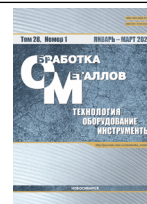




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Повышение эффективности процесса литья под давлением в металлические формы

*Игорь Савин^{1, а}, Низами Юсубов^{2, b, *}, Ренат Гавариев^{1, c}, Хейран Аббасова^{2, d}*¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, ул. К. Маркса, 10, г. Казань, 420111, Россия² Азербайджанский технический университет, пр. Г. Джавида, 25, г. Баку, AZ 1073, Азербайджан^а <https://orcid.org/0000-0001-8653-9960>, 1705kzn@mail.ru; ^б <https://orcid.org/0000-0002-6009-9909>, nizami.yusubov@aztu.edu.az;^с <https://orcid.org/0000-0003-3417-9670>, RVGavariev@kai.ru; ^д <https://orcid.org/0000-0002-0407-5275>, abbasova.heyran@aztu.edu.az

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.74

История статьи:

Поступила: 12 декабря 2025

Рецензирование: 06 января 2026

Принята к печати: 31 января 2026

Доступно онлайн: 15 марта 2026

Ключевые слова:

Литье под давлением

Защитные покрытия

Катодно-ионная бомбардировка

Уменьшение пористости

Алюминиевые сплавы

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Азербайджанского научного фонда – грант № AEF-MGC-2024-2(50)-16/01/1-M-01.

АННОТАЦИЯ

Введение. Литье под давлением остается одним из наиболее продуктивных способов получения сложных тонкостенных отливок из алюминиевых сплавов. Однако типичными проблемами процесса являются подповерхностная газовая пористость и ухудшение шероховатости изделий из-за износа формообразующих поверхностей пресс-форм. **Цель работы:** проведение сравнительной оценки эффективности различных методов упрочнения рабочей поверхности пресс-форм – традиционного азотирования и нанесения износостойких покрытий (TiN и многослойного TiCN-TiN-MoN) методом катодно-ионной бомбардировки (КИБ) – для улучшения качества алюминиевых отливок. **Методы исследования.** Экспериментальные исследования проводились на отливках типа «ручка» из сплава АК7. Качество отливок, полученных с использованием пресс-форм с тремя типами защитных поверхностей (азотированная, с покрытием TiN, с покрытием TiCN-TiN-MoN), оценивалось по уровню объемной пористости (ГОСТ 1583–93) и изменению параметра шероховатости Ra в ходе ресурсных испытаний (до 100 тыс. циклов литья). **Результаты и обсуждение.** Установлено, что нанесение покрытий методом КИБ статистически значимо улучшает качество отливок по сравнению с азотированием. Многослойное покрытие TiCN-TiN-MoN продемонстрировало наилучшие результаты: снижение максимального диаметра пор на 58 %, а их общего количества – на 40 %, что позволило отнести отливки к категории с пониженной пористостью (2 балла против 3 баллов для азотирования). Ресурсные испытания показали, что пресс-форма с азотированной поверхностью обеспечивает допустимую шероховатость отливок ($Ra \leq 3,2$ мкм) в течение 75 тыс. циклов, в то время как оснастка с покрытиями TiN и TiCN-TiN-MoN сохраняет этот параметр на уровне $Ra \leq 1,6$ мкм вплоть до 100 тыс. циклов. Важным практическим преимуществом метода КИБ является существенно меньшая технологическая трудоемкость процесса нанесения (2...3 часа) по сравнению с азотированием (20...30 часов), что снижает операционные затраты и время простоя оборудования. **Выводы.** Применение многослойного наноструктурированного покрытия TiCN-TiN-MoN, нанесенного методом катодно-ионной бомбардировки, является наиболее рациональным решением для повышения эксплуатационного ресурса пресс-форм и качества алюминиевых отливок. Данная технология обеспечивает комплексное улучшение ключевых показателей (пористость, шероховатость) и обладает значительным экономическим потенциалом за счет сокращения длительности технологического цикла упрочнения оснастки.

Для цитирования: Повышение эффективности процесса литья под давлением в металлические формы / И.А. Савин, Н.Д. Юсубов, Р.В. Гавариев, Х.М. Аббасова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2026. – Т. 28, № 1. – С. 101–113. – DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.1-101-113.

Введение

Обострение конкурентной борьбы, присущее современному рынку, заставляет компании налаживать производство товаров, отвечающих растущим запросам покупателей, параллельно

минимизируя издержки. К числу перспективных технологических подходов для создания продукции с улучшенными эксплуатационными свойствами относится литье под давлением, активно используемое при отливке изделий из цветных металлов, например на основе цинка. Значительное распространение эта технология получила в производстве фурнитуры для окон, поскольку позволяет точно воспроизводить миниатюрные детали со сложной геометрией.

*Адрес для переписки

Юсубов Низами Дамир, д.т.н., профессор
Азербайджанский технический университет,
пр. Г. Джавида, 25,
AZ 1073, г. Баку, Азербайджан

Тел.: +994 (55) 324 50 12, e-mail: nizami.yusubov@aztu.edu.az

Литье под давлением представляет собой одну из наиболее востребованных технологий, позволяющую изготавливать точные фасонные отливки, отличающиеся сложной геометрией и высокой четкостью воспроизведения наружной конфигурации. Основная сфера использования этого способа связана с производством деталей из алюминиевых сплавов, удельный вес которых в структуре выпускаемой таким методом продукции в отдельных странах достигает 50 %. Несмотря на высокую точность и эффективность формования, данная технология характеризуется определенным набором типовых недостатков, среди которых следует выделить подповерхностную газовую пористость, образующуюся из-за попадания воздуха в расплав при его движении по литниковой системе, а также дефекты поверхностного слоя, проявляющиеся в виде значительной шероховатости и газовых раковин [1].

