

В.В. Ясюков, канд. техн. наук, приват-профессор, доц. кафедры технологии и управления литейными процессами,
e-mail: odessa810@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6453-5712>

Т.В. Лысенко, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой технологии и управления литейными процессами,
e-mail: tvl12odessa@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3183-963x>

О.И. Воронова, приват-доцент, ст. преподаватель кафедры технологии и управления литейными процессами,
e-mail: olgaliptuga@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2976-0794>

Л.И. Солоненко, канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры технологии и управления литейными процессами,
e-mail: solonenkoli14@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2092-8044>

Одесский национальный политехнический университет, Одесса, Украина

Анализ способов повышения эффективности литейного производства

Технологический выход годного отливок (ТВГ) и коэффициент использования металла литых деталей (КИМ) являются индикативными показателями уровня развития литейного производства. Указанные аспекты направления дальнейшего развития литейного производства рассматриваются в сфере создания новых и совершенствования существующих технологических процессов формообразования, плавки и способов литья. Наиболее острыми проблемами в решении этих задач являются следующие: снижение массы литых деталей за счет тщательной конструкторско-технологической проработки геометрии детали, выбора сплава с учетом особенностей литейной технологии, использования компьютерного моделирования, организации гидродинамического процесса заполнения формы жидким металлом с учетом формирования потоков непосредственно в форме, интенсификации работы прибылей, повышения свойств сплавов в процессе плавки; повышение геометрической точности отливок путем внедрения новых методов формообразования, формовочных материалов; организационные мероприятия по снижению потерь металла в литейных цехах; широкое внедрение термической обработки отливок различными способами для различных сплавов; расширение номенклатуры композиционного литья, позволяющего синтезировать отдельные элементы отливки, отвечающие требованиям эксплуатационной надежности; повышение профессионального уровня специалистов, работающих непосредственно в цехах, в НИИ, ВУЗах, НАН Украины; создание имиджа привлекательности профессии литейщика улучшением условий труда, экологической и санитарно-гигиенической ситуации за счет применения новых материалов и технологий; активное внедрение наноматериалов в технологические процессы, позволяющее резко повысить механические и служебные свойства отливок; синтез новых, более эффективных производственных процессов на базе аддитивных технологий с использованием 3D-принтеров. Рассмотренные технологические процессы решают эту двуединую задачу.

Ключевые слова: технологический выход годного отливок, коэффициент использования металла литых деталей, эксплуатационная надежность литой детали, геометрическая точность литой детали, литейное производство.

Актуальность работы. Одной из важнейших областей техники, определяющей уровень металлоемкости национального дохода, является литейное производство, которое по праву считается основной заготовительной базой машиностроения. Кроме литейного производства базовыми производителями заготовок деталей являютсяковка, штамповка, сварка, общая доля которых составляет около 35 % объема. Поэтому существенное уменьшение массы литых деталей, повышение эксплуатационной надежности литья, в первую очередь для транспортных средств, является актуальной задачей. Резервы в этом направлении весьма значительны: современные литые конструкции в Украине превышают расчетные в 1,5–2 раза, в то время как в Западной Европе этот показатель составляет 1,3–1,5 раза [1]. При этом, несмотря на достаточно высокий коэффициент использования металла, представляющий отношение массы готовой детали к расходу

металла на исходную заготовку в отливках (0,53 против 0,42 при ковке, 0,43 при штамповке и 0,55 при сварке), ТВГ по-прежнему низкий (69 % против 88 % при ковке, 82 % при штамповке, 81 % при сварке) и нестабильный: в зависимости от сплава и конфигурации отливки колеблется в пределах 45–80 % от переплавленного металла. В этой связи концепция совершенствования литейного производства должна отражать решение двуединной задачи: с одной стороны, обеспечить геометрическую точность и эксплуатационную надежность литой детали с минимальной массой и максимальным КИМ; с другой стороны, повысить выход годного отливок технологическими и организационными методами. Здесь следует учитывать не только литейный передел, но и последующую механическую обработку отливок.

Постановка задачи. Указанные аспекты направления дальнейшего развития литейного производства рассматриваются в сфере создания новых и

совершенствования существующих технологических процессов формообразования, плавки и способов литья. Показателями эффективности должны быть: производительность труда, условия и привлекательность работы литейщиков. Показателями качества работы – заданное качество отливок. Эти показатели могут быть достигнуты при наличии научно-технического потенциала технологии литья, который складывается из деятельности научных коллективов различных НИИ, вузовских ученых и производителей.

Целью работы является обобщение существующего научно-производственного и организационного опыта повышения КИМ и ТВГ литья, а также использование новых технологических процессов, направленных на решение этой задачи.

Сущность и методы исследования. Анализ существующих производственных и синтез новых, более эффективных процессов, должен базироваться на содружестве конструктора и технолога-литейщика, которые, зная характерные особенности литых деталей (пониженная прочность, различные механические показатели в разных участках отливки, склонность к образованию дефектов и напряжений), должны учитывать их в конструкции и технологии литья. Сюда относятся:

- 1) выбор толщины стенки деталей, обладающих неодинаковой прочностью в поперечном сечении из-за различия в условиях кристаллизации (рис. 1) [2];
- 2) необходимая жесткость и прочность при минимальной толщине стенки, а также снижение массы. Обеспечивается ребрением, приданием детали выпуклых, сводчатых, сферических и тому подобных форм;
- 3) геометрия отливки. Должна обеспечивать беспрепятственное извлечение модели из формы и стержня из стержневого ящика;
- 4) ужесточение величины формовочных уклонов. Должно выполняться за счет более широкого внедрения конструктивных уклонов и наладки формовочного и стержневого оборудования (перекосы, горизонтальное смещение полуформ, контакт соударяющихся поверхностей и т. д.);
- 5) уменьшение массы отливок, например, замена серого чугуна с пластинчатым графитом на высокопрочный с шаровидным графитом;
- 6) снижение внутренних напряжений в стенках отливки за счет изменения конструкции: в коробчатой

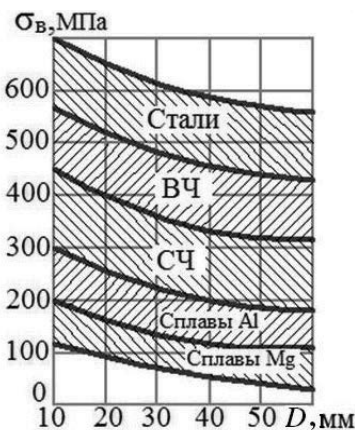


Рис. 1. Зависимость прочности сплавов от толщины стенки отливки; D – толщина стенки, мм

отливке (рис. 2, а) с внутренней перегородкой к концу остывания возникают двухосные напряжения – растяжения в перегородке и реактивные напряжения сжатия в стенках. Для уменьшения усадочных напряжений целесообразно вводить, например, усадочные буфера (гофрированная стенка) (рис. 2, б) или делать криволинейную перегородку (рис. 2, в).

Уменьшение усадочных напряжений в отливках из низкоуглеродистых сталей, например, стали 20ГЛ, применяемой для деталей вагонного литья [3], является важным фактором, влияющим на образование горячих трещин. В процессе эксплуатации эти детали работают в области переменных циклических и динамических нагрузок; наличие горячих трещин в изотропном литом материале, который обладает повышенной сопротивляемостью разрушениям при разновекторном объемном нагружении благодаря геометрии отливок с развитыми внутренними полостями, приводит к разрушению и авариям на железной дороге. Для определения усадочных напряжений в коробчатой отливке примем, что перегородка (рис. 2, а) остывает позднее стенок отливки, то есть $S_1 > S_2$. Расчет ограничим рассмотрением деформаций по оси x . К концу остывания перегородка должна укоротиться на величину $\lambda_1 = \alpha l(t_1 - t_0)$, а стенки на величину $\lambda_2 = \alpha l(t_2 - t_0)$, где l – длина стенок по оси x ; α – коэффициент линейного расширения; t_0 – конечная температура остывания отливки; t_1 – температура перехода металла перегородки из пластичного в упругое состояние; t_2 – температура стенки отливки, при которой металл уже находится в упругом

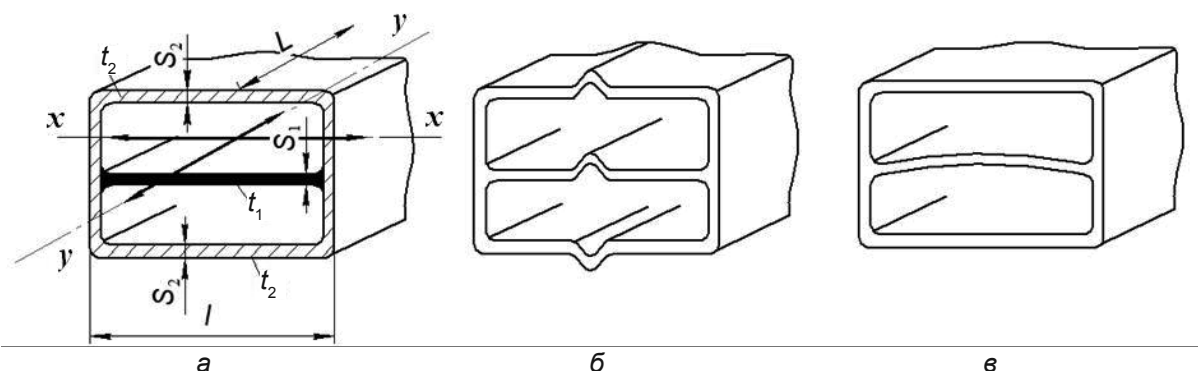


Рис. 2. Возникновение усадочных напряжений в отливках: а – схема; б – усадочные буфера (гофрированная стенка); в – криволинейная перегородка

состоянии. При дальнейшем охлаждении металл перегородки подвергается растяжению, а стенки – сжатию. Разность изменения размеров $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2 = \alpha l(t_1 - t_2)$ определяет напряжения в отливке, то есть участки отливки, остывающие раньше, подвергаются сжатию, а участки, остывающие позднее, – растяжению. Согласно закону Гука:

$$\Delta l = \alpha l(t_1 - t_2) = \frac{Pl}{EF_1} + \frac{Pl}{EF_2}, \quad (1)$$

где P – сила, возникающая в системе; E – среднее значение модуля нормальной упругости материала в интервале температур $t_1 - t_0$; F_1 и F_2 – площади сечений соответственно перегородки и стенок, нормальных к оси x ($F_1 = S_1L$; $F_2 = S_2L$).

Сила:

$$P = \frac{E\alpha(t_1 - t_2)}{\frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2}}. \quad (2)$$

Напряжение растяжения в перегородке:

$$\sigma_1 = \frac{P}{F_1} = \frac{E\alpha(t_1 - t_2)}{1 + \frac{F_1}{F_2}}. \quad (3)$$

Напряжение сжатия в стенках:

$$\sigma_2 = \frac{P}{F_2} = \frac{E\alpha(t_1 - t_2)}{1 + \frac{F_2}{F_1}}. \quad (4)$$

Отношение напряжений:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{F_2}{F_1}. \quad (5)$$

Таким образом, основной причиной усадочных напряжений является различие температур элементов отливки. Если $t_1 = t_2$, то напряжения равны нулю. На этом основан принцип одновременного затвердевания отливки, который закладывается при разработке технологии и обеспечивается активным управлением скорости охлаждения [4]. Этот метод позволяет снижать массу отливок без ущерба эксплуатационной надежности. В противовес этому методу для отливок с пониженными литейными свойствами применяется способ направленного затвердевания, при котором стенки отливки прогрессивно утолщаются кверху. При этом нижние сечения питаются жидким металлом из расположенных выше сечений; недостатками этого способа являются утолщение отливки и увеличенный расход металла.

Приведенный выше расчет напряжений (в качестве примера) может использоваться для отливок простой формы и небольших габаритов со свободной усадкой; в случае крупногабаритных отливок сложной конфигурации с затрудненной усадкой целесообразно пользоваться компьютерным моделированием [5].

При конструктивной проработке литых деталей целесообразно облегчать их удалением металла из малонагруженных участков, находящихся в стороне от силового потока. Примеры такого облегчения приведены на рис. 3: (а, б) – фланец многоугольной формы взамен круглой; двутавровый рычаг (в) облегчается удалением неработающих средних участков тавра (з). Облегчение удалением лишнего металла на мелких деталях и отдельных участках приводит к значительной экономии массы машин и механизмов.

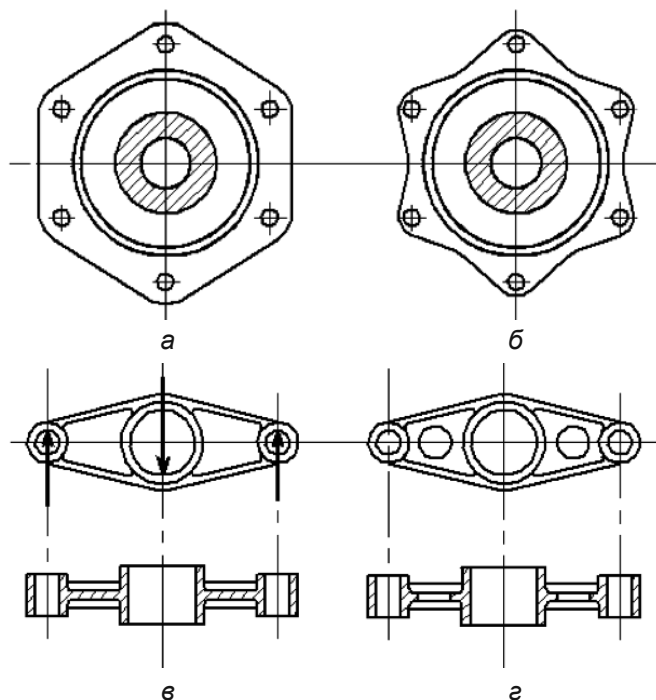


Рис. 3. Примеры облегчения отливок: а – фланец многоугольной формы; б – фланец с выкружками; в – двутавровый рычаг; г – двутавровый рычаг с удалением неработающих средних участков тавра; облегчение болтового пояса фланца (а) достигает 30 %, болтового пояса фланца (б) – 40 %

Большое влияние на качество отливок и экономию металла оказывают литниковая система и установка прибылей и выпоров. Организация гидродинамического процесса заполнения формы жидким металлом должна решаться равномерным заполнением при ламинарном движении; улавливанием неметаллических включений; отсутствием инжекции газов в полость литейной формы; определением необходимых размеров и соотношения площадей поперечных сечений литниковых каналов при минимальном возможном расходе металла на литники; сохранением необходимой направленности затвердевания отливки с последующим, по возможности, равномерным ее остыванием и свободной усадкой. Изучение гидродинамики формирования потоков металла непосредственно в форме может производиться в сочетании физического и математического моделирования с использованием ЭВМ и учетом оптимальных параметров заливки форм. Эти исследования могут послужить основой разработок новых технологических процессов получения качественного литья, снижения брака и экономии металла.

В процессе затвердевания и кристаллизации питание отливок осуществляется жидким металлом

прибылей, которые, кроме основного их назначения – восполнения объемной усадки, являются выпором и резервуаром, в который могут всплывать экзо- и эндогенные включения [6, 7, 8]. Экономия металла на прибылях оценивается объективным показателем расхода металла на отливку, определяющим степень совершенства технологического процесса производства (ТВГ). Это отношение массы отливки к массе жидкого металла, израсходованного на одну отливку,

и умноженное на 100, то есть $\text{ТВГ} = \frac{M_{\text{отл.}}}{M_{\text{ж.м.}}} \cdot 100\%$. Мас-

са жидкого металла принимается без учета потерь на сплески, сливы из ковша, происходящие при прогреве стопорного стакана, остатка в ковше после заливки последней формы и брака отливок. Это может достигаться такими способами:

- применением закрытых прибылей вместо открытых;
- при выборе геометрической формы предпочтительнее шаровые прибыли [9], поскольку шаровидная форма имеет наименьшее отношение поверхно-

$$V_{\text{ш}} = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{1}{6} \pi D^3; F_{\text{ш}} = \pi D^2.$$

Модель прибыли из пенополистирола выполняет эту задачу с минимальными затратами на оснастку, несмотря на поглощение тепловой энергии расплава при термодеструкции пенополистироловой модели: при заливке формы чугуном при 1300–1350 °С моделью поглощается 14,44 МДж/кг, а сталью при 1550–1600 °С – 20,5 МДж/кг;

- теплоизоляцией стенок формы, окружающих прибыль, с использованием формовочных материалов с низким коэффициентом аккумуляции тепла $b_{\text{ф}}$, например, форма с облицовкой из хромомagneзита или хромистого железняка ($b_{\text{ф}} = 4000 \text{ Вт}\cdot\text{с}^2/\text{м}^2\cdot\text{°С}$) заменяется облицовкой из песчано-глинистой смеси ($b_{\text{ф}} = 1700 \text{ Вт}\cdot\text{с}^2/\text{м}^2\cdot\text{°С}$). Объем прибыли при этом уменьшается на 20–25 % при той же эффективности питания;

- использованием прибылей, действующих под атмосферным или газовым давлением. В первом случае в закрытую прибыль устанавливается цилиндрический газопроницаемый стержень диаметром 12–15 мм, который своим внутренним концом доходит до предполагаемого центра усадочной полости. Таким образом, при кристаллизации внешней корки прибыли жидкий металл внутри не изолирован от атмосферного давления, которое осуществляется через стержень. Во втором случае в полость прибыли устанавливается трубка с газотворным материалом (как правило, CaCO_3 + уголь или кокс). Выделение газов за счет прогрева смеси теплом жидкого металла должно начинаться только после образования на поверхностях стенок отливки и прибыли корки затвердевшей стали достаточной толщины. Расчет давле-

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{P_1 V_1}{T_1}, \quad (6)$$

ния газов в прибыли производится по формуле Клапейрона – Менделеева:

где V_0 – первоначальный объем СО, полученного при разложении патрона; P_0 – давление данной массы газа; T_0 – первоначальная абсолютная температура газа; V_1 – объем газа при температуре нагрева патрона; P_1 – давление газа при температуре нагрева; T_1 – абсолютная температура газа после нагрева. Использование таких прибылей позволяет увеличить ТВГ на 12–18 %;

- для широкоинтервальных сплавов, например, алюминиево-магниевого, характерна склонность к образованию газоусадочных раковин, что снижает прочностные параметры, эксплуатационную надежность отливок. Эта проблема может быть решена путем комплексного воздействия [10] воздушного давления на жидкий и кристаллизующийся металл в сочетании с направленной кристаллизацией, создаваемой проточными наружными холодильниками при литье в керамизированные формы. Эффективность этого предложения для сплава АЛ21-1: пористость литья по шкале ВИАМ снижается с 5 до 1–2 класса; прочностные и пластические характеристики возрастают: $\sigma_{\text{в}}$ – на 20 %, δ – на 32 %; расход металла на прибыли сокращается на 18 %;

- для отливок, имеющих большую усадку, применяются закрытые прибыли с различными видами подогрева. Значительная экономия металла обеспечивается при использовании экзотермических смесей для обогрева прибылей стального, цветного и крупного чугуна литья. Технологическое решение этой задачи заключается в установке перегородки (диафрагмы) между отливкой и прибылью. Диафрагма изготавливается из керамики твердофазного спекания и может быть плоской либо фигурной с полостью, в которой размещается экзотермическая смесь [11, 12, 13]. Такое устройство позволяет повысить ТВГ на 15–25 % без ущерба качества питания. Кроме того, такие диафрагмы облегчают отделение прибыли от отливки. Это особенно важно для высоколегированных сталей из-за низкой теплопроводности и большой вероятности образования трещин при огневой резке.

Одной из основных характеристик литейных сплавов являются неметаллические включения (НВ) и газы, в значительной степени определяющие комплекс свойств отливок. В зависимости от характера и природы включений – экзо- или эндогенных, степени чистоты сплавов и их газосодержания, механические свойства отливок существенно изменяются. С уменьшением количества НВ растет КСЧ, $\sigma_{\text{в}}$, δ . Механические свойства сплавов заметно снижаются при наличии газовых раковин, пористости, флокенов и других дефектов. Борьба с НВ и газами ведется в следующих направлениях [14]:

- разработка и внедрение нормативно-технической документации, ужесточающей содержание вредных примесей в сплавах;
- подготовка квалифицированных специалистов-литейщиков, проектирующих и поддерживающих технологические процессы на современном уровне;
- освоение прогрессивных методов анализа фазового состава и морфологии включений;
- внедрение мероприятий по очистке сплавов от НВ после рафинирования;

– интенсификация различных способов окислительного периода при плавке;

– внедрение новых форм модифицирования и окончательного раскисления, внепечной обработки расплавов. В борьбе с экзогенными включениями целесообразно использовать керамизированные литейные формы и литье в низкотемпературные формы. Эти мероприятия позволяют повысить прочность и пластичность сплавов, а за счет этого уменьшить массу отливки.

Качество отливок, оцениваемое только свойствами сплавов, недостаточно для определения эффективности, характеризующейся КИМ. Геометрическая точность при этом имеет большое значение: это размерная точность, шероховатость поверхности, пространственные отклонения и точность конфигурации. Если идти по пути повышения геометрической точности только механической обработкой, то на стружку мы теряем 18–20 % массы литья, что и происходит в настоящее время и приводит к большим материальным затратам и потере металла. Кроме того, нужно учитывать, что снятие поверхностных слоев отливки заметно ухудшает ее механические, физические и химические свойства. Наибольшую геометрическую точность обеспечивают специальные способы литья; однако около 85 % всего литья изготавливается в разовые песчаные формы, что не обеспечивает высокую точность отливок. При решении этой задачи не следует добиваться универсальности процесса, обеспечивающего все четыре параметра: для каждого вида литья приоритетным является один из параметров. Например, для корпусного литья это размерная точность, для лопастных колес – качество поверхности, которое оказывает непосредственное влияние на ряд эксплуатационных свойств необработанных отливок, – таких, например, как механические свойства, химическая стойкость, гидравлические потери, теплопроводность. К этим свойствам можно отнести обрабатываемость отливок с учетом припусков на механическую обработку, способность воспринимать лакокрасочные покрытия, эмали и наплавки.

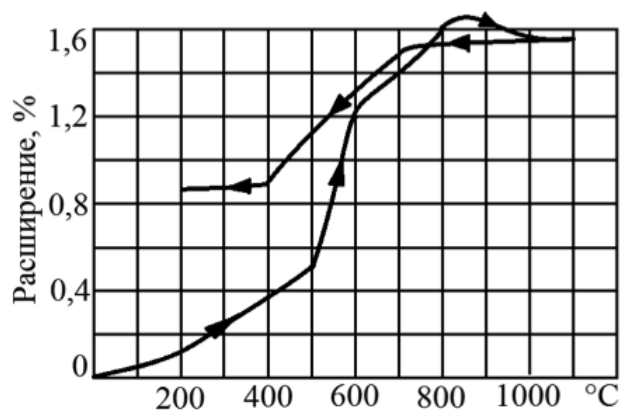
В производственных условиях литейного цеха снизить потери металла можно следующими мероприятиями: контроль массы отливок в сравнении с расчетными из-за больших литейных уклонов, увеличения толщины стенок, большого брака литья; снижение угара и безвозвратных потерь жидкого металла; ограничение механических потерь металла при вывозке отработанной смеси путем магнитной сепарации; уменьшение слива металла в шлаковню; внедрение методов неразрушающего контроля пороков отливок; организация участков по исправлению брака литья; входной контроль за качеством исходных материалов для всех звеньев технологического процесса изготовления отливок (формовочные материалы, шихта, специальные добавки, снижающие отбел и пригар отливок, облегчающие операции по скачиванию шлака в индукционных печах или выбивку отливок из песчано-жидкостекольных смесей, покровно-рафинирующие флюсы и дегазирующие добавки для цветного литья). Также необходимо контролировать теплоизолирующие и экзотермические

смеси, позволяющие повысить ТВГ [15]. Эти и другие мероприятия позволяют экономить от 5 до 15 % металла от годовой завалки.

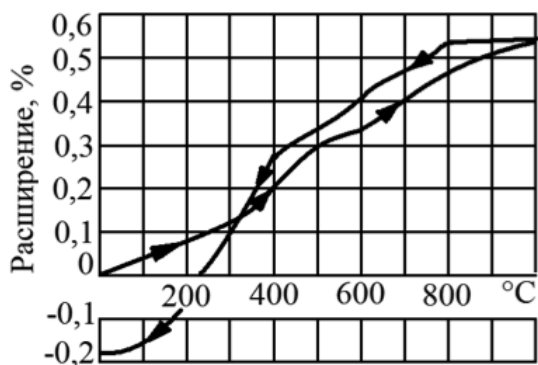
Действенным средством снижения массы литья является повышение прочности термической обработкой. Наиболее распространенным является отжиг для улучшения механических свойств, снятия внутренних напряжений в литье. Как правило, после отжига может следовать нормализация, закалка с отпуском, старение, стабилизация структуры и другие виды термообработки (ТО). Выбор способа и режимов ТО зависят от марки сплава и условий эксплуатации литых деталей.

Значительный экономический и социальный эффект достигается при замене кварцевого песка на оливиновый при изготовлении отливок из различных сплавов и применении различных технологий. Оливин представляет собой изоморфную смесь форстерита $2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$ и фаялита $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$. Для формовочных песков используют оливиновые породы с содержанием фаялита до 10 %, так как огнеупорность оливина с увеличением содержания железа понижается с 1890 до 1750 °С. Эти пески используют для производства отливок из стали, тугоплавких и титановых сплавов. Оливиновые пески более огнеупорны, чем кварцевые, вместе с тем они обладают значительно меньшим коэффициентом температурного расширения (рис. 4), чем кварцевые, благодаря чему этот песок представляет наибольшую ценность для получения отливок с поверхностями малых шероховатостей и без пригара [16]. Санитарно-гигиенические условия труда работающих в литейных цехах значительно улучшаются при использовании оливиновых песков – отсутствие пыли, содержащей SiO_2 , исключает заболевание силикозом, что значительно улучшает экологию и привлекательность литейного производства.

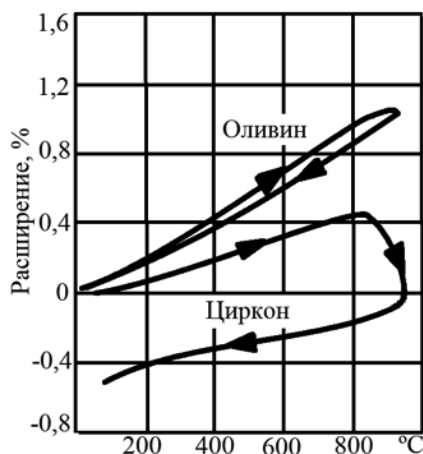
Поверхностный слой отливок играет большую роль в эксплуатационной надежности. Стремление учитывать структуру литейной корочки, наличие или отсутствие дефектов усадочного и газового происхождения, морфологию неметаллических включений, пригар, шероховатость поверхности приводит к большому количеству технологических решений, направленных на решение этой проблемы. Однако традиционная технология литья не решает комплекс проблем, связанных с повышением эксплуатационной надежности отливок и сближением свойств литых и кованных заготовок. Решение проблемы может осуществляться применением композиционного литья, имеющего большие возможности по уменьшению отходов металла, трудовых затрат, материалоемкости машин. Это предопределяется тем, что при композиционном литье синтезируются отдельные элементы, которые могут быть выполнены наиболее эффективными методами формообразования для данного элемента из материалов, отвечающих требованиям, предъявляемым к деталям. Такие элементы, установленные в литейную форму, заливаются матричным металлом и объединяются в единое целое – композиционную отливку, гетерогенность которой позволяет получить сумму служебных свойств



а



б



в

Рис. 4. Дилатометрия формовочных смесей с различными огнеупорными материалами: а – SiO_2 ; б – хромистый железняк; в – оливин и циркон $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$

нового качества, недоступного для отдельных элементов, составляющих композицию. Решающими для этой технологии являются контактные процессы, осуществляющие связь между элементами [17]. Технологический процесс изготовления композиционных отливок заключается в пропитке жидким металлом пористых металлокерамических оболочек, формирующих рабочую поверхность отливки. Это обеспечивает низкую шероховатость, управление в широком диапазоне структурой поверхностного слоя и физико-механическими свойствами.

Последнее время в промышленности начинает широко внедряться нанотехнология. Особенностью

материалов в наноразмерном состоянии является наличие на их поверхности большого количества атомов, имеющих нескомпенсированные связи, это обуславливает повышенную свободную энергию нанообъектов и их интенсивное взаимодействие с окружающей средой. Преимущества наноматериалов в технологии литейного производства заключаются в следующем:

- прочность и пластичность сталей с нанокристаллической структурой выше показателей традиционных конструкционных материалов в 2–2,5 раза. Повышение прочностных характеристик достигается наномодифицированием расплава в печи, на желобе, в ковше или форме;

- наноматериал (TiCN , Cr_3C_2 , WC и др.) может вводиться в состав покрытия, наносимого на внутреннюю поверхность литейной формы, что формирует металлокерамический слой отливки на глубину более 10 мм. Износостойкость этого слоя, упрочненного нанодисперсными частицами, в 2,5–3 раза выше износостойкости матричного металла;

- затвердеванию и кристаллизации отливок в низкотемпературных песчаных формах препятствует процесс теплоотвода. Это формирует крупнокристаллическую структуру, снижает физико-механические свойства. Ввод в расплав наноразмерных компонентов приводит к измельчению зерна, повышению дисперсности дендритной структуры, увеличению механических свойств отливок. Эти и другие способы применения наноматериалов (1–100 нм) дают повышение механических и служебных свойств, возможность снижения массы отливок.

Производство отливок по традиционной схеме печь – ковш – литейная форма все чаще сталкивается в конкуренции с аддитивным (additive – послойное формирование объемного объекта) производством на 3D-принтерах, которые выполняют функцию микролитейных цехов. При 3D-печати металлошхту подают в микроплавильную ванну, которую компьютер, управляя принтером с источником энергии, продвигает вдоль всего тела отливки, послойно его наплавляя; другим вариантом является послойное формирование объемного изделия из порошка металла, которое подвергается спеканию в печи до монолитной конструкции. Системы трехмерного параметрического проектирования используются для 3D-моделирования отливок, оснастки, моделирования процессов заливки, кристаллизации и охлаждения металла в форме. Наиболее доступной является технология 3D-печати экструзией. Несмотря на существующие недостатки (высокая зольность, длительность выжигания моделей, высокий коэффициент термического расширения и др.), эта технология позволяет сократить время от этапа проектирования до выпуска готовой продукции, получить высокую точность печати, минимизировать мехобработку, увеличить КИМ.

Выводы и перспективы использования. Технологический выход годного отливок и коэффициент использования металла литых деталей являются индикативными показателями уровня развития отрасли и служат резервом повышения эффективности ли-

тейного производства. Достигается это за счет разработки новых технологических процессов и совершенствования существующих при перевооружении литейных цехов. Наиболее острыми проблемами в решении этих задач являются следующие:

- снижение массы литых деталей за счет тщательной конструкторско-технологической проработки геометрии детали, выбора сплава с учетом особенностей литейной технологии, использования компьютерного моделирования, организации гидродинамического процесса заполнения формы жидким металлом с учетом формирования потоков непосредственно в форме, интенсификации работы прибылей, повышения свойств сплавов в процессе плавки;

- повышение геометрической точности отливок путем внедрения новых методов формообразования, формовочных материалов;

- организационные мероприятия по снижению потерь металла в литейных цехах;

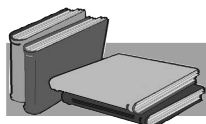
- широкое внедрение термической обработки отливок различными способами для различных сплавов;
- расширение номенклатуры композиционного литья, позволяющего синтезировать отдельные элементы отливки, отвечающие требованиям эксплуатационной надежности;

- повышение профессионального уровня специалистов, работающих непосредственно в цехах, в НИИ, ВУЗах, НАН Украины;

- создание имиджа привлекательности профессии литейщика улучшением условий труда, экологической и санитарно-гигиенической ситуации за счет применения новых материалов и технологий;

- активное внедрение наноматериалов в технологические процессы, позволяющее резко повысить механические и служебные свойства отливок;

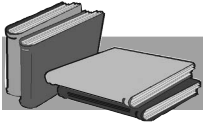
- синтез новых, более эффективных производственных процессов на базе аддитивных технологий с использованием 3D-принтеров.



ЛИТЕРАТУРА

1. Шинский О.И. Снижение металлоемкости литейной продукции – основа развития отрасли // *Оборудование и инструмент для профессионалов*. – 2011. – № 1. – С. 78–79.
2. Орлов П.И. Основы конструирования. – М.: Машиностроение, 1988. – 560 с.
3. Ясюков В.В., Лысенко Т.В., Солоненко Л.И., Чередник В.А. Анализ и синтез физико-химического воздействия на эксплуатационную надежность отливок // *Металл и литье Украины*. – 2016. – № 8-9. – С. 19–23.
4. Ясюков В.В., Лысенко Т.В., Козишкурт Е.А., Солоненко Л.И. Процессы кристаллизации и затвердевания отливок в разовых литейных формах // *Металл и литье Украины*. – 2018. – № 11-12. – С. 54–61.
5. Огородникова О.М., Пигина Е.В., Мартыненко С.В. Компьютерное моделирование горячих трещин в литых деталях // *Литейное производство*. – 2007. – № 2. – С. 27–30.
6. Нехендзи Ю.А. Стальное литье. – М.: Металлургиздат, 1948. – 766 с.
7. Василевский П.Ф. Технология стального литья. – М.: Машиностроение, 1974. – 408 с.
8. Бидуля П.Н. Технология стальных отливок. – М.: Машгиз, 1961. – 352 с.
9. Ващенко К.И., Софрони Л. Магниевый чугун. – М-К.: Машгиз, 1960. – 487 с.
10. Ясюков В.В., Лысенко Т.В., Солоненко Л.И., Пархоменко Е.А. Методы воздействия на процесс формирования отливки // *Металл и литье Украины*. – 2018. – № 3-4. – С. 47–51.
11. А. с. 502709 СССР, МКИ В 22 В 27/06. Диафрагма для отделения прибыли от отливки / Оболенцев Ф.Д., Ясюков В.В. (СССР). 2047057/22-2; заяв. 25.07.74; опубл. 15.02.76, Бюл. 6. – С. 1.
12. Оболенцев Ф.Д., Ясюков В.В. Применение керамических перегородок с обогревом для легкоотделяемых прибылей // В сб. *Технология и организация производства*. – Киев, 1978. – С. 37–39.
13. Воронова О.И., Лысенко Т.В., Ясюков В.В. Легкоотделяемые прибыли для отливок пресс-форм литья под давлением // *Металл и литье Украины*. – 2015. – № 9. – С. 30–33.
14. Ясюков В.В., Лысенко Т.В., Пархоменко Е.А. Газы и неметаллические включения в стальных отливках // *Металл и литье Украины*. – 2017. – № 11-12. – С. 19–24.
15. Каргинов В.П., Иванов В.Г. Применение вспомогательных материалов производства НПП «Союз» для повышения качества металлургической и литейной продукции // *XIII Міжнародна науково-практична конференція «Литво. Металургія 2017»*. – Запоріжжя, 2017. – С. 122–124.
16. Оболенцев Ф.Д. Качество литых поверхностей. – М.-Л.: Машгиз, 1961. – 183 с.
17. Ясюков В.В., Лысенко Т.В., Волянская К.В. Композиционные отливки с регулируемым поверхностным слоем // *Металл и литье Украины*. – 2016. – № 4. – С. 18–23.

Поступила 15.03.2019



REFERENCES

1. *Shinskiy, O.I.* (2011). Reducing the metal content of foundry products – the basis of the industry development. *Equipment and tools for professionals*, no. 1, pp. 78–79 [in Russian].
2. *Orlov, P.I.* (1988). Basics of design. Moscow: Mechanical Engineering, 560 p. [in Russian].
3. *Yasiukov, V.V., Lysenko, T.V., Solonenko, L.I., Cherednik, V.A.* (2016). Analysis and synthesis of physical and chemical effects on the operational reliability of castings. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 8–9, pp. 19–23 [in Russian].
4. *Yasiukov, V.V., Lysenko, T.V., Kozishkurt, Ye.A., Solonenko, L.I.* (2018). The processes of crystallization and solidification of castings in single-casting molds. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 11–12, pp. 54–61 [in Russian].
5. *Ogorodnikova, O.M., Pigina, Ye.V., Martynenko, S.V.* (2007). Computer simulation of hot cracks in cast parts. *Foundry production*, no. 2, pp. 27–30 [in Russian].
6. *Nekhendzi, Yu.A.* (1948). Steel casting. Moscow: Metallurgizdat, 766 p. [in Russian].
7. *Vasilevskiy, P.F.* (1974). Steel casting technology. Moscow: Mechanical Engineering, 408 p. [in Russian].
8. *Bidulya, P.N.* (1961). Technology of steel castings. Moscow: Mashgiz, 352 p. [in Russian].
9. *Vashchenko, K.I., Sofroni, L.* (1960). Magnesium cast iron. M.-K.: Mashgiz, 487 p. [in Russian].
10. *Yasiukov, V.V., Lysenko, T.V., Solonenko, L.I., Parkhomenko, Ye.A.* (2018). Methods of influence on the process of casting formation. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 3–4, pp. 47–51 [in Russian].
11. *Obolentsev, F.D., Yasiukov, V.V.* (1976). Diaphragm for separating profit from casting. A. s. 502709 USSR, MKI V 22 V 27/06. (USSR) 2047057/22-2; announced 25.07.74; publ. 15.02.76, Biul. 6, P. 1 [in Russian].
12. *Obolentsev, F.D., Yasiukov, V.V.* (1978). The use of ceramic partitions with heating for easily dividing profits. *Technology and organization of production*. Kiev, pp. 37–39 [in Russian].
13. *Voronova, O.I., Lysenko, T.V., Yasiukov, V.V.* (2015). Easily separable profits for casting of injection molds. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 9, pp. 30–33 [in Russian].
14. *Yasiukov, V.V., Lysenko, T.V., Parkhomenko, Ye.A.* (2017). Gases and nonmetallic inclusions in steel castings. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 11–12, pp. 19–24 [in Russian].
15. *Karginov, V.P., Ivanov, V.G.* (2017). Use of auxiliary materials produced by Soyuz NPP to improve the quality of metallurgical and foundry products. *XIII Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia "Lit'e. Metalurgiiia 2017"*. Zaporizhzhia, pp. 122–124 [in Russian].
16. *Obolentsev, F.D.* (1961). The quality of cast surfaces. M.-L.: Mashgiz, 183 p. [in Russian].
17. *Yasiukov, V.V., Lysenko, T.V., Volianskaia, K.V.* (2016). Composite castings with an adjustable surface layer. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 4, pp. 18–23 [in Russian].

Received 15.03.2019

Анотація

В.В. Ясюков, канд. техн. наук, приват-професор, доц. кафедри технології та управління ливарними процесами, e-mail: odessa810@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6453-5712>;
Т.В. Лисенко, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри технології та управління ливарними процесами, e-mail: tv12odessa@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3183-963x>;
О.І. Воронова, приват-доцент, ст. викладач кафедри технології та управління ливарними процесами, e-mail: olgaliptuga@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2976-0794>;
Л.І. Солоненко, канд. техн. наук, ст. викладач кафедри технології та управління ливарними процесами, e-mail: solonenkoli14@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2092-8044>

Одеський національний політехнічний університет, Одеса, Україна

Аналіз способів підвищення ефективності ливарного виробництва

Технологічний вихід придатного виливків (ТВП) і коефіцієнт використання металу литих деталей (КВМ) є індикативними показниками рівня розвитку ливарного виробництва. Зазначені аспекти напряму подальшого розвитку ливарного виробництва розглядаються в сфері створення нових і вдосконалення існуючих технологічних процесів формоутворення, плавки і способів лиття. Найбільш гострими проблемами у вирішенні цих завдань є такі: зниження маси литих деталей за рахунок ретельного конструкторсько-технологічного опрацювання геометрії деталі, вибору

сплаву з урахуванням особливостей ливарної технології, використання комп'ютерного моделювання, організації гідродинамічного процесу заповнення форми рідким металом з урахуванням формування потоків безпосередньо в формі, інтенсифікації роботи надливів, підвищення властивостей сплавів в процесі плавки; підвищення геометричної точності виливків шляхом впровадження нових методів формоутворення, формувальних матеріалів; організаційні заходи щодо зниження втрат металу в ливарних цехах; широке впровадження термічної обробки виливків різними способами для різних сплавів; розширення номенклатури композиційного лиття, що дозволяє синтезувати окремі елементи виливка, які відповідають вимогам експлуатаційної надійності; підвищення професійного рівня фахівців, які працюють безпосередньо в цехах, в НДІ, ВНЗ, НАН України; створення іміджу привабливості професії ливарника поліпшенням умов праці, екологічної та санітарно-гігієнічної ситуації за рахунок застосування нових матеріалів і технологій; активне впровадження наноматеріалів в технологічні процеси, що дозволяє різко підвищити механічні та службові властивості виливків; синтез нових, більш ефективних виробничих процесів на базі адитивних технологій з використанням 3D-принтерів. Розглянуті технологічні процеси вирішують цю двоєдину задачу.

Ключові слова

Технологічний вихід придатного виливків, коефіцієнт використання металу литих деталей, експлуатаційна надійність литої деталі, геометрична точність литої деталі, ливарне виробництво.

Summary

V.V. Yasiukov, Candidate of Engineering Sciences, Private Professor, Associate Professor at the Department of Technology and Management of Foundry Processes, e-mail: odessa810@ukr.net,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6453-5712>;

T.V. Lysenko, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Technology and Management of Foundry Processes, e-mail: tv12odessa@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3183-963x>;

O.I. Voronova, Private Associate Professor, Senior Lecturer of the Department of Technology and Management of Foundry Processes, e-mail: olgaliptuga@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2976-0794>;

L.I. Solonenko, Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer of the Department of Technology and Management of Foundry Processes, e-mail: solonenkoli14@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2092-8044>

Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine

Analysis of ways to improve the efficiency of foundry

Technological yield of castings (TYC) and the utilization rate of the metal of cast parts (URM) are indicative indicators of the level of foundry development. These aspects of the future development of the foundry are considered in the area of creating new and improving existing technological processes of forming, smelting and casting methods. The most acute problems in solving these tasks are as follows: reducing the mass of cast parts due to careful design and technological study of the geometry of the part, selection of the alloy with regard to the casting technology, use of computer simulation, organization of the hydrodynamic process of filling the mold with liquid metal, taking into account the formation of flows directly in the form, the intensification of the work of heads, improving the properties of alloys in the smelting process; improving the geometric accuracy of castings by introducing new methods of forming, molding materials; organizational measures to reduce metal losses in foundries; widespread introduction of heat treatment of castings in various ways for various alloys; expansion of the composite casting nomenclature, which allows to synthesize individual casting elements that meet the requirements of operational reliability; professional development of specialists working directly in the shops, research institutes, universities, the NAS of Ukraine; creating an image of the attractiveness of the caster profession by improving working conditions, the environmental and sanitary situation through the use of new materials and technologies; the active introduction of nanomaterials into technological processes, which makes it possible to sharply increase the mechanical and service properties of castings; synthesis of new, more efficient production processes based on additive technologies using 3D printers. The considered technological processes solve this dual problem.

Keywords

Technological yield of castings, utilization rate of the metal of cast parts, operational reliability of the cast part, geometric accuracy of the cast part, foundry.