



A number of scientifically grounded technical decisions, the whole set of which has enabled to create technological processes of production of high-quality cast bars of mass appointment is offered.

А. Н. КРУТИЛИН, И. В. ЗЕМСКОВ, Г. И. СТОЛЯРОВА, М. В. ОСАДНИК, БНТУ

УДК 621.74

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК МАССОВОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Использование специальных методов для изготовления литых заготовок должно решаться на основе сравнения технико-экономических показателей существующей и предлагаемой технологии с учетом изменения эксплуатационных характеристик изготавливаемых из заготовок деталей. В случае если замена возможна и экономически целесообразна, традиционные методы заменяют специальными методами литья, которые позволяют получать литые заготовки ограниченной номенклатуры с высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Существенные преимущества непрерывных методов литья предопределили высокий интерес специалистов в области литейного производства к разработке и использованию этих процессов для получения литых заготовок в машиностроении. Увеличение выхода годного литья до 85–90%, снижение припусков на механическую обработку, улучшение качества заготовок, возможность автоматизации и механизации производства, улучшение условий труда способствуют значительному расширению области применения непрерывных методов литья при литье деталей из различных металлов и сплавов. Наибольший интерес представляют литые заготовки из чугуна, являющегося наиболее дешевым и распространенным конструкционным материалом.

В настоящее время разнообразные способы непрерывного литья широко применяются в металлургической промышленности для получения слитков из стали, цветных металлов и сплавов. Однако, несмотря на наличие в отечественной и зарубежной научно-технической литературе большого количества патентной информации, технических предложений, попытки использовать научные и технические разработки в области непрерывного литья стали, цветных металлов и сплавов

для получения фасонных заготовок из чугуна для нужд машиностроения не дали желаемых результатов. Отчасти поэтому непрерывное литье чугуна все более отдаляется от непрерывной разливки и превращается в специальный способ литейного производства.

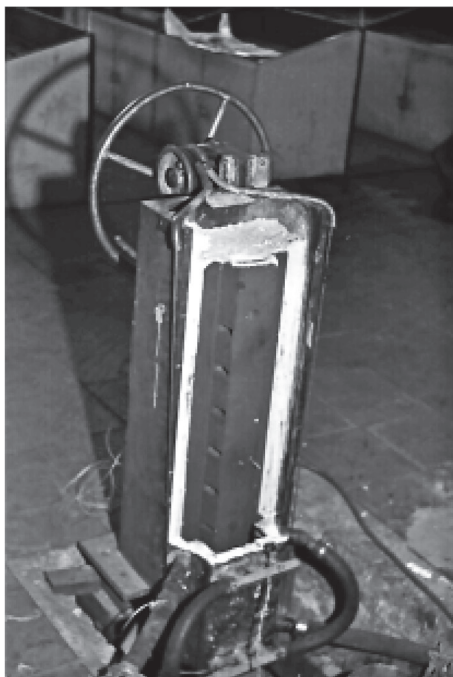
Дальнейшее совершенствование известных и разработка новых методов непрерывного литья возможны только на основе тщательного теоретического и экспериментального исследования тепловых процессов, происходящих при формировании отливки, изучения их металлургических и технологических особенностей.

В данной работе предложен ряд научно обоснованных технических решений, совокупность которых позволила создать технологические процессы изготовления высококачественных литых заготовок массового назначения.

Научным руководителем данного направления являлся д-р техн. наук, проф. В. И. Тутов. Под его руководством удалось значительно расширить область использования непрерывных способов литья, довести до промышленного внедрения способ полунепрерывного литья машиностроительных заготовок с использованием разрушаемых стержней.

На основании анализа существующих способов определены наиболее перспективные принципиальные схемы литья заготовок поршневых колец, гильз цилиндров, сепараторов подшипников и других деталей машино- и станкостроения, экспериментально доказана возможность их практического осуществления.

В 1972 г. в Белорусском политехническом институте были начаты исследования процесса вертикального литья заготовок с использованием разрушаемых стержней. Для определения принципиальной возможности использования разрушаемых стержней в непрерывных способах литья и прове-



а



б

Рис. 1. Лабораторные установки полунепрерывного литья заготовок с использованием разрушаемых стержней

дения экспериментальных исследований процесса были изготовлены экспериментальные установки, представленные на рис. 1, а, б.

Установка (рис. 1, а) состоит из металлического корпуса, на боковых стенках которого выполнены направляющие в виде продольных пазов. В пазы вставлен кристаллизатор, на котором находится литниковая система, предназначенная для подачи жидкого металла. Внутри корпуса вставляется стержень. Кристаллизатор имеет возможность перемещения вдоль корпуса установки и стержня. Между стержнем и кристаллизатором остается зазор по форме сечения отливки. Формирование отливки происходит с одной стороны от стержня с другой от кристаллизатора. На установке впервые получена реальная деталь «рейка строгального станка», изучены механизмы формирования отливки, способы подвода металла, тепловые особенности процесса.

Проверку принципиальной возможности получения непрерывным литьем полых отливок, цилиндрического и коробчатого сечения проводили на установке, показанной на рис. 1, б. Установка состоит из верхней и нижней плит, соединенных между собой четырьмя направляющими стойками. С одной стороны установки проводили экспериментальные исследования получения различных заготовок в полунепрерывном варианте. Для этого использовали винтовой привод, смонтированный на нижней плите. На верхней плите располагается кристаллизатор и направляющее устройство для центровки стержней. В зазор между стержнем и кри-

сталлизатором через заливочное устройство подавали жидкий металл и, перемещая подвижный стол, осуществляли протяжку отливки со стержнями. После получения отливки заданной длины кристаллизатор убирали, поднимали полученную заготовку и отделяли ее от заправки. Процесс литья осуществляли в полунепрерывном варианте.

Второй ручей установки использовали для определения принципиальной возможности непрерывного процесса литья полых мерных цилиндрических заготовок с использованием разрушаемых стержней. Для этого установка была оборудована тянущими валками, закрепленными на второй паре стоек. В кристаллизатор вводили стержни с фланцами-перемычками, разделяющими получаемую отливку на мерные части. Ниже валков отливку разламывали по перемычкам, постоянно подавая в кристаллизатор жидкий металл и наращивая сверху стержни.

Использование песчаных стержней позволяет получать отливки со сложной внутренней поверхностью, переменного по длине сечения, с внутренними ребрами, выступами и полостями вплоть до сквозных отверстий и карманов. Появляется возможность отливки заготовок сложного замкнутого коробчатого сечения типа станин, стоек, хоботов, значительно облегчается литье полых цилиндрических заготовок. На рис. 2 показаны различные виды заготовок, полученных в ходе лабораторных исследований.

Экспериментальные исследования позволили доказать принципиальную возможность получе-