Согласно нормативным документам основным параметром, определяющим качество поверхности отливок, выступает ее шероховатость. Исследования показывают, что снижение качества поверхности обусловлено износом формообразующих элементов вследствие многократных механических и термических нагрузок, возникающих в процессе заливки расплава.

Повысить качество формообразующих поверхностей и, как следствие, уменьшить шероховатость отливаемой под давлением продукции можно на основе одного из двух вариантов – корректировки режимных параметров технологии и подбора материалов для оснастки с их последующей химико-термической обработкой. Первый вариант сопряжен с существенными финансовыми вложениями в опытно-конструкторские работы и переналадку производственного комплекса, тогда как второй вариант нередко лишен экономической эффективности из-за потребности в использовании высоколегированных сталей повышенной стоимости. При этом наиболее бюджетной и технологически оправданной разновидностью упрочняющей обработки является азотирование.

Альтернативой традиционным методам повышения качества поверхности пресс-форм служат современные технологии обработки, включая лазерное легирование, плазменное облучение, электронно-лучевую модификацию,

ионное легирование и магнетронное распыление. Несмотря на высокую эффективность этих технологий, их применение в литейном производстве остается ограниченным. В данном контексте заслуживает особого внимания метод катодно-ионной бомбардировки, который представляет собой перспективное направление в повышении качества формообразующих поверхностей.

Современная практика модернизации литейного производства базируется на двух основных подходах: регулировке режимных параметров технологического процесса и совершенствовании конструкционного исполнения оснастки. Среди управляемых факторов наиболее существенное влияние на формирование отливки оказывают интенсивность прессования, величина прикладываемого давления и температурный баланс рабочего инструмента [2].

Скоростной режим напрямую определяет скорость заполнения полости формы. Производство отливок с разветвленной геометрией, включая тонкостенные и периферийные элементы, технологически обуславливает необходимость интенсификации подачи расплава. Тем не менее экстремальное наращивание скорости чревато энтропией воздушных масс в металлический поток и последующей генерацией объемных газовых дефектов [3]. В силу этого на практике часто возникает ситуация, требующая компромиссного решения, когда для гарантированного заполнения формы допускается наличие в готовом изделии некоторого уровня пористости или ухудшения состояния поверхности.

Величина давления является критическим фактором для обеспечения структурной однородности и соответствия отливки заданным характеристикам по плотности. В литературе представлены нормативы по установлению минимально необходимого усилия, характерного для специфики конфигурации производимых деталей [4]. Следует, однако, отметить, что внедрение расчетных оптимальных режимов не всегда достижимо по причине ограниченного технологического потенциала эксплуатируемого литейного оборудования.

Формирование стабильного теплового режима при формировании отливок зависит от комплекса взаимосвязанных условий. К ним относятся температурные показатели металла в расплав-



ленном состоянии, которые зависят от его структуры, а также тепловое состояние оснастки, определяемое маркой инструментальной стали, способами химико-термического упрочнения ее рабочей поверхности и составом используемых разделительных и смазочных средств [5]. Стоит отметить, что допустимый интервал корректировки температуры металла не превышает 10 °С, а типичным материалом для изготовления пресс-форм служит сталь марки 4X5МФС, подвергаемая азотированию. Таким образом, достижение сбалансированного теплового режима литья требует проведения трудоемких итерационных расчетов и экспериментальных подгоночных испытаний, что увеличивает время и стоимость подготовки производства.

Современная научно-исследовательская практика демонстрирует многообразие вариантов решений, направленных на улучшение эксплуатационных свойств алюминиевых отливок, производимых литьем под давлением. Тем не менее реализация любой из известных технологий сталкивается с объективными технологическими барьерами и предполагает существенные материальные вложения и временные ресурсы для проведения испытательных циклов, а также тонкой регулировки производственных параметров. В подобной ситуации особую актуальность приобретает создание инновационной методики коррекции свойств алюминиевых отливок, демонстрирующей минимальную чувствительность к вариациям технологических режимов литейного производства. К числу принципиально важных разработок в данной области относится использование упрочняющих покрытий на основе нитридных и карбонитридных фаз, наносимых на формообразующие элементы оснастки методом ионно-плазменного осаждения в вакуумной среде [6].

К дополнительным технологическим решениям, способствующим улучшению качества отливок, относятся создание вакуума в полости оснастки [7] и применение кислородного процесса литья под давлением [8–12]. Основной целью указанных методов выступает минимизация газовой фазы в рабочем пространстве пресс-формы. Вместе с тем внедрение этих подходов сопряжено с необходимостью кардинального переоснащения производственной линии и создания дополнительных систем обеспечения без-

опасности, что ведет к значительному росту капитальных затрат.

Согласно данным экспериментальных исследований [13–19], осаждение многослойной структуры TiCN-TiN-MoN методом катодно-ионного напыления на рабочие поверхности литейной оснастки, задействованной в производстве алюминиевых отливок, может обеспечить существенное улучшение характеристик готовой продукции. Механизм положительного воздействия обусловлен комплексом факторов, ключевыми из которых выступают минимизация сил трения на границе раздела фаз «расплав – оснастка» и оптимизация теплоотвода в процессе эксплуатации пресс-формы.

Помимо упомянутого метода существуют и другие подходы к нанесