который к песчаной поверхности полости формы проникает атмосферное давление воздуха, включая его действие на поверхность полости формы через образующийся при этом расплав модели, с предотвращением сдвига вакуумируемого песка вокруг быстро тающей модели. Поверхность увлажненного песка сразу удерживается перепадом газового давления аналогично ВПФ, что исключает обсыпание песка.

В качестве примера реализации способа на рис. 2 в разрезе показана модель 1, выполненная из льда или пенопласта, которая заформована в песок 2 формы. Песок могут вакуумировать через пористое дно с полостью 3, тогда верхняя поверхность песка формы (контрлад) герметизируется синтетической пленкой 4, а остальные – стенками опоки или контейнера (контуры их условно показаны линией, ограничивающей песок формы). При этом выпор 5 и стояк 8 (коллектор) также покрыты синтетической пленкой известными способами, применяемыми при ВПФ. Над выпором установлен дозатор 6 с рассекателем 7 и механизмом его перемещения. Выпор 5 может выполняться с газопроницаемым кольцевым стержнем 9 из песчаной смеси со связующим или кольцевой сетчатой вставкой, а под выпором в модели может быть выполнена полость 10. Простые отливки могут получать без выпора и заливать через стояк, расположенный на месте выпора 5 при выполнении в нем указанных элементов 9 и 10. При этом в мо-



**Рис. 2.** Форма для литья по ледяной модели: 1 – модель; 2 – песок; 3 – полость под пористым дном; 4 – синтетическая пленка; 5 – выпор; 6 – дозатор металла; 7 – рассекатель; 8 – стояк (коллектор); 9 – кольцевой газопроницаемый стержень; 10 – полость

дели отверстие предварительно может быть выполнено инструментом, а полость сформирована, например, в результате вспенивания и осаждения пены в центре стенки модели.

Осуществление изобретения при частичном или полном удалении одноразовой модели 1 основано на использовании направленного движения фронта плавления модели или прожигания канала от выпора 5 (и стояка 8 одновременно, или одного стояка, если нет выпора) к периферии вместе с распространением атмосферного давления в конечном итоге ко всей поверхности полости формы. Для быстрого плавления модели используют теплоноситель в виде порции расплавленного металла, который под действием своего веса движется в глубь модели, отдавая свое тепло на ее нагрев и плавление, и охлаждается практически до температуры плавления материала модели, находясь с ней в контакте. Если модель ледяная, то металл охладится до температуры плавления льда; если модель пенополистироловая – то до температуры начала стеклования полистирола и далее до температуры окружающей среды в форме. Порцию металла затем используют в виде внутреннего холодильника, если она сплавляется с основным (матричным) заливаемым металлом отливки, или в виде легирующего материала, если затем заливают металл другой марки, а также в качестве армирующего элемента, который может не свариваться с матричным металлом, или свариваемым элементом как крупной части отливки.

Формовка в сухом песке 2 модели 1 из льда или пенопласта, которые поглощаются песком формы, не отличается от известных способов ЛГМ. Выпор 5 и стояк 8 (коллектор) удобно изготавливать трубчатыми, облицованными синтетической пленкой. После формовки ледяной модели выполняют операцию направленного таяния модели, чтобы появление жидкой фазы в любом месте модели не опережало проникновения к этому ме-

сту атмосферного давления при притоке воздуха через выпор или стояк. При этом для толстостенных моделей нет необходимости охлаждать песок, прилегающий его слой в форме может охладить сама модель. Для тонкостенных моделей рекомендуется охлаждение моделей до температуры минус 20-40 °С и ниже.

Ледяную модель растапливает порция жидкого металла, которую заливают через сквозное отверстие выпора и/или стояка отливки на модель. При этом модель может иметь полость 10 в виде лунки (для начального направления движения расплава) или отверстия. Количество жидкого металла и скорость его подачи регулируют дозатором требуемого объема или с отверстием малого проходного сечения, через которое расплав постепенно стекает на модель. Также могут применять закрепленный на дозаторе рассекатель 7 струи металла с механизмом перемещения, причем перемещением по высоте рассекателя регулируют скорость подачи металла, а также распекают струю на мелкие капли. Так же могут использовать метод поочередного открывания-закрывания отверстия дозатора рассекателем в регулируемом режиме механизмом такого движения (например, с определенной частотой и амплитудой) или паузами при дистанционном управлении (в зависимости от интенсивности возможных выделений газа из выпора и других условий). С целью замедления процесса плавления модели в качестве дозатора могут использовать «ложку» (ковшик) для заливки проб металла для химического или спектрального анализа, которой производят несколько заливок металла, достигая в сумме требуемой массы порции.