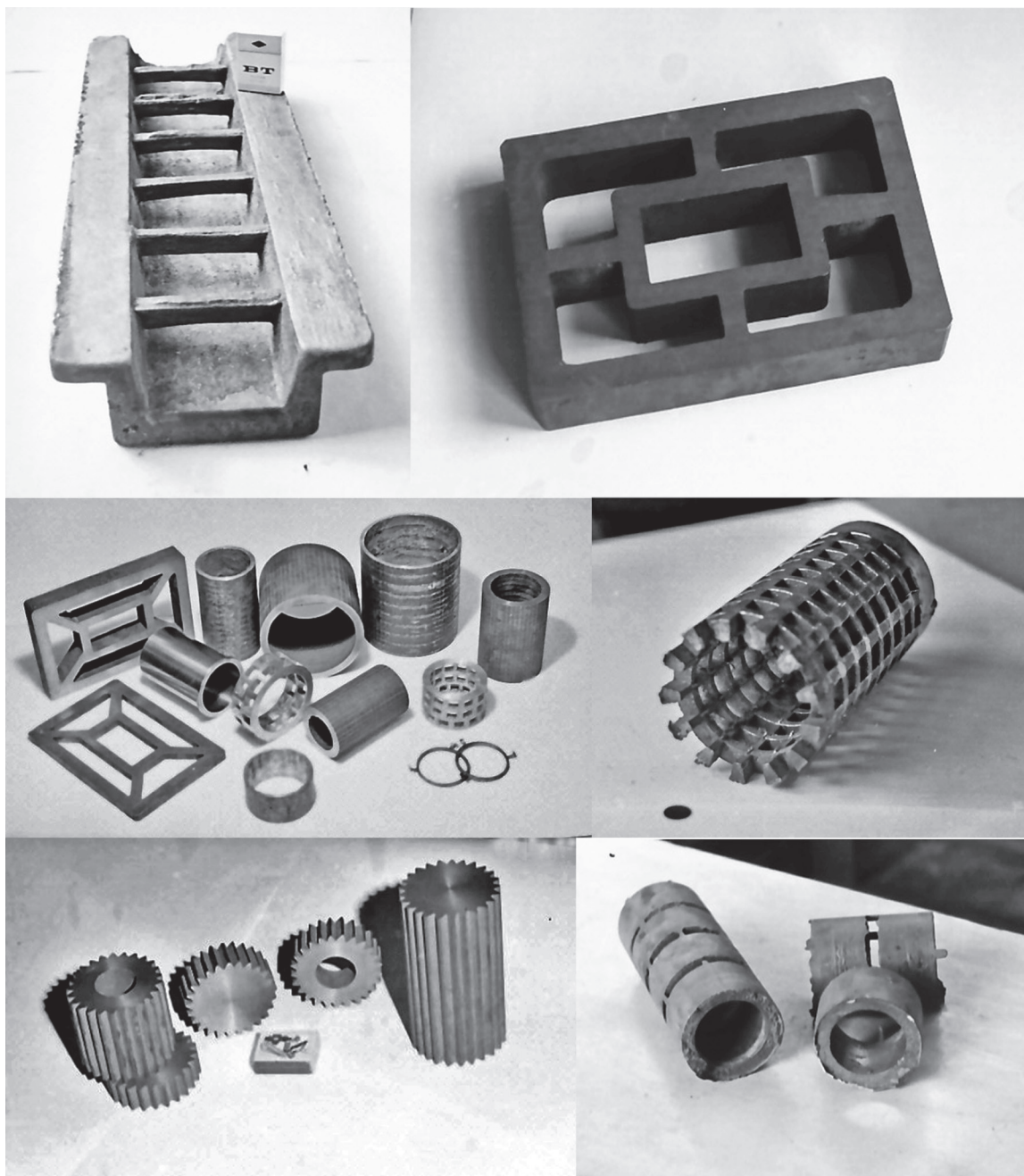


Рис. 2. Отливки, полученные на лабораторных установках непрерывного литья с использованием разрушаемых стержней

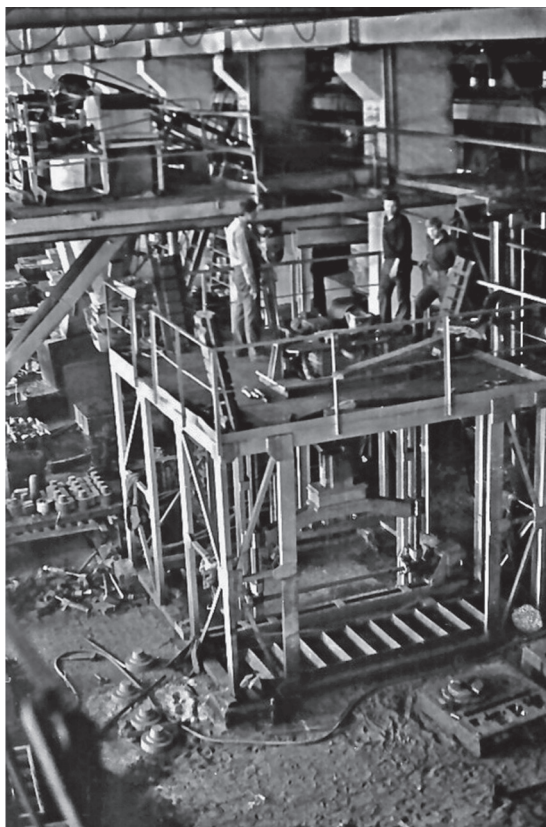
ния качественных заготовок цилиндрического и коробчатого сечения, провести серию экспериментов по отработке технологии, исследования тепловых и металлургических параметров процесса, разработать конструкции кристаллизаторов и другой оснастки, т. е. выполнить весь объем работ, необходимый для последующей разработки промышленной технологии и оборудования.

Проведенный анализ кинетики затвердевания отливок позволил установить характер и скорость затвердевания, которые определяют стабильность процесса и оказывают большое влияние на формирование структуры и свойств литых заготовок, получить исходные данные для практической раз-

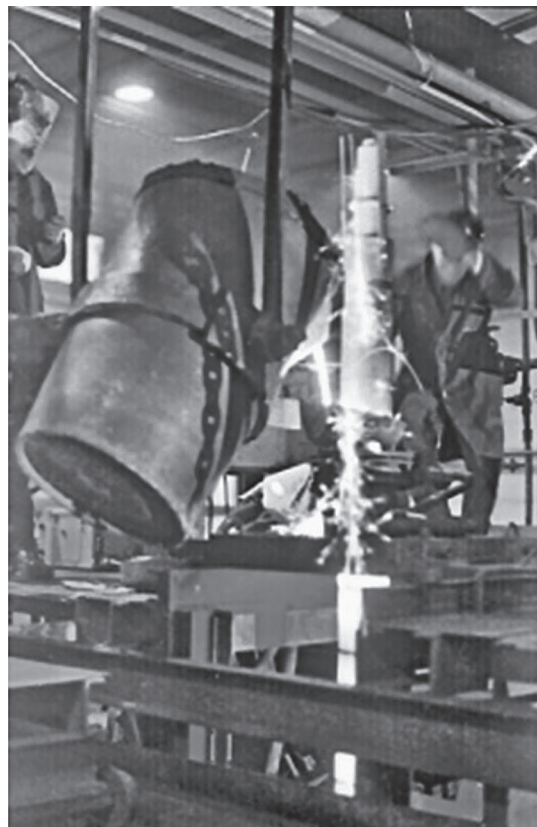
работки конкретных технологических процессов и оборудования.

Широкая номенклатура заготовок машиностроения, которые можно получать методом вертикального непрерывного литья с использованием разрушаемых стержней или без них, привели к необходимости создания специальных литейных машин различного назначения. В зависимости от номенклатуры получаемых заготовок и конструкции применяемых машин процесс вертикального литья можно реализовать как в полунепрерывном, так и непрерывном вариантах.

На ПРУП «МЗОР» (рис. 3, а) изготовлена и установлена опытно-промышленная установка, на ко-



а



б

Рис. 3. Опытно-промышленные установки: а – ПРУП «МЗОР»; б – Каунасский завод «Центролит»

торой разработана технология литья заготовок из чугуна сложной конфигурации.

Первая опытно-промышленная установка непрерывного литья полых мерных заготовок опробована на Каунасском литейном заводе «Центролит». Установка выполнена в напольном варианте в виде сварной конструкции, на которой смонтировано направляющее устройство для установки и ввода стержней в кристаллизатор, тянущего устройства в виде приводных и прижимных роликов и механизма разделения заготовок на мерные части. Заливку металла производили из кранового заливочного ковша через специальный желоб при постоянном наращивании стопки стержней в направляющем устройстве. На установке получены полые мерные заготовки размерами 120×84×220 мм. Внешний вид установки и рабочий момент литья показаны на рис. 3, б.

Промышленные испытания показали работоспособность машины даже при наличии некоторых конструктивных недоработок, ее высокую производительность (до 200 шт. заготовок в час). Одновременно были выявлены значительные трудности эксплуатации машин непрерывного типа, связанные с необходимостью непрерывной подачи жидкого металла, сменой заливочных ковшей, уборкой из-под машины отлитых заготовок, непрерывной подачей стержней. Установки такого

типа могут эксплуатироваться лишь в условиях специализированного производства при строгом согласовании работы с плавильным, стержневым и очистным оборудованием.

На установках непрерывного литья разделение заготовок на мерные части происходит непосредственно в ходе процесса, что создает необходимость увеличения общей высоты литейной машины, особенно при получении массивных отливок. Применение таких установок целесообразно лишь в случае получения заготовок толщиной стенок до 20–25 мм, при использовании разделительных фланцев, затвердевание которых заканчивается при незначительном удалении от кристаллизатора.

Проще и надежнее в эксплуатации, легче komponуются с действующим оборудованием литейных цехов машиностроительных заводов установки полунепрерывного литья. Разработана конструкция ряда оригинальных установок для получения заготовок различной номенклатуры.

В установке полунепрерывного литья крупных заготовок (до 600 мм в сечении) сьем заготовок и простановку стержней осуществляют мостовым краном или специальной кран-балкой. Для удобства удаления заготовки кристаллизатор убирают с технологической оси. Рабочий момент литья крупногабаритных заготовок гильз цилиндров судовых двигателей (наружный диаметр заготовок

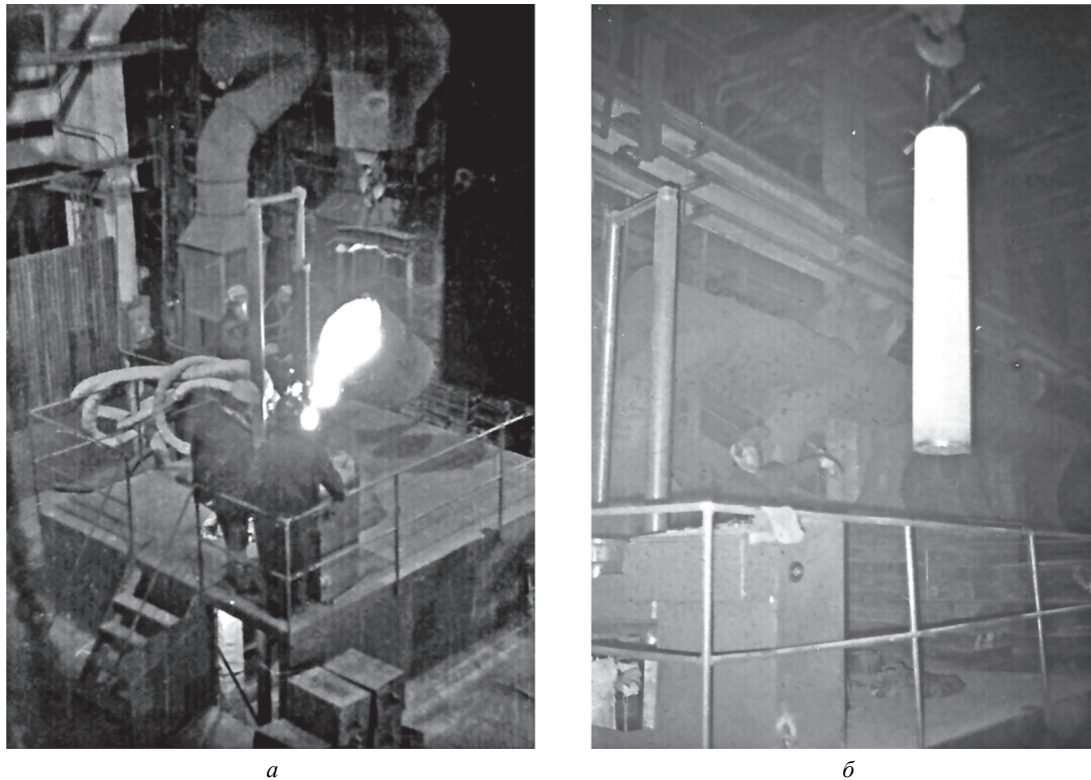


Рис. 4. Процесс заливки (а) и снятие полученной заготовки (б) на установке в литейном цехе ППСО «Приморремрыбфлот»

265–580 мм, толщина стенки 40–80 мм) на установке в литейном цехе ППСО «Приморремрыбфлот» (г. Находка) и транспортировка готовой заготовки показаны на рис. 4. Площадь, занимаемая установкой, – 3,5×2,5 м, производительность – 2–5 съем/ч.

Установки для мелких и средних заготовок (максимальный габаритный размер в сечении 80–250 мм) являются специальными и универсальными, различаются конструкцией механизмов удаления заготовок и подачи стержней. В специализированных установках, предназначенных для одного типоразмера заготовок, предусмотрено осуществление полного цикла, включая подачу стержней в кристаллизатор, отсоединение отливки от затравки, возврат затравки с подвижным столом в исходное положение в автоматическом режиме.

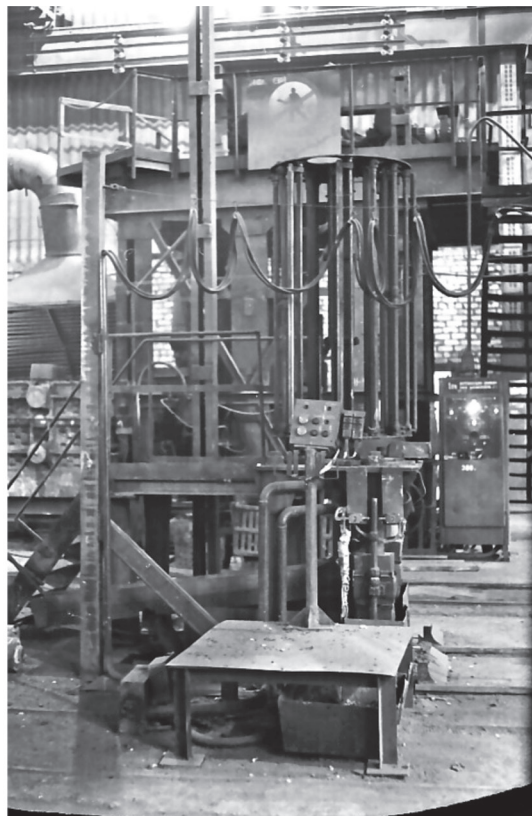
Процесс получения полых мерных заготовок внедрен на Дружковском машиностроительном заводе для получения грундбуks и поршней, являющихся деталями механизированных крепей, используемых в шахтах. Номенклатура отливоk ограничена четырьмя типоразмерами, наружный диаметр – 100 и 120 мм, толщина стенки – 25 и 30 мм, высота – 70–100 мм. Материал отливоk – антифрикционный чугун. Работа на установке осуществляется следующим образом. В начальный момент подвижный стол с затравкой поднят в верхнее положение, затравка введена в кристаллизатор, на нее установлена стопка стержней, размещенная в од-

ной из направляющих колонн поворотного магазина. Через желоб из заливочного ковша, находящегося в специальном заливочном стенде, жидкий металл подают в полость кристаллизатора и начинают протяжку. При приближении подвижного стола к основанию установки заливку прекращают. Отливка выходит из кристаллизатора и ложится на приемный желоб. Затем меняют направление движения подвижного стола на обратное. При движении вверх отливка переводится из вертикального положения в горизонтальное и выдается на уровень пола. Происходит отделение отливки от затравки, она по роликам желоба скатывается в приемную емкость. Затравка возвращается в вертикальное положение и входит в кристаллизатор. Далее цикл литья повторяется. На рис. 5, а показан рабочий момент заливки на специализированной установке в литейном цехе Дружковского машиностроительного завода. Установка занимает небольшую площадь, имеет рабочий ход 1900–2200 мм и обеспечивает производительность 5–10 съем/ч.

Разработанные процессы, технология и оборудование полунепрерывного литья заготовок машиностроения прошли широкую опытно-промышленную проверку и внедрены на заводах различных отраслей: на Липецком заводе «Центролит», Минском заводе автоматических линий для получения широкой номенклатуры заготовок из чугуна, Восточно-Казахстанском ВОСТОКМАШ заводе (г. Усть-Каменогорск) для изготовления загото-



а



б

Рис. 5. Специализированные установки полунепрерывного литья: а – установка полунепрерывного литья (Дружковский машиностроительный завод); б – универсальная установка

вок из нержавеющей стали X18H9T и бронзы БрС30. Внешний вид универсальной установки представлен на рис. 5, б.

Один из серьезных вопросов при непрерывном литье чугуна связан с процессом структурообразования. Регулирование структуры и свойств чугунных непрерывнолитых заготовок является крайне важной и наиболее трудно решаемой задачей, ограничивающей применение способов непрерывного литья в машиностроении.

Специфические условия охлаждения, а именно высокая скорость затвердевания в кристаллизаторе и значительное снижение интенсивности охлаждения отливки на выходе из кристаллизатора, оказывают существенное влияние на структурообразование отливок. Одновременно с задачей повышения механических свойств и улучшения структуры внутренних зон отливки приходится решать задачу по предотвращению образования отбела и сокращению зоны с междендритным графитом.

Для определения оптимальных тепловых, технологических и металлургических параметров, обеспечивающих получение заданных структуры и свойств непрерывнолитой заготовки, необходимо прежде всего изучить структурные превращения, происходящие в специфических условиях форми-

рования отливки во время затвердевания и дальнейшего охлаждения.

Использование воздушного или водовоздушного охлаждения позволяет регулировать интенсивность охлаждения в достаточно широких пределах. Анализ полученных результатов показывает, что, используя различные варианты вторичного охлаждения, можно менять интенсивность охлаждения отливки от $\alpha = 150\text{--}250 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ при естественном охлаждении на воздухе до $1,7 \text{ МВт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ при водоструйном охлаждении. Интенсивное охлаждение при литье чугуна со скоростью $5\text{--}8 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ в интервале температур $950\text{--}650 \text{ }^\circ\text{C}$ может быть успешно применено после окончания затвердевания для стабилизации перлита в структуре отливки.

Применение экранирования примерно вдвое уменьшает интенсивность охлаждения отливки по сравнению с естественным охлаждением на воздухе и еще более расширяет пределы регулирования процесса формирования отливки.

Наиболее перспективно использовать данный технологический процесс для изготовления литых заготовок из высокопрочного чугуна с шаровидной формой графита.

Результаты теоретического анализа и экспериментальных исследований явились научной основой для создания новых малоотходных технологи-

ческих процессов и оборудования для их промышленной реализации с целью получения машиностроительных заготовок из чугуна методами непрерывного литья [1, 2].

Одними из наиболее ответственных тяжело нагруженных деталей двигателей, работающих на износ в условиях длительного воздействия знакопеременных нагрузок и повышенных температур, являются поршневые кольца.

В настоящее время в мировой практике производства заготовок поршневых колец преобладают два способа литья. Получение индивидуальной и маслотной заготовки из серого и высокопрочного чугуна в песчаные формы и центробежный способ литья, предназначенный, главным образом, для получения маслотных заготовок из высокопрочного чугуна. Технологию получения индивидуальной заготовки используют для получения колец диаметром до 250 мм, от 250 до 450 мм индивидуальным и маслотно-механическим способом, свыше 450 мм предпочтение отдается маслотно-механической заготовке. Химический состав чугуна выбирается в зависимости от способа получения литой заготовки, требований по физико-механическим свойствам и структуре.

Наилучшие показатели по физико-механическим и эксплуатационным свойствам поршневые кольца имеют в случае изготовления литых заготовок, в максимальной степени приближающихся по конфигурации к готовому изделию.

Технологический процесс индивидуальной отливки заготовок поршневых колец стопочным методом является наиболее отработанным. Припуски под механическую обработку 0,3–0,5 мм на сторону. Выход годного при индивидуальном методе литья заготовок поршневых колец не превышает 40%. Коэффициент использования металла в зависимости от типоразмера заготовок находится в пределах 0,4–0,6. К достоинствам индивидуального способа литья заготовок поршневых колец следует отнести минимальные припуски под механическую обработку, низкую трудоемкость механической обработки, высокую производительность процесса. Однако при этом способе имеет место неравномерность свойств по периметру заготовки, дефекты в виде нарушения конфигурации, газовые и усадочные раковины, неметаллические включения.

Способ литья маслотно-механической заготовки используется, главным образом, для получения заготовок из высокопрочного чугуна. Маслоты отливают с радиальным припуском под механическую обработку 2,5–3,0 мм и уклоном 0,5–0,7. Для ликвидации усадочной раковины сверху устанавливают при-

быль, которая составляет до 20% общего объема заготовки, что значительно снижает выход годного литья. Металлическая основа формируется за счет термической обработки. Основными недостатками способа литья маслотно-механической заготовки являются низкий выход годного литья, повышенный расход модификатора, нестабильность микроструктуры, наличие неметаллических включений.

При центробежном способе литья маслотно-механической заготовки отпадает необходимость в операциях по удалению литников, выпоров, прибылей. Припуск на механическую обработку составляет обычно 4 мм по наружному и 3–5 мм по внутреннему диаметру. Заготовки получают отбеленной или половинчатой структуры, поэтому их подвергают высокотемпературному отжигу. После предварительной обточки и расточки маслот их разрезают на индивидуальные заготовки и подвергают термической обработке с целью получения необходимой структуры. Центробежный способ литья не позволяет получать профильные заготовки в поперечном сечении. Это приводит к неравномерному по периметру припуску на механическую обработку. Имеет место ликвация элементов, случаи получения заготовок с внутренними дефектами в виде неметаллических включений и раковин. Плотность отливки, а также структура изменяются по толщине заготовки. При центробежном способе литья поршневых колец неоднородность распределения химических элементов по их сечению проявляется в большей степени по сравнению с литьем в стопочных песчаных формах. Существенным недостатком центробежного способа литья является низкий коэффициент использования металла (0,14–0,2), выход годного литья не превышает 85%.

Несмотря на хорошую организацию производства, соблюдение технологических параметров литья, тщательный контроль шихтовых и формовочных материалов, высокую степень механизации и автоматизации, брак при литье традиционными способами во многих случаях превышает 5%.

Ввиду несовершенства традиционных способов литья, постоянного повышения требований к качеству заготовок, необходимости экономии материальных, топливных и энергетических ресурсов ведутся поиски новых прогрессивных технологических процессов производства высококачественных заготовок поршневых колец.

Одним из наиболее перспективных для получения заготовок поршневых колец является способ литья, заключающийся в погружении песчаных форм в расплав.

В Белорусском национальном техническом университете разработан способ литья погруже-

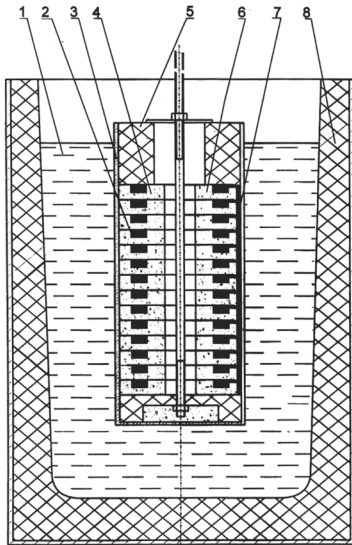


Рис. 6. Принципиальная схема процесса: 1 – расплав; 2 – отливка; 3 – огнеупорная вставка; 4 – промывник; 5 – надставка; 6 – форма; 7 – питатель; 8 – раздаточная емкость

нием [3], принципиальная схема которого показана на рис. 6.

Тонкостенные (5–10 мм) кольцевые одностенные формы, изготовленные из стержневой смеси, с помощью специального приспособления собирают в блоки. Заполнение и питание заготовок происходит при погружении форм в расплав через один или несколько литников, выходящих на наружную поверхность формы. Питание заготовок происходит непосредственно из ванны расплава до ее полного затвердевания, после окончания кристаллизации заготовки незатвердевший металл из питателей попадает обратно в печь.

Совершенствование и разработка комплексной ресурсосберегающей технологии литья затрагивает все стадии изготовления начиная от теоретического анализа процесса формирования заготовок в характерных для способа условиях до чисто практических вопросов, связанных с использованием процесса в производстве.

Экспериментальные исследования в силу сложности происходящих в процессе затвердевания процессов не позволяют определить количественные взаимосвязи между технологическими параметрами процесса. На протяжении достаточного длительного времени на основании экспериментальных исследований определены оптимальные технологические параметры процесса при литье заготовок из серого низколегированного и высокопрочного чугуна.

За счет активного воздействия на скорость затвердевания и охлаждения в различные периоды формирования отливки предлагаемый технологический процесс обеспечивает получение заготовок

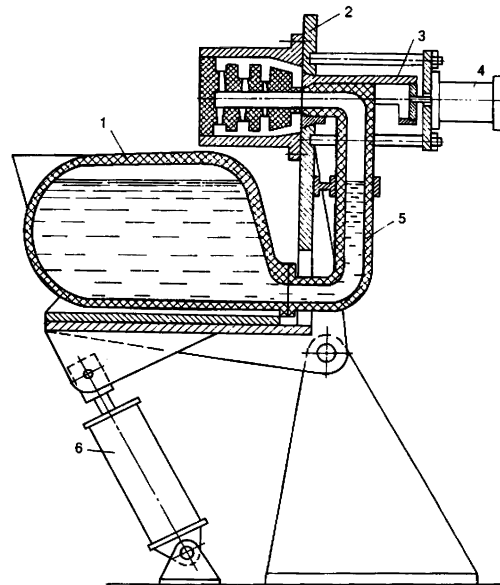


Рис. 7. Принципиальная схема процесса: 1 – металлоприемник; 2 – плита для крепления форм; 3 – гильза для выталкивания отливки; 4 – пневмоцилиндр; 5 – металлопровод; 6 – механизм поворота

без структурно-свободного цементита с требуемым уровнем физико-механических свойств без применения энергоемкой термической обработки. Оптимальные тепловые условия формирования обеспечивают равномерность твердости по периметру заготовки. Физико-механические свойства и микроструктура удовлетворяют требованиям технических условий на поршневые кольца. Возможно получение одинарных литых заготовок из высокопрочного чугуна доэвтектического состава, свободных от дефектов усадочного происхождения. Значительно сокращаются безвозвратные потери металла, так как нет необходимости использовать большое количество отходов производства, составляющих более 40% при традиционной технологии литья.

Замена традиционной технологии литья индивидуальных заготовок поршневых колец в песчано-глинистые формы на способ литья погружением позволяет при высокой производительности процесса увеличить выход годного до 85–95%, значительно упростить и удешевить технологический процесс.

Для изготовления фасонных заготовок представляет интерес технологический процесс разделения твердой и жидкой фаз [4]. Принципиальная схема процесса представлена на рис. 7.

Процесс литья осуществляется следующим образом. Расплав с помощью заливочного ковша заливают в металлоприемник. Стержни устанавливают в форму, при повороте металлоприемника металл по металлопроводу поступает в форму и заполняет ее. После выдержки металла в форме,



Рис. 8. Отливки, полученные методом разделения твердой и жидкой фаз: *а* – заготовки сепараторов подшипников; *б* – стержневой ящик, стержни, поршневые кольца

необходимой для полного затвердевания отливки, металлоприемник возвращают в исходное положение. Незатвердевший металл по металлопроводу стекает в металлоприемник и используется в последующих циклах литья. Уровень металла в металлоприемнике поддерживают в заданных пределах. Металлоприемник футерован огнеупорным кирпичом, может иметь систему подогрева металла.

Сифонная подача расплава в форму практически исключает формирование в отливке раковин экзогенного характера. Благоприятные условия формирования отливок способствуют получению высоких механических и эксплуатационных свойств отливок.

Метод разделения твердой и жидкой фаз песчаными стержнями может быть широко использован для производства отливок практически из любых сплавов. Проведены экспериментальные исследования с целью получения разработанным способом отливок из чугуна, сплавов на основе меди и алюминия.

По результатам исследований гидродинамических и тепловых параметров процесса разработан технологический процесс литья сепараторов подшипников с использованием разрушаемых стержней. По сравнению с центробежным литьем повышается производительность процесса, увеличивается выход годного, коэффициент использования металла возрастает от 16 до 38%. Процесс легко поддается механизации и автоматизации. На рис. 8, *а* показаны отливки сепараторов подшипников, полученные по данной технологии.

Разработанный метод литья может также успешно использоваться при производстве отливок поршневых колец (рис.8, *б*), гильз цилиндров, различных по габаритам и конфигурации втулок и т. д.

Применительно к литью заготовок массового назначения, таких, как поршневые кольца, гильзы

цилиндров, мелющие тела, данная технология позволяет использовать в технологическом процессе полупостоянные и постоянные формы.

Разработанная схема осуществления процесса, заключающаяся в сифонном заполнении формы жидким металлом и использовании металла незатвердевшего остатка при следующих циклах литья, позволяет получать качественные литые заготовки при существенном сокращении затрат металла на литниковую систему и прибыли. Выход годного металла возрастает до 90%.

Независимо от рода сплава разработанный способ увеличивает выход годного литья, позволяет сократить объем механической обработки, улучшает свойства литых заготовок и повышает производительность процесса литья. Преимущества способа обуславливают технико-экономическую целесообразность его широкого внедрения в литейное производство.

Широкому применению специальных методов литья способствуют специализация и кооперация производства, на основе которых становится возможным создание специализированных цехов по производству отливок узкой номенклатуры с использованием наиболее выгодного для данного класса отливок специального способа литья. Особое развитие получают способы, которые легко вписываются в поточное производство, обеспечивают широкое применение механизации и автоматизации производственных процессов.

Однако при внедрении этих процессов в производство следует иметь в виду, что, как и большинство других специальных способов литья, способы непрерывного литья требуют более высокой организации культуры производства, более жесткого соблюдения технологической дисциплины, чем традиционные методы литья в песчаные формы.

Литература

1. Т у т о в В. И. Разработка малоотходных процессов непрерывного литья заготовок машиностроения из чугуна: дис. ... д-ра техн. наук. Минск, 1987.
2. К р у т и л и н А. Н. Разработка процесса вертикального непрерывного литья полых машиностроительных заготовок из чугуна: дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1987.
3. Т у т о в В. И., С т о л я р о в а Г. И. и др. Метод получения индивидуальной отливки поршневого кольца // Республ. межвед. сб. «Металлургия». Минск, 1978. № 12. С. 45–47.
4. З е м с к о в И. В. Разработка и исследование метода разделения твердой и жидкой фаз для получения фасонных машиностроительных заготовок: дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1979.