



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-16-24>
УДК 621.74

Поступила 26.09.2023
Received 26.09.2023

ДЕФЕКТЫ ПРИ ЛИТЬЕ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ И МЕРЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ГАЗОВЫХ ДЕФЕКТОВ

В. И. ЧЕЧУХА, ОАО «ММЗ им. С. И. Вавилова – управляющая компания холдинга «БелОМО», г. Минск, Беларусь, ул. Макаенка, 23
М. А. САДОХА, БНТУ, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: sadoxa@rambler.ru

На образование дефектов при изготовлении отливок влияет множество факторов. Эти факторы могут влиять как каждый отдельно, так и совместно. В статье дана характеристика дефектов, которые встречаются при литье под высоким давлением, и определены факторы, влияющие на их образование. Рассмотрены эффективные меры по снижению дефектности литья, которые целесообразно применять для получения ответственных и особо ответственных отливок с высокими требованиями к поверхности после механической обработки.

Использование в производстве автоматизированных комплексов литья под высоким давлением положительно сказывается на качестве изготовления отливок, исключается значительное количество возможных причин возникновения брака, связанных с человеческим фактором.

Ключевые слова. *Литье под высоким давлением, отливка, алюминиевый сплав, отливки ответственного назначения, дефект отливки, газовые дефекты, классификация дефектов.*

Для цитирования. *Чечуха, В. И. Дефекты при литье под высоким давлением и меры предупреждения газовых дефектов / В. И. Чечуха, М. А. Садоха // Литье и металлургия. 2023. № 4. С. 16–24. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-16-24>.*

DEFECTS IN HIGH-PRESSURE DIE CASTING AND MEASURES TO PREVENT GAS DEFECTS

V. I. CHECHUKHA, OJSC “MMZ named after S. I. Vavilov – Management Company of Holding “BelOMO”, Minsk, Belarus, 23, Makayenka str.
M. A. SADOXHA, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.
E-mail: sadoxa@rambler.ru

The formation of defects in the manufacturing of castings is influenced by numerous factors. These factors can affect the quality both individually and in combination. This article provides a characterization of the defects encountered in high-pressure die casting and identifies the factors influencing their formation. Effective measures are examined to reduce casting defects, which are recommended for obtaining critical and highly demanding castings with stringent surface requirements after mechanical processing.

The use of automated high-pressure die casting complexes in production has a positive impact on the quality of castings, eliminating many of the potential causes of defects related to human factors.

Keywords. *High-pressure die casting, casting, aluminum alloy, critical castings, casting defects, gas defects, defect classification.*

For citation. *Chechukha V. I., Sadoxha M. A. Defects in high-pressure die casting and measures to prevent gas defects. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 4, pp. 16–24. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-16-24>.*

В современном литейном производстве широкое применение получили специальные способы литья, такие, как в оболочковые формы, по выплавляемым моделям, кокильное, под высоким давлением, центробежное и др. Каждый специальный способ литья имеет свои особенности, определяющие их области применения.

Литье под высоким давлением (ЛПД) является самым производительным способом изготовления тонкостенных отливок сложной конфигурации с высокой точностью размеров, высокими механическими свойствами и высоким качеством поверхности в серийном и массовом производстве. Таким образом, можно исключить или свести к минимуму дополнительную механическую обработку. Причем толщина стенок детали может составлять менее 1 мм, а масса – от нескольких граммов до десятков килограммов. Кроме того, метод ЛПД позволяет полностью автоматизировать весь технологический процесс изготовления отливок и сократить негативное влияние на окружающую среду.

Классификация дефектов

Дефектом называется каждое отдельное несоответствие продукции требованиям, установленным нормативной документацией. В зависимости от возможного влияния на служебные свойства детали дефекты могут быть критическими, значительными и малозначительными. При классификации учитывают характер, размеры, место расположения дефекта на детали, особенности деталей и изделий, их назначение, условия использования (эксплуатации).

Дефекты подразделяют на явные, скрытые, критические, значительные и малозначительные, исправимые и неисправимые.