При непрерывном изготовлении модели и формовки ее в виде непрерывного футерованного песком кристаллизатора, например, по способу [4] путем собирания из частей и наращивания модели в процессе формовки в облицовочный песчаный слой подвижного кристаллизатора порционно подаваемый металл дают непрерывно. При этом выпор 5 могут выполнять в виде щелевого отверстия вдоль кристаллизатора. В щелевое отверстие сначала дозатором тонкой струей или капельным способом подают металл для плавления модели, например, ледяной, а после ее плавления и впитывания в вакуумируемый песок в освобожденный объем полости заливают матричный металл.

Через газопроницаемую вставку 9 небольшой толщины при вакуумировании песка к отверстию или полости обеспечивают доступ газового разрежения песка формы и впитывают избыток газов или возможных брызг жидкости, если такие появляются при заливке порции металла. Аналогично при выполнении тонкой стенки модели, выполненной в нижней части отверстия или полости 10 (см. рис. 2), первые капли металла плавят эту стенку, впитывают расплавленную жидкость и при помощи разрежения производится дальнейшее впитывание продуктов модели. Разрежение газа на границе полости формы обычно в 2-3 раза ниже, чем в толще песка формы за счет сопротивления

пористой среды. Это, с одной стороны, обеспечивает прочность формы из сухого песка, а с другой, – позволяет отсасывать продукты модели, жидкие компоненты которых служат связующими песка, а газообразные удаляются в вакуумную систему.

Путем составления теплового баланса при теплообмене расплавленного металла с материалом модели определили минимальную величину порции массой  $m$ , которой будет достаточно для полного расплавления модели массой  $M$ . При этом для упрощения расчетов не учитывали тепловые взаимодействия металла с формой и модели с формой, считая, что их интенсивности на порядок ниже рассматриваемых, а также в нижеприведенных расчетах использовали методику расчета и численные данные для металла из справочника [5]. При таком теплообмене порция металла отдает общее количество теплоты, состоящее из теплоты нагрева в жидком виде  $mc_{ж}\Delta t_{ж}$  (на температуру  $\Delta t_{ж}$  с теплоемкостью  $c_{ж}$ ), в твердом виде, соответственно,  $mc_{т}\Delta t_{т}$  и теплоты плавления  $mr_1$ . Модель при нагреве до температуры плавления и при плавлении воспринимает количество теплоты, состоящее из теплоты нагрева в твердом виде  $Mc_{т}\Delta t_{т}$  и теплоты плавления  $Mr_2$ . Из составленного баланса  $mc_{ж}\Delta t_{ж} + mc_{т}\Delta t_{т} + mr_1 = Mc_{т}\Delta t_{т} + Mr_2$  получим  $m = M(c_{т}\Delta t_{т} + r_2) / (c_{ж}\Delta t_{ж} + c_{т}\Delta t_{т} + r_1)$ .

После заливки порции металла и освобождения полости формы от модели путем впитывания продуктов ее плавления в песок формы следует операция заливки основной массы металла (матричного). Для расплавления затвердевшей и охлажденной порции металла массой  $m$  при полной заливке основной массы металла отливки может потребоваться его дополнительный нагрев. Рассчитали минимальную температуру  $t$  этого дополнительного нагрева жидкого металла. Аналогично условиям первого расчета составили тепловой баланс. Для нагрева и расплавления порции металла потребуется теплота  $(mc_{т}\Delta t_{т} + mr_1)$ , которую передаст жидкий матричный металл  $m_{м}c_{ж}t$ , считая, что порция также состоит из матричного металла. При  $mc_{т}\Delta t_{т} + mr_1 = m_{м}c_{ж}t$  получим  $t = (mc_{т}\Delta t_{т} + r_1) / m_{м}c_{ж}$ .

В качестве примера рассчитали характеристики способа при получении отливки из серого чугуна по модели массой 1 кг из льда и подаче капельным способом порции жидкого чугуна массой  $m$  на модель, находящуюся при температуре  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Из справочника [5] температура кристаллизации чугуна составляла  $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $c_{ж} = 0,838\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$ ,  $c_{т} = 0,755\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$ ,  $r_1 = 250\text{ кДж}/\text{кг}$ . Кроме того,  $M = 1\text{ кг}$ ,  $c_{м} = 2,1\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$ ,  $r_2 = 330\text{ кДж}/\text{кг}$ . При нагреве модели  $\Delta t_{м} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а также при температуре заливки  $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$  имеем

$\Delta t_{ж} = 1400 - 1150 = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$  и при охлаждении твердого металла до  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$   $\Delta t_{т} = 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Тогда после подстановки  $m = 1(2,1 \cdot 10 + 330) / (0,838 \cdot 250 + 0,755 \cdot 1150 + 250) = 0,264\text{ кг}$  чугуна. Для алюминия, заливаемого при  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $m = 0,30\text{ кг}$ .

Для расплавления ледяной модели объемом 1 л при  $M = 0,91\text{ кг}$  потребуется  $m = 0,240\text{ кг}$  чугуна, что составляет от массы отливки  $0,24 \cdot 100 / 7,0 = 3,43\%$  при плотности жидкого чугуна  $7\text{ кг}/\text{л}$ , а с учетом объема столовой ложки 10 мл потребуется  $0,240 / (7,0 \cdot 0,01) = 3,43$  столовых ложек, или равноценное количество ложек для заливки проб жидкого чугуна. При заливке такого же чугуна в качестве матричного металла в полость формы объемом 1 л в количестве  $m_{м} = 7,0 - 0,24 = 6,76\text{ кг}$  получим потерю его температуры на полное расплавление ранее залитой и затвердевшей порции  $t = 0,24(0,755 \cdot 1150 + 250) / (6,76 \cdot 0,838) = 47,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что потребует соответствующего перегрева металла.

Оба способа насыщены процессами переноса модельного материала (в двух агрегатных состояниях: жидкости и газа) в песчаной среде формы под действием градиента давления, различными вариантами теплообмена между моделью, металлическими составляющими отливки (включая фазовые переходы) и песком формы. Одноразовая модель выступает не только как носитель очертаний отливки, но и как носитель связующего (герметизатора) песка и как хладагент. Аналитическое описание этих процессов – это предмет теории переноса.

## Выводы

Создание и совершенствование способов литья, стремящихся отвечать своей функциональной гибкостью наиболее конкурентным рыночным условиям и растущим экологическим требованиям, регулируемых присутствующими в составе их технологических режимов и операций легко изменяемых градиентов (перепадов) физических характеристик (температуры, газового давления, концентрации модельного удаляемого материала в песке и других), на базе использования теории ТНП вполне может служить началом новой парадигмы в теории литейных процессов, касающихся взаимодействия металла и песчаной формы. А по результатам выполненных учеными ФТИМС НАНУ исследований в этом направлении, публикациям, защите ряда диссертаций, запатентованным десяткам способов литья в течение нескольких десятилетий можно судить о выявлении и использовании этой парадигмы, созданной в этом институте научной школой.



## Литература

1. Метод приложения термодинамики необратимых процессов к решению задач литейного производства: Теплообмен между отливкой и формой / Под ред. А. И. Вейника. – Минск: Вышэйшая школа, 1967. – С. 5-17.
2. Минаев А. А. Разработка научных представлений о генезисе технологии литейного производства в XX веке и перспективы ее развития на ближайший период: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М.: МАМИ, 2007. – 41 с.

3. Пат. 67906, Украина. В22С 9/04. Спосіб лиття за моделями, що газифікуються / О. Й. Шинський та ін. – Опубл. 2004, Бюл. № 7.
4. Пат. 2029653, Россия. В22С 9/02. Способ непрерывного литья / В. С. Дорошенко, Н. И. Шейко. – Опубл. 1995, Бюл. № 6.
5. Формовочные материалы и технология литейной формы: Справочник / Под ред. С. С. Жуковского. - М.: Машиностроение, 1993. – 432 с.

**ДОРОШЕНКО В. С., КРАВЧЕНКО В. П.** Поступове оновлення парадигми в теорії ливарних процесів по темі взаємодії металу з піщаною формою

Сучасні ливарні процеси регулюються на базі використання термодинаміки нерівноважних процесів, величинами змінних градієнтів (перепадів) фізичних характеристик (температури, газового тиску, концентрації модельного матеріалу в піску та інших), які можуть служити основою нової парадигми в теорії ливарних процесів, взаємодії металу та піщаної форми. Наведені приклади таких способів лиття.

**DOROSHENKO V., KRAVCHENKO V.** Gradual update of paradigm in the theory of casting processes on the topic of interaction of metal with a sandy mould

Creation and improvement of metal casting methods, which are regulated the sizes of gradients (overfalls) of physical descriptions (temperature, gas pressure, concentrations of pattern material in sand et al) and present in composition their technological operations. Changing gradients is recommended on the base of the use of thermodynamics of non-equilibrium processes that fully can serve as basis of new paradigm in the theory of castings processes on the topic of improvement of metal and sandy mould. The examples of such methods of casting are resulted in the article.

**Расценки на размещение рекламы**

*(цены приведены в гривнах с учетом налога на рекламу)*

<b>2, 3 страницы обложки</b>		<b>страница внутри журнала</b>	
цветная	1400	цветная	1050
черно-белая	700	черно-белая	500
<b>1/2 страницы формата А4</b>		<b>1/2 страницы формата А4</b>	
цветная	900	цветная	800
черно-белая	500	черно-белая	450
<b>1/4 страницы формата А4</b>		<b>1/4 страницы формата А4</b>	
цветная	550	цветная	300
черно-белая	300	черно-белая	200

При повторном размещении рекламы – скидка 15 %