

УДК 621.74.04

Применение гибридных технологий в литейном производстве

Коротченко А. Ю.^{1,*}, Куца А. Ю.¹,
Тверской М. В.¹, Хилков Д. Э.¹

[*kor_15@mail.ru](mailto:kor_15@mail.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В статье рассмотрены особенности образования усадочных дефектов при использовании традиционных и аддитивных технологий литья. Раскрыты различные принципы организации питания отливок в этих группах технологий. Показаны причины, по которым аддитивные технологии не нашли пока широкого применения. В виде компромисса, предлагается развивать гибридные технологии изготовления отливок. Анализ патентов, относящихся к группе «многослойное литье», показал, что для успешного развития гибридных технологий в литейном производстве есть все условия. Рассмотрены основные способы и режимы нанесения многослойных покрытий

Ключевые слова: усадка, прибыли, аддитивные технологии, дефекты отливок

Введение

Главная задача техпроцесса изготовления отливок – получить отливку с заданными служебными свойствами, затратив (желательно) минимум времени и материальных средств. Основные служебные свойства отливок формируются на этапах заполнения жидким расплавом литейной формы и его последующего затвердевания. Один из самых распространенных дефектов, образующийся в отливке на этапе ее затвердевания – это усадочные раковины и пористость. Усадочные дефекты резко снижают служебные свойства отливок и для их ликвидации разработаны многочисленные приемы, приводящие зачастую к резкому удорожанию технологии изготовления отливок.

Цель статьи – показать новые технологии изготовления отливок, которые принципиально отличаются от традиционных технологий и вносят совершенно другие приемы, позволяющие получать отливки без дефектов усадочного характера.

Согласно принятой в статье классификации, традиционные технологии изготовления отливок – это технологии макроуровня; аддитивные технологии – это микроуровень. Гибридные технологии занимают промежуточную позицию, их можно отнести к мезоуровню рассмотрения процессов, протекающих в жидком расплаве и литейной форме.

В статье показано, что одним из примеров гибридных технологий в литейном производстве могут служить способы литья, обеспечивающие послойное заполнение жидким расплавом литейной формы, и (или) послойное затвердевание залитого в форму жидкого расплава.

В статье приведен анализ некоторых патентов, относящихся к группе «отливка слитков, из двух и более различных расплавов, т.е. многослойное литье» (B22D7/02). Дан анализ патента, разработанного в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Рассмотрены основные способы и режимы получения многослойных отливок.

Основная часть

В большинстве способов литья расплав заливают в форму за один прием, и после окончания заливки во всем объеме расплава начинается процесс кристаллизации. Процесс кристаллизации, кроме всего прочего, сопровождается объемной усадкой расплава, которую необходимо компенсировать для ликвидации таких дефектов в отливках, как усадочные раковины и пористость. Процесс компенсации усадочных дефектов называется питанием отливок.

Традиционный подход – это разработка системы питания по принципу системы с внешним управлением. В основе данной системы питания лежит известный принцип В.Е. Грум – Гржимайло: «каждый вышележащий элемент является прибылью нижележащего», который является основой для организации направленного затвердевания отливки [1,2,3].

Направленное затвердевание легко обеспечить для отливок простой конфигурации, используя, например, технологические напуски [4,5]. Для сложных по конфигурации отливок (разностенные с местными утолщениями) организовать направленное затвердевание удастся только с помощью специальных приемов, внешнего управления, среди которых широко используются прибыли и холодильники.

В связи с тем, что процесс кристаллизации зависит от очень большого числа факторов, до сих пор нет единых правил и рекомендаций, согласно которым можно гарантировать получение заданных служебных свойств конкретной отливки. До сих пор качество отливок в большой степени зависит от опыта и квалификации технологов – литейщиков, и иногда отработка техпроцесса изготовления отливки затягивается на недели, а то и месяцы.

В настоящее время активно развиваются аддитивные технологии (Additive Manufacturing - AM) или технологии послойного синтеза отливок [6,7]. К основным видам аддитивных технологий относятся такие их виды как: селективное лазерное спекание (Selective Laser Sintering - SLS); послойное наплавление металла (Selective Laser Melting – SLM); прямое лазерное спекание металлов (Direct Metal Laser Sintering – DMLS) и др.

Среди преимуществ отмечают, прежде всего, разработку принципиально новых подходов к проектированию изделий, позволяющих создавать сложные пространственные неразборные конструкции из металлов и полимерных материалов, производство которых с использованием обычных технологических методов невозможно.

По данным работы [7], мировой рынок изделий и услуг, связанных с АМ - технологиями к 2015 г. увеличится в два раза, в 2017 г. будет оцениваться в 6 млрд. долл. США, а в 2020 г. достигнет 10,8 млрд. долл. США. Лидером в области использования АМ – технологий являются США, далее идут Япония, Германия и Китай.

В [7] отмечается также, что в Великобритании для развития АМ – технологий в автомобильном секторе в 2013 г был выделен 1 млрд. ф. ст. для создания Исследовательского центра перспективного двигателестроения, основная задача которого – внедрение в производство новейших технологий для автомобильного моторостроения.

Использование АМ – технологий в биомедицине дает возможность выращивать заменители костной ткани, кровеносные сосуды. В [7] дается прогноз, согласно которому к 2030 г. с помощью АМ – технологий будут создаваться из биоматериалов отдельные органы (пищевод, трахеи, кости).

Но аддитивные технологии, кроме всего прочего, вносят коренные изменения и в разработку техпроцесса изготовления отливок. И связано это с тем, что расплав не заполняет, как прежде, форму за один прием, а геометрия отливки формируется последовательно тонкими горизонтальными слоями (слой за слоем). Причем последующий слой наносится после отверждения предыдущего.

Таким образом, нарушается основной принцип, которому следуют литейщики на протяжении веков для обеспечения направленного затвердевания отливки. При использовании аддитивных технологий отливка сложной конфигурации разбивается на множество отдельных слоев, которые никак не связаны между собой по питанию.

Здесь реализуется другой принцип, который можно сформулировать так – каждый слой питает сам себя. Усадка реализуется только в пределах каждого слоя, толщина которого варьируется в долях миллиметра. Устранить усадочные дефекты, в том виде, как мы их сейчас понимаем, в таких тонких горизонтальных слоях не представляет никаких трудностей.

Однако в настоящее время существует целый ряд обстоятельств, препятствующих широкому внедрению аддитивных технологий для производства отливок. Среди которых, прежде всего, - это высокие стоимости исходных материалов и оборудования, низкая производительность процесса.

Одно из решений данной проблемы, которое предлагается на сегодняшний день – это создание гибридных производственных процессов, которые совмещают как аддитивные, так и традиционные технологии изготовления отливок.

Для лучшего понимания места гибридных технологий можно предложить следующую аналогию. Традиционные технологии изготовления отливок – это технологии макроуровня; аддитивные технологии – это микроуровень. Гибридные технологии занимают промежуточную позицию, и их можно отнести к мезоуровню рассмотрения процессов, протекающих в жидком расплаве и литейной форме.

На макроуровне мы имеем дело с неравномерным, объемным затвердеванием расплава в сложной по геометрии отливке. На микроуровне – одновременное затвердевание расплава в тонком (равномерной толщины) горизонтальном слое.

На макроуровне – масса проблем с обеспечением заданных служебных свойств отливок (устранение усадочных дефектов и усадочной пористости) и высокая производительность процесса. На микроуровне – штучное дорогое производство без проблем усадочного характера. Можно сказать, что применение на макроуровне системы прибылей и холодильников есть расплата за высокую производительность процесса литья.

Гибридные технологии призваны нивелировать разрыв двух направлений и дать приемлемое качество литья с сопоставимыми затратами труда и времени.

Одним из примеров гибридных технологий в литейном производстве могут служить способы литья, обеспечивающие послойное заполнение жидким расплавом литейной формы, и (или) послойное затвердевание залитого в форму жидкого расплава. Здесь налицо признаки, как традиционной технологии литья, так и послойного синтеза изделий.

В работе [8] приведен анализ некоторых патентов, относящихся к группе «отливка слитков, из двух и более различных расплавов, т.е. многослойное литье» (B22D7/02). Рассмотрим ряд патентов этой группы еще раз, но обращая особое внимание на принципы и устройства, которые могут составить основу гибридных технологий изготовления отливок.

В авторском свидетельстве [9], авторы предложили для получения слитков металла установку, которая, по существу, является прототипом по принципу действия современным 3-D принтерам. Схема установки показана на рис.1.

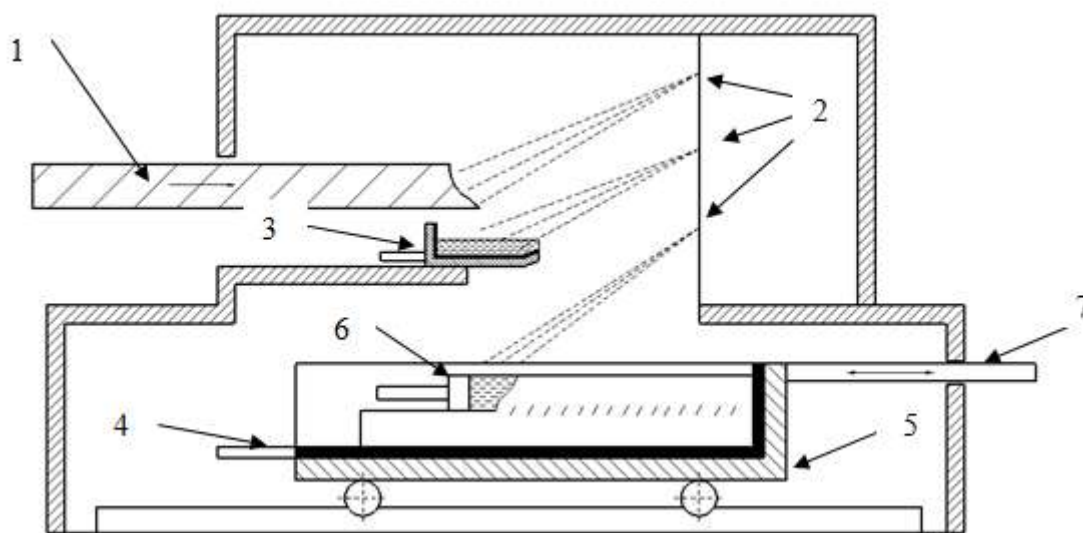


Рис.1. Схема установки для получения слитков: 1 – компактная заготовка или стружка; 2 – электронные пушки; 3 – промежуточная емкость; 4 – поддон; 5 – тележка; 6 – барьер; 7 – механизм перемещения

Установка работает следующим образом.

С помощью механизма подачи расходуемый материал в виде компактной заготовки или стружки подают в секцию плавления, где он плавится одним из электронных лучей.

После расплавления металл стекает в промежуточную емкость, где также обогревается электронным лучом, а затем попадает на поддон, ограниченный с одной стороны барьером. По мере накопления жидкой ванны металлом, поддон перемещают с помощью механизма продольного передвижения, в результате чего расстояние между неподвижным барьером и задней стенкой поддона увеличивается. Жидкий металл, выходя из зоны, облучаемой электронным лучом, начинает кристаллизоваться у задней стенки поддона, образуя первый слой слитка.

После формирования первого слоя электронные пушки выключают, барьер с помощью механизма перемещения поднимают на высоту, равную толщине первого слоя слитка, и поддон возвращают с помощью механизма перемещения в прежнее положение, включают электронные пушки и начинают формировать второй слой плоского слитка и т. д.

Таким образом, плоский слиток формируется последовательно, горизонтальными слоями. За счет перемещения поддона происходит направленное затвердевание (в горизонтальном направлении) каждого слоя слитка. Управление толщиной слитка и скоростью перемещения поддона позволяет формировать скорость затвердевания слоя, равную скорости фильтрации жидкого расплава у границы фронта затвердевания, что обеспечивает отсутствие усадочных дефектов в слитке.

В патенте [10], предлагается способ и устройство для последовательного литья металлов. Особенностью данного патента является возможность получения в кристаллизаторе двухслойных или многослойных слитков. Схема устройства показана на рис.2.

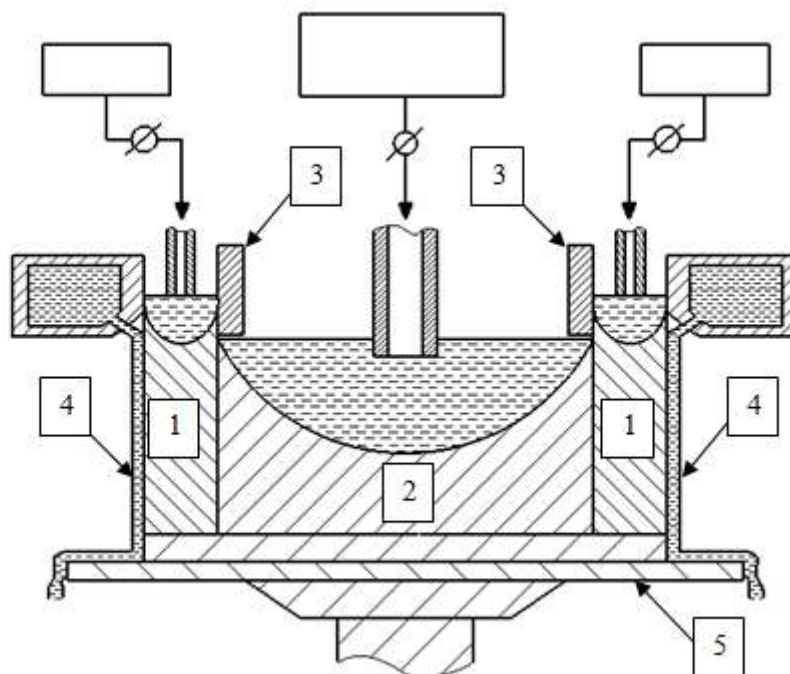


Рис.2. Схема устройства для получения слитков: 1 – наружные слои; 2 – внутренний слой; 3 – разделительные перегородки; 4 – водоохлаждаемые стенки кристаллизатора; 5 – подвижный нижний блок.

Не раскрывая конструктивные особенности всей установки, отметим только те, которые позволяют формировать слиток из нескольких слоев.

На рис.2 показана схема кристаллизатора для получения трехслойного слитка (два наружных слоя и один внутренний слой). Верхняя часть кристаллизатора разделена разделительными перегородками на три участка, по одному на каждый из трех слоев слитка. Разделительные перегородки обычно выполняют из меди (большая теплопроводность) и снабжают системой охлаждения (на рисунке не показана). Система охлаждения располагается выше уровня жидкого расплава. Таким образом, разделительные перегородки и водоохлаждаемые стенки кристаллизатора вызывают затвердевание жидкого расплава, находящегося в контакте с ними.

В процессе литья сначала заливают определенную порцию расплава для наружных слоев. После того, как наружные слои частично затвердеют, подвижный нижний блок опускают и заливают внутренний слой, расплав которого вступает в контакт с частично затвердевшими наружными слоями. При заливке внутреннего слоя уровень жидкого расплава находится чуть ниже разделительных перегородок. В патенте отмечается, что разделительные перегородки, также как и стенки кристаллизатора, могут быть подвижными (т.е. опускаться и подниматься).

В патенте [11], предложенном в МГТУ им. Н.Э. Баумана, получили свое дальнейшее развитие идеи и технические решения, рассмотренные выше. Главное отличие этого патента от остальных – это идеи и технические решения, позволяющие послойно формировать любые по геометрии отливки без усадочных дефектов. При этом прибыли для компенсации усадки не используются.

В этом патенте предлагается способ гравитационного литья фасонных отливок, в котором расплав заливают в форму отдельными частями (дозами) через заранее рассчитанные промежутки времени. Затвердевание доз расплава происходит направленно (только снизу вверх), за счет организации теплообмена между расплавом и стенками формы.

Для расчета дозы заливаемого расплава предлагается использовать принцип постоянства приведенного размера дозы R_0 (приведенный размер – есть отношение объема дозы расплава к площади ее охлаждаемой поверхности). Для этого создается 3D математическая модель отливки с помощью одной из современных CAD программ. Затем модель отливки делят на отдельные горизонтальные слои так, чтобы в каждом слое значение R_0 было постоянным в разных его частях. Проверяют это следующим образом. Отдельный горизонтальный слой модели отливки дополнительно разделяют вертикальными секущими плоскостями на части и для этих частей определяют значения R_0 , которые должны быть примерно одинаковыми (различаться не более чем на 5%). Так как значение R_0 заливаемой дозы жидкого сплава постоянное в разных ее частях, то это обеспечивает одновременное затвердевание всей залитой дозы жидкого сплава. Тем самым устраняется главная проблема при затвердевании отливок - разное время затвердевания отдельных частей отливок.

Для реализации принципа постоянства приведенного размера дозы R_0 в процессе заливки полости формы со сложной геометрией в патенте предлагаются два варианта.

Вариант 1: использование взаимонезависимых, подвижных разделительных перегородок, установленных в верхней половине литейной формы. При этом количество и размеры подвижных перегородок определяются конкретной геометрией отливки с учетом постоянства значения R_0 в пределах заливаемой дозы расплава.

Перед заливкой каждой дозы подвижные перегородки поднимают или опускают так, чтобы получить полость в форме с одинаковым приведенным размером. Когда доза расплава залита, и доля твердой фазы в ней составит $0,6 \dots 0,8$, подвижные перегородки верхней половины формы поднимают с таким расчетом, чтобы опять образовалась полость с одинаковым приведенным размером R_0 .

Вариант 2: использование дополнительных разделительных перегородок, устанавливаемых заранее в литейную форму. Количество и размеры перегородок определяются конкретной геометрией отливки с учетом постоянства R_0 , при этом перегородки формируют систему независимых полостей в литейной форме для заливки доз расплава. Ориентация перегородок в пространстве может быть любой, и они образуют с заливаемым материалом ячеистую структуру биметаллической отливки. Перегородки ставят в форму сразу все и делят отливку на ярусы для заливки доз. В каждом ярусе есть отверстия для заливки расплава (выполняется это литниковой системой). Когда доза расплава залита, и доля твердой фазы в залитой дозе составит $0,6 \dots 0,8$, заливают следующую дозу. Расплав заполняет пространство между перегородками и в конце техпроцесса получают биметаллическую отливку.

Если температура плавления перегородки больше, чем температура плавления отливки, то перегородки образуют внутренний каркас и получаются биметаллические ячеистые отливки с новыми служебными свойствами. Если же температура плавления близка к температуре плавления заливаемого расплава, то перегородки должны расплавляться только после образования доли твердой фазы порядка $0,6 \dots 0,8$ в залитой дозе расплава.

Для реализации идей, изложенных в рассмотренных выше патентах, необходимо решить как минимум две основные задачи. Первая задача – обеспечить заливку расплава в литейную форму отдельными порциями (дозами), а вторая задача – разделение литейной формы на отдельные полости. Если для решения второй задачи в патентах изложены принципы, которыми надо руководствоваться, то по первой задаче вопрос остается открытым.

Для гибридных технологий, когда мы рассматриваем процесс заливки расплава на мезоуровне, можно предложить варианты литейной технологии, связанные с организацией ярусных литниковых систем.

Ярусные литниковые системы (ЯрЛС) позволяют организовать заливку расплава отдельными порциями в заранее определенные области литейной формы. Однако для этого надо решить целый комплекс задач: определить необходимое число элементов, входящих

в ЯрЛС; рассчитать расходные характеристики этих элементов таким образом, чтобы жидкий расплав поступал в литейную форму в заданной последовательности, с нужной скоростью и в необходимом объеме.

Решение такого класса задач невозможно без численного моделирования процессов, имеющих место при заполнении жидким расплавом литейной формы. На кафедре «Литейные технологии» в течение многих лет используется пакет программ Flow 3D, который считается одним из лучших в мире по вопросам гидродинамики. Ниже приведены некоторые результаты моделирования, которые свидетельствуют о сложности задачи обеспечения правильной работы ЯрЛС.

На рис.3 показана простейшая схема заполнения расплавом литейной формы с использованием ЯрЛС.

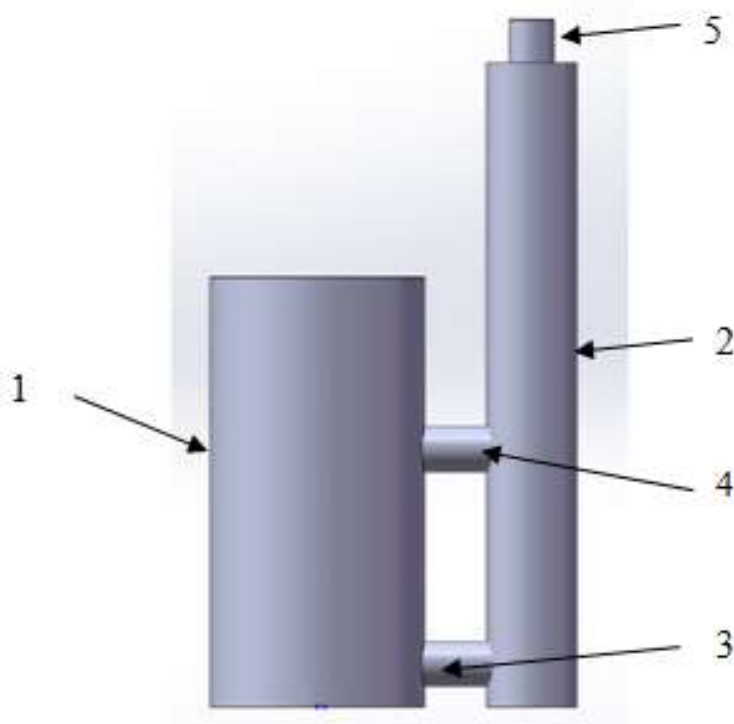
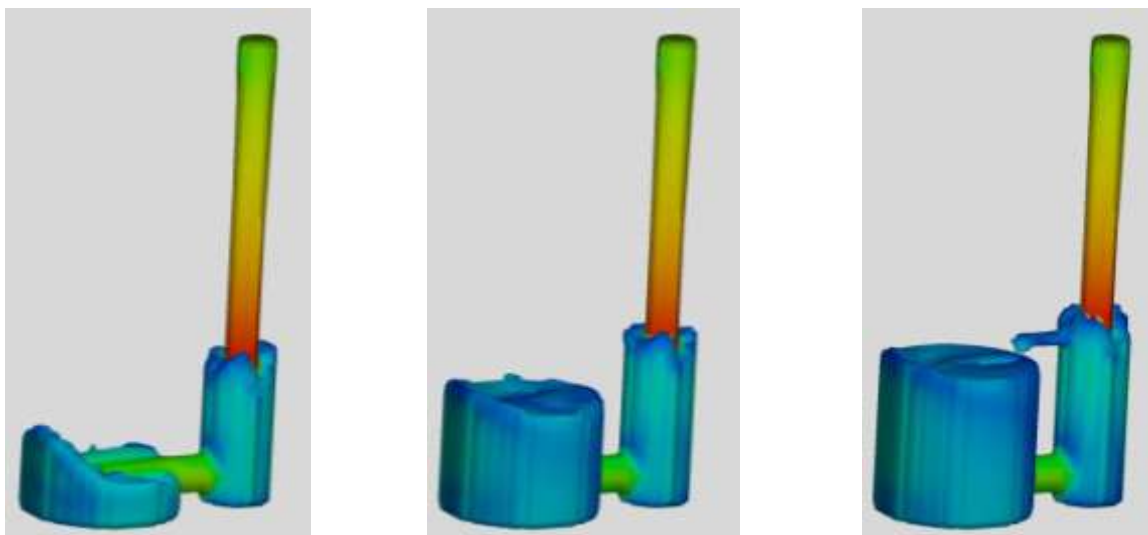


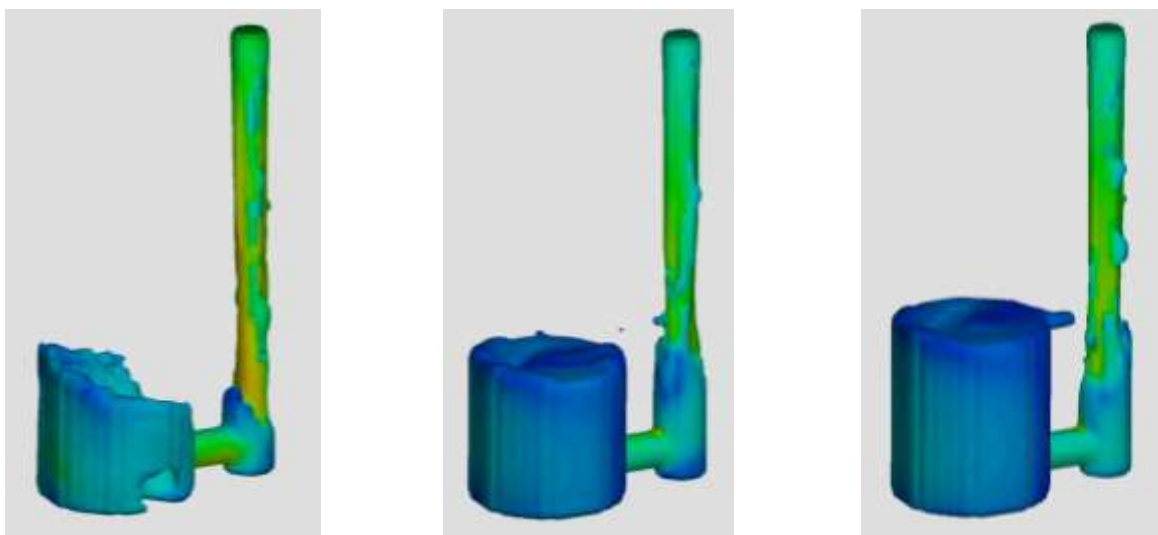
Рис.3. Схема отливки с ярусной литниковой системой: 1 – отливка; 2 – распределительный стояк; 3 – нижний ярус; 4 – верхний ярус; 5 – компактная струя на входе в стояк

Согласно схеме, отливка должна заполняться последовательно, снизу вверх. В начальные моменты времени расплав должен поступать только через нижний ярус питателя, а затем одновременно через нижний и верхний ярусы.

Расчеты показали, что данный режим работы ЯрЛС возможен только при строго определенных соотношениях площадей поперечного сечения компактной струи на входе в стояк $F_{кс}$, распределительного стояка $F_{рс}$ и нижнего питателя $F_{нп}$. На рис.4 показаны результаты расчета при разных соотношениях площадей указанных элементов.



а) первый вариант



б) второй вариант

Рис.4. Результаты расчетов при разных соотношениях площадей ЯрЛС

На рис.4 показаны последовательно фрагменты заполнения расплавом литейной формы. Видно, как разные соотношения площадей ЯрЛС приводят к совершенно разным режимам течения расплава. В первом варианте сначала работают нижние питатели, затем включаются в работу верхние питатели. Во втором варианте расплав наоборот поступает из отливки в распределительный стояк, что недопустимо в реальных условиях литья.

Таким образом, использование современных САМ систем, наряду с теоретическими и практическими наработками в области послойного заполнения и затвердевания расплава в форме создают все предпосылки для успешного развития гибридных технологий в литейном производстве.

Заключение

1. Рассмотренные патенты показывают, что в настоящее время создана база для успешного развития гибридных технологий в литейном производстве.
2. Гибридные технологии изготовления отливок позволяют в течение переходного периода (периода смены традиционных технологий) обеспечить новое качество отливок без существенного удорожания техпроцесса их изготовления.

Список литературы

1. Белов В.Д., Пикунов М.В., Тен Э.Б., Соловьев В.П., Колтыгин А.В., Матвеев С.В., Сироткин С.А., Горбунов В.А., Лактионов С.В., Базлова Т.А., Коновалов А.Н., Фадеев А.В. Литейное производство / под ред. В.Д. Белова. 3-е изд., перер. и доп. М.: Изд. Дом МИСиС, 2015. 487 с.
2. Трухов А.П., Сорокин Ю.А., Ершов М.Ю., Благоданов В.П., Минаев А.А., Гини Э.Ч. Технология литейного производства: Литье в песчаные формы / под ред. А.П. Трухова. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 528 с.
3. Чуркин Б.С. Теория литейных процессов: Учебник. / под ред. Э.Б. Гофмана. Екатеринбург. Изд. РГПУ, 2006. 454 с.
4. Назаратин В.В. Технология изготовления стальных отливок ответственного назначения. М.: Машиностроение, 2006. 234 с.
5. Коротченко А. Ю., Тверской М. В., Хилков Д. Э. Методика расчета пористости при направленном затвердевании отливок // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 5. С.351-359. DOI: [10.7463/0514.0709914](https://doi.org/10.7463/0514.0709914)
6. ВИАМ: конференция по аддитивным технологиям // Nano News Net: сайт о нанотехнологиях. Режим доступа: <http://www.nanonewsnet.ru/articles/2015/viam-konferentsiya-po-additivnym-tekhnologiyam> (дата обращения 19.01.2016).
7. Справка о развитии аддитивных производственных технологий в Великобритании. Режим доступа: http://prom.tularegion.ru/netcat_files/7645/9712/h_8ef5b02124b06204264e9a6a6ac00b0a (дата обращения 19.01.2016).
8. Тверской М.В., Хилков Д.Э. Анализ и классификация способов послойного заполнения литейной формы // Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 3. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/769090.html> (дата обращения 24.12.2015).
9. Патон Б.Е., Прянишников ИС., Мовчан Б.А., Жучин В.Н., Топилин В.В., Перепелица И.В., Тихоновский А.Л., Курапов Ю.А., Мисюра Р.С., Кучеренко П.П. Установка для получения слитков металла: а.с. 302964 СССР. 1977. Бюл. №45. 4 с.

10. Вагстафф Р.Б. Ривз Э.У., Фентон У.Дж., Бурмэн Дж. Способ и устройство для последовательного литья металлов, имеющих близкие температурные интервалы кристаллизации: пат. 2497628 Российская Федерация. 2013.
11. Коротченко А.Ю. Способ гравитационного литья фасонных отливок: пат. 2444415 Российская Федерация. 2012. Бюл. №7. 5 с.

Hybrid Technology Used in Foundry

A.J. Korotchenko^{1,*}, A.Yu. Kutsaya¹,
M.V. Tverskoy¹, D.E. Khilkov¹

[*kor_15@mail.ru](mailto:kor_15@mail.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: shrinkage, risers, additive technology, defects of castings

The paper presents the ways to eliminate shrinkage defects of casting nature. These techniques are, primarily, technological overlaps, risers and refrigerators. The paper shows that these methods are based on the known principle of feeding, according to which the upper layers of the casting is the risers for the underlying layers. This provides directional solidification of casting.

The paper describes the additive technologies that solve problems, which are unobtainable for conventional casting technologies. It shows that the thin horizontal layers form a casting configuration sequentially. Here is realized another principle of feeding that is formulated as follows: each layer feeds itself. There is no difficulty to eliminate shrinkage defects in thin horizontal layers.

However, high cost of raw materials and equipment and low productivity disallow wide introduction of additive technologies to manufacture castings.

One solution to this problem, which is offered to-date is to create hybrid-manufacturing processes that combine both additive and traditional manufacturing techniques of casting.

Traditional manufacturing techniques of castings are macro-level technologies while the additive technology is a micro level. Hybrid technologies, which are in intermediate position, can be attributed to a meso-level of the review of processes occurring in the liquid melt and mold.

The paper has shown that the casting techniques that provide layer-by-layer filling of liquid melt in the mold and (or) layer-by-layer solidification of liquid melt in the mold can serve as one of the examples of hybrid technology in foundry.

The paper analyses some of the patents related to the group of "casting ingots of two or more different melts, i.e. multilayer » (B22D7 / 02). It conducts an analysis of the patent developed in BMSTU.

The main conclusions are as follows:

1. At present, there is a base created for a successful development of hybrid technology in the foundry industry.

2. Hybrid technology allows the casting production for a period of transition (the period of changing traditional technology) to provide a new quality of castings.

References

1. Belov V.D., Pikunov M.V., Ten E.B., Solov'ev V.P., Koltygin A.V., Matveev S.V., Sirotkin S.A., Gorbunov V.A., Laktionov S.V., Bazlova T.A., Kononov A.N., Fadeev A.V. *Liteinoe proizvodstvo* [Foundry production]. Moscow, Izd. Dom MISiS, 2015. 487 p. (in Russian).
2. Trukhov A.P., Sorokin Yu.A., Ershov M.Yu., Blagonravov V.P., Minaev A.A., Gini E.Ch. *Tekhnologiya liteinogo proizvodstva* [Foundry technology: Molding in sandy forms]. Moscow, Izdatel'skii tsentr «Akademiya» Publ., 2005. 528 p. (in Russian).
3. Churkin B. S. *Teoriya liteinykh protsessov* [Theory of foundry processes]. Yekaterinburg. Isd. RGPPU, 2006. 454 p. (in Russian).
4. Nazaratin V.V. *Tekhnologiya izgotovleniya stal'nykh otlivok otvetstvennogo naznacheniya* [Manufacturing techniques of steel castings of responsible appointment]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2006. 234 p. (in Russian).
5. Korotchenko A. Yu., Tver M. V., Hilkov D. E. Porosity design procedure at the directed solidification of castings. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Bauman = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014. No. 5. pp. 351-359 (in Russian). DOI: [10.7463/0514.0709914](https://doi.org/10.7463/0514.0709914)
6. VIAM: conference on additive technologies. *Nano News Net*: website. Available at: <http://www.nanonewsnet.ru/articles/2015/viam-konferentsiya-po-additivnym-tekhnologiyam>, accessed 19.01.2016. (in Russian).
7. *Spravka o razvitii additivnykh proizvodstvennykh tekhnologii v Velikobritanii* [The certificate of development of additive production technologies in Great Britain]. Available at: http://prom.tularegion.ru/netcat_files/7645/9712/h_8ef5b02124b06204264e9a6a6ac00b0a, accessed 19.01.2016. (in Russian).
8. Tverskoi M.V., Khilkov D.E. Analysis and classification methods layer-by-layer mold filling. *Molodezhnyi nauchno-tekhnicheskii vestnik MGTU im. N.E. Bauman = Youth Science and Technology Herald of the Bauman MSTU*. 2015. No. 3. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/769090.html>, accessed 24.12.2015. (in Russian).
9. Paton B. E., Pranishnikov I. S., Movchan B. A., Gucin V. N., Topilin V. V., Perepelitsa I. V., Tikhonovskaya, A. L., Kurapov Yu. A., Misyura R. S., Kucherenko P. P. *Ustanovka dlya polucheniya slitkov metalla* [Installation for producing ingots of metal]: a. s. 302964 of the USSR. 1977, Bull. No. 45. 4 p. (in Russian).
10. Vagstaff R.B. Rivz E.U., Fenton U.Dzh., Burmen Dzh. *Sposob i ustroystvo dlya posledovatel'nogo lit'ya metallov, imeyushchikh blizkie temperaturnye intervaly kristallizatsii* [Method and device for successive casting of metals having similar thermal inter-shafts crystallization]: Pat. 2497628 Russian Federation, 2013. (in Russian).

11. Korotchenko A. Y. *Sposob gravitatsionnogo lit'ya fasonnykh otlivok* [Method gravity casting of shaped castings]: Pat. 2444415 Russian Federation. 2012. Bull. No. 7. 5 p. (in Russian).