Явные поверхностные дефекты выявляют визуально, а внутренние скрытые и поверхностные, неразличимые глазом, – специальными средствами.

Критическим называют дефект, при наличии которого использование продукции по назначению невозможно или исключается из-за несоответствия безопасности или надежности.

Значительный – дефект, который существенно влияет на использование продукции по назначению и (или) на ее долговечность, но не является критическим.

Малозначительный – дефект, который не оказывает влияния на использование продукции по назначению и (или) на ее долговечность.

Отливки в зависимости от назначения и предъявляемых к ним требований подразделяются на три группы в соответствии с СТБ 1256–2001 (табл. 1) [1].

Т а б л и ц а 1

Группа отливок (обозначение)	Назначение	Характеристика отливок	Вид контроля
Первая группа (1Г)	Отливки неотвественного назначения	Отливки для деталей, не рассчитываемых на прочность, конфигурация и размеры которых определяются конструктивными и технологическими соображениями	Наружный осмотр; контроль химического состава; выборочный контроль размеров
Вторая группа (2Г)	Отливки ответственного назначения, несущие статические нагрузки	Отливки для деталей, рассчитываемых на прочность и работающих при статических нагрузках. К состоянию литой поверхности и качеству металла предъявляются повышенные требования. Отливки обрабатываются механически с жестким ограничением размеров	Наружный осмотр; контроль химического состава; выборочный контроль размеров; контроль механических свойств: твердости, временного сопротивления разрыву, относительного удлинения; специальные виды контроля, указанные на рабочих чертежах (макроструктура, герметичность, рентгенопросвечивание и т. д.)
Третья группа (3Г)	Отливки особо ответственного назначения, несущие знакопеременные нагрузки с повышенными требованиями по прочности	Отливки для деталей, рассчитываемых на прочность и работающих при динамических и знакопеременных нагрузках. Отливки, подвергающиеся механической обработке с жестким ограничением размеров. К состоянию литой поверхности и качеству металла предъявляются высокие требования	Наружный осмотр; контроль химического состава; контроль размеров: выборочный или разметка по согласованным с заказчиком размерам; контроль механических свойств: твердости, временного сопротивления разрыву, относительного удлинения; специальные виды контроля, указанные на рабочих чертежах (макроструктура, герметичность, рентгенопросвечивание и т. д.)

Для каждой конкретной отливки в соответствии с группой отливки предъявляются свои требования к качеству, допускаемым дефектам, их размеру, взаимному расположению, виду необходимого контроля.

Дефекты литья также классифицируют по месту их обнаружения. Брак при литье, обнаруженный на литейном участке, называют внутренним. Если же дефект выявлен на маршруте, при дальнейшей обработке, такой брак называют внешним.

Дефекты отливок при ЛПД приведены в табл. 2.

Зачастую дефекты отливок могут быть выявлены только при механической обработке получаемых отливок или при помощи разрушающего контроля.

Для отливок ответственного назначения, проверяемых на герметичность (корпусные детали узлов тормозных систем, приборов учета газа и т.п.), имеющих множество поверхностей с высокими

Т а б л и ц а 2

Наименование дефекта
Несплошность в теле отливки
Газовая пористость, газовые раковины
Неметаллические включения
Шлаковая раковина
Усадочные раковины, усадочная пористость
Рыхлота
Горячая трещина
Холодная трещина
Спаи потоков металла
Утяжина
Дефекты поверхности
Облой
Расслоение стенки отливки
Поверхностное повреждение
Пятнистая поверхность
Узорчатая поверхность
Волосовидные наплывы
Наплыв от эрозионного повреждения формы
Задиры
Несоответствие по геометрии
Недолив
Смещение полуформ
Выпуклость или углубление
Разностенность отливки
Непролитие отверстий (излом стержней, знаков в форме)
Коробление отливки
Несоответствие размеров

требованиями, нормы технически неизбежных потерь на литейные дефекты, вскрываемые при механической обработке, составляют 1,2–3,6 %, при проверке на герметичность – 0,3–0,5 %. Также имеет место выявление брака по вине исполнителя из-за нарушения технологического процесса подготовки сплава, изготовления отливок, из-за небрежности в работе и т. д.

В связи с этим ежемесячно необходимо выполнять разработку мероприятий на исключение и предупреждение брака по вине исполнителя, данные случаи следует рассматривать на участковых днях качества в подразделениях, допустивших несоответствие. Также необходимо разрабатывать мероприятия, направленные на снижение процента неизбежных потерь, которые обычно включают в себя совершенствование конструкции пресс-форм, литниково-питающей системы отливок, технологию литья, введение дополнительного контроля измерительным инструментом нестабильных размеров в отливках, замену материалов и т. д. По результатам эффективности внедренных мероприятий в течение года нормы технологически неизбежных потерь подлежат пересмотру на следующий год.

В результате анализа качества отливок установлено, что самыми распространенными дефектами при ЛПД отливок ответственного и особо ответственного назначения являются газовые (газовая пористость и газовые раковины), которые занимают 66 % от общего объема выявляемого брака (рис. 1). Вторым по распространенности дефектом (24 % от общего объема брака) является спай потоков металла, который служит причиной нарушения герметичности отливок. На третьем месте среди прочих видов брака находится несоответствие размеров (7 % от общего объема брака). Четвертое место занимает брак отливок, связанный с неметаллическими включениями, его доля составляет 1 %. Такие дефекты, как облой, волосовидные наплывы, задиры, являются явными, исправимыми, регламентируются по допустимой величине, встречаются достаточно часто, однако исправляются в процессе галтовки отливок и при механической обработке. Прочие дефекты встречаются редко и суммарно составляют только 2 % от общего объема выявляемого брака.

Остановимся подробнее на газовых дефектах (газовая пористость и газовые раковины), которые относятся к группе дефектов несплошности в теле отливки (табл. 2).



Рис. 1. Распределение различных видов брака отливок при ЛПД

Газовая пористость – это дефект в виде скопления мелких пор, образовавшихся в отливке в результате выделения газов из металла при его затвердевании (рис. 2, *а*) [1].

Газовая раковина – это дефект в виде полости, образованной выделившимися из металла или внедрившимися в металл газами (рис. 2, *б*).



Рис. 2. Газовые дефекты в отливках: *а* – газовая пористость; *б* – газовая раковина

Данные дефекты зачастую являются скрытыми и значительными, выявляются, как правило, в процессе механической обработки. Занимают высокий процент от партии изготавливаемых деталей, может быть забракована вся партия отливок вплоть до объема сменного задания при нарушении технологического процесса литья, подготовки сплава и т.д. Контроль за дефектом можно проводить при помощи рентгенодефектоскопии.

Газовые дефекты имеют множество причин образования, которые можно объединить в несколько групп. Конструкторско-технологические причины включают в себя:

- ошибки при проектировании пресс-формы: неправильно рассчитана литниково-питающая и вентиляционная система, недостаточный объем промывников, большой литейный уклон, припуск под механическую обработку более 0,3 мм;
- несовершенство конструкции формы или особенности конфигурации отливки, ее геометрическая сложность, из-за чего имеются глухие места, где невозможно выполнить подводящие каналы к промывникам;

- при проектировании формы не используется современное программное обеспечение для моделирования процесса заполнения формы и кристаллизации отливки;
- ошибки при разработке технологического процесса заполнения формы сплавом, неверный расчет скоростей и точек переключения фаз прессования, давления прессования и подпрессовки.

Причины, обусловленные отклонением свойств применяемых материалов:

- некачественная исходная шихта с высоким баллом пористости;
- некачественная подготовка шихтовых материалов к плавке, недостаточная просушка чушки и возвратных отходов собственного производства;
- непросушенный и непрогретый плавильный и литейный инструмент после окраски и перед началом работы;
- нарушение баланса металла при загрузке шихтовых материалов в плавильную печь;
- продолжительный период ведения плавки сплава в плавильной печи и его выдержка перед заливкой в раздаточную печь (из-за отсутствия возможности разлива сплава по причине ремонта оборудования или неритмичной подготовки сплава всеми единицами плавильных печей);
- продолжительный простой сплава в раздаточной печи (из-за ремонта машины литья под давлением (МЛД), оснастки, переналадки пресс-форм);
- некачественное выполнение операции рафинирования и дегазации сплава или ее полное невыполнение;
- невыполнение повторной операции рафинирования и дегазации сплава в раздаточной печи через каждые два часа в случае его не полной выработки в процессе производства литья;
- ведение плавки чушек в раздаточных печах при неритмичном обеспечении цеха сплавом или поломке плавильного оборудования;
- использование просроченных материалов для рафинирования и дегазации сплава.

Технические и технологические причины образования газовых дефектов:

- сбой в работе МЛД, падение давления азота в аккумуляторе и мультипликаторе;
- чрезмерное количество наносимых смазочных веществ в процессе смазки наполнительной камеры прессования, пресс-поршня, литниковой втулки и полости формы;
- повышенная газотворная способность применяемых смазок для полости формы и прессующей пары;
- несанкционированное изменение литейщиком технологических параметров литья технологического процесса, запрограммированного в МЛД;
- перегрев сплава в процессе плавки в плавильной печи;
- установка высокой температуры сплава в раздаточной печи; с повышением температуры сплава резко увеличивается его способность к насыщению водородом из атмосферы;
- невыполнение своевременно регламентных работ по проведению профилактических ремонтов пресс-форм, вследствие чего загрязненные каналы к промывникам не позволяют полноценно отводить газы из полости формы;
- работа на МЛД с изношенной камерой прессования, литниковой втулкой и пресс-поршнем, не позволяющая обеспечить повторяемость технологического процесса из-за подклинивания пресс-поршня при его передвижении;
- заниженная толщина пресс-остатка при изготовлении отливок.

Для предотвращения образования газовых дефектов необходимо исключить наличие указанных выше причин [1].

Для снижения вероятности конструкторско-технологических ошибок проектирование оснастки и моделирование процесса заполнения полости формы и кристаллизации следует выполнять с применением современного программного обеспечения.

При разработке технологического процесса ЛПД необходимо учесть следующие рекомендации.

Перемещение поршня в период разгона (рис. 3, фаза I): в период времени t_1 поршень не должен перемещаться со скоростью свыше 0,5 м/с. В этот период поршень перекрывает заливочное окно камеры прессования, в которой происходит плавный подъем уровня расплава. Скорость перемещения поршня должна быть такой, чтобы исключить возможность выплескивания расплава через заливочное окно камеры прессования, а газы могли свободно вытесняться в рабочую полость пресс-формы и дальше через систему вентиляции в атмосферу.

Холостой ход (фаза II): период времени t_2 соответствует заполнению сплавом под действием поршня всего объема камеры прессования вплоть до литниковых каналов. Скорость поршня на второй стадии определяется необходимостью сохранения заданной температуры расплава до его подхода к питателю и обеспечения вытеснения воздуха из камеры прессования в литниковую систему и далее в полость формы. В то же время на этой стадии необходимо обеспечить такие условия перемещения поршня, чтобы расплав впереди волнового участка занимал тот же уровень, который имел металл в процессе его первоначальной заливки, при этом расплав сзади волнового участка полностью заполнял поперечное сечение камеры прессования. Воздух при этих условиях будет выталкиваться в пространство перед волной (рис. 4, а).

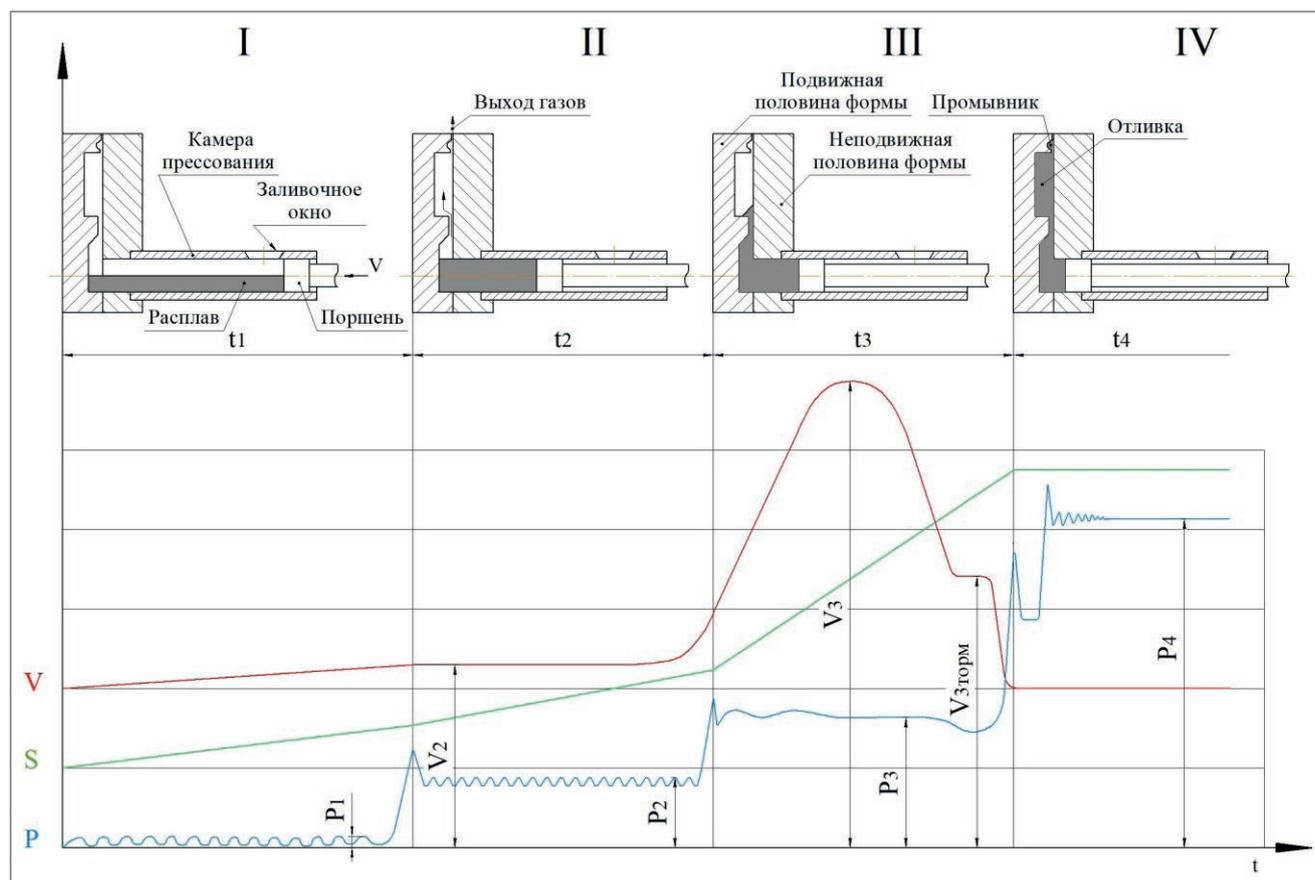


Рис. 3. Фазы процесса ЛПД

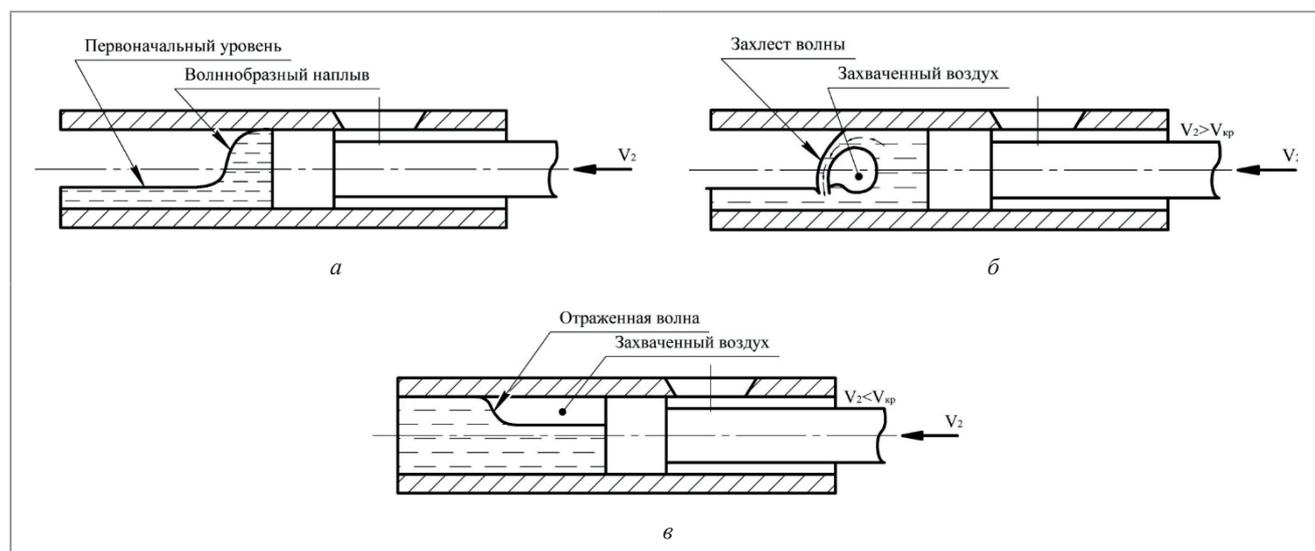


Рис. 4. Движение поршня и расплава в камере прессования при литье под давлением:

а – волнообразный наплыв металла; б – захват воздуха при захлестывании волны; в – попадание воздуха в металл при $V_2 < V_{кр}$

Если скорость прессующего поршня будет превышать эту критическую величину, то создается избыток энергии при формировании волны. Поднимающийся металл будет ударять о верхние участки камеры прессования и перемещаться вперед по этим поверхностям. Волна захлестывается и происходит захват воздуха (рис. 4, б). Таким образом, чрезмерно высокая скорость прессующего поршня на медленной фазе прессования сопровождается попаданием воздуха в металл.

Если скорость прессующего поршня ниже критической, то также происходит попадание воздуха в металл. При докритических скоростях максимальная высота волны не достигает верхнего участка камеры прессования. Следовательно, имеется зазор между верхними участками волны и камеры прессования. Этот зазор будет продолжать существовать между фронтом волны и торцом пресс-поршня. На более поздней стадии медленной фазы прессования воздушные включения перемещаются с жидким сплавом (рис. 4, в).

Таким образом, имеется критическое значение скорости медленной фазы движения поршня. При превышении скорости прессующего поршня образуется перехлестная волна. Если скорость меньше критической, воздух захватывается сзади волнового участка. Первый случай обуславливает значительно больший захват воздуха. Если скорость прессующего поршня равна критической, то захвата воздуха не происходит [2]

Период заполнения (фаза III): за время t_3 расплав заполняет полость формы и промывников при очень высокой скорости движения поршня и соответственно высокой скорости потока в питателе. Быстрое перемещение поршня на третьем этапе вызвано необходимостью приобретения расплавленным металлом кинетической энергии, достаточной для заполнения полости формы и сохранения расплавом теплоты перегрева. В то же время скорость впуска должна быть такой, чтобы заполнение полости формы было последовательным. В конце фазы рекомендуется включать точку торможения пресс-поршня для снижения скорости до $V_{3\text{торм}}$ с целью минимизации гидравлического удара и снижения вероятности возникновения облоя по разъему формы.

Подпрессовка (фаза IV): по окончании времени задержки подключения мультипликатора и затухания колебаний от гидроудара устанавливается конечное давление P_4 и начинается подпрессовка на величину времени кристаллизации отливки. К моменту достижения давления P_4 сплав в питателе остается жидким, это давление передается на затвердевающую отливку, способствует получению плотных, с минимальной воздушно-газовой и усадочной пористостью отливок и качественной поверхностью.

Если рассматривать причины газовых дефектов, обусловленные отклонением свойств применяемых материалов, то с целью снижения дефектности отливок необходимо обеспечить входной контроль приобретаемых чушковых сплавов. Кроме проверки химического состава, следует проводить контроль содержания газов (а это преимущественно водорода) не менее чем на двух чушках от каждой плавки. В качестве дополнительной меры обеспечения качества отливок ответственного назначения можно использовать покупную чушку из рафинированного сплава со вторым баллом пористости (ГОСТ 1583-93). Хотя это и увеличивает себестоимость конечной продукции, однако при заметном снижении брака ответственных отливок может быть оправдано как технически, так и экономически. Качество чушки можно оценить визуально. Для примера на рис. 5 показаны макрошлифы темплетов чушки АК12М2 (ГОСТ 1583-93) с различным баллом пористости.

Для обеспечения высокого и стабильного качества отливок ответственного назначения важно организовать правильную систему приготовления расплава, для чего необходимо:

- хранение чушки производить в крытых складских помещениях; перед загрузкой в плавильные печи обеспечить подготовку шихтовых материалов путем их просушки и подогрева;
- провести просушку и подогрев плавильного и литейного инструмента после окраски и перед началом работы;
- обеспечить загрузку шихтовых материалов в соответствии с балансом металла в плавильную печь, не допуская добавления большего количества оборотных отходов (литников, промывников), загрязненных смазочными веществами (взвешивание шихтовых материалов рекомендуется выполнять при помощи крановых весов);
- минимизировать необходимое время проведения процесса плавки сплава, не допуская простой готового сплава в плавильной печи до его разливки в раздаточную печь;
- минимизировать время нахождения сплава в раздаточной печи в процессе его выработки при изготовлении литья; своевременно проводить регламентные работы по ремонту МЛД и пресс-форм для предотвращения простоя раздаточной печи с наличием сплава; раздаточные печи должны быть оснащены откидными крышками и в обязательном порядке закрываться при непродолжительном простое;

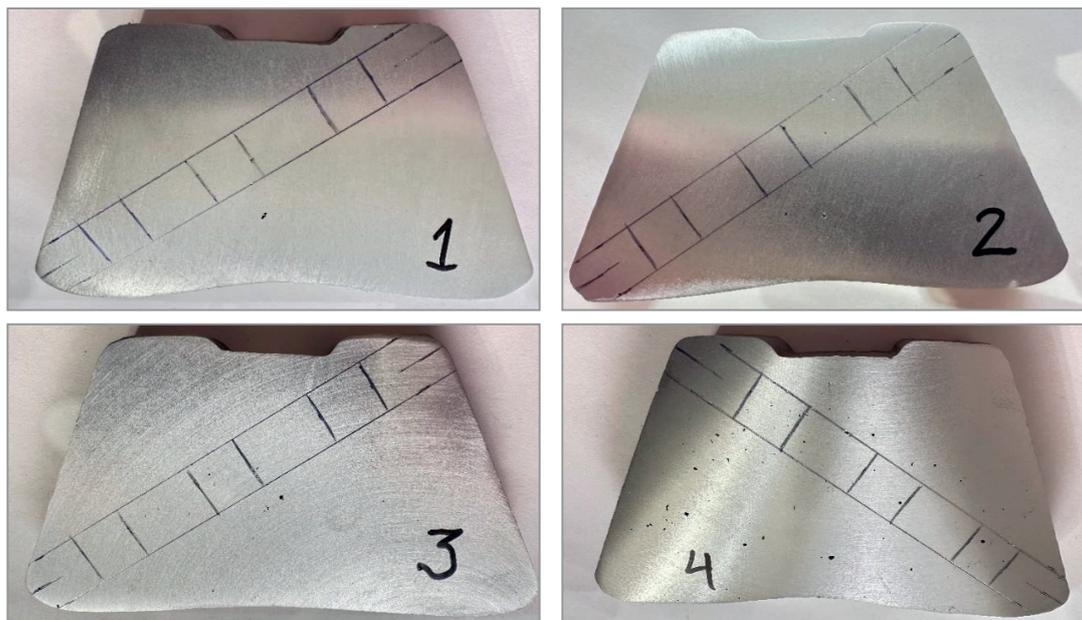


Рис. 5. Макрошлифы темплетов чушки АК12М2 (ГОСТ 1583-93):

1 – 1-й балл пористости; 2 – 2-й балл пористости; 3 – 3-й балл пористости; 4 – 4-й балл пористости

- проводить операцию рафинирования и дегазации сплава в соответствии с технологическим процессом;
- при простое сплава в раздаточной печи более одного часа его необходимо слить в изложницы или провести повторную операцию рафинирования и дегазации;
- не допускать плавку чушек в раздаточных печах при неритмичном обеспечении сплавом литейное производство плавильным оборудованием;
- использовать материал в пределах его срока годности; обеспечить контроль за сроком годности, целостностью упаковки при выдаче материала в производство со склада, а также на рабочих местах плавильщиков и литейщиков;
- исключить перегрев сплава в процессе плавки в плавильной печи; проводить контроль температуры переносной погружной термопарой;
- исключить перегрев сплава при нахождении его в раздаточной печи; перед началом работы проверять корректность установленной температуры на потенциометре; производить контроль температуры переносной погружной термопарой.

Минимизировать образование брака по техническим причинам, связанным с оборудованием, позволит выполнение следующих мероприятий:

- проводить своевременно регламентные работы по ремонту и техническому обслуживанию МЛД;
- в процессе изготовления отливок наносить минимальное количество смазочных материалов на поверхности наполнительной камеры прессования, литниковой втулки, пресс-поршня, полости формы; использовать современные смазочные материалы с минимальной газотворностью; проблемные места формы смазывать противозадирной смазкой; для крупносерийного производства использовать автоматизированные комплексы с автоматическим нанесением смазки на поверхности полости формы смазчиком и дозатором для смазки пресс-поршня гранулированной либо жидкой смазкой;
- произвести замену смазок для полости формы и прессующей пары на смазки с меньшей газотворной способностью;
- обеспечить разграничение доступа паролем на консоли управления МЛД к изменению технологических параметров литья для литейщиков, наладчиков и инженеров-технологов;
- составить график проведения профилактических ремонтов пресс-форм с указанием максимального периода непрерывной работы оснастки на МЛД в зависимости от ее конструктивной сложности и строго придерживаться данного графика в процессе производства;
- обеспечить контроль за износом наполнительной камеры прессования, литниковой втулки и пресс-поршня; производить их своевременную замену;

- изготавливать отливки литейным инструментом необходимой емкости при ручном способе заливки сплава; для крупносерийного производства изготовление отливок должно быть автоматизировано, заливка сплава должна выполняться манипулятором-заливщиком.

Таким образом, для снижения уровня дефектности ответственных отливок повышенной сложности необходимо квалифицированно подходить к технологической подготовке производства, четко регламентировать все технологические операции и действия персонала в процессе изготовления литья, строго контролировать качество и порядок применения всех материалов, использовать современные прогрессивное оборудование, материалы и технологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Волочко, А. Т.** Алюминий: технологии и оборудование для получения литых изделий / А. Т. Волочко, М. А. Садоха. – Минск, Беларуская навука, 2011. – 387 с.
2. **Соболев, В. Ф.** Специальные виды литья: пособие по выполнению практических работ / В. Ф. Соболев, А. Н. Чичко. – Минск: БНТУ, 2010. – 72 с

REFERENCES

1. **Volochko A. T., Sadokha M. A.** *Aljuminij: tehnologij i oborudovanie dlja poluchenija lityh izdelij* [Aluminum: technologies and equipment for producing cast products]. Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 2011, 387 p.
2. **Sobolev V. F., Chichko A. N.** *Special'nye vidy lit'ja. Posobie po vypolneniju prakticheskijh rabot* [Special types of casting. Manual for practical work]. Minsk, BNTU Publ., 2010, 72 p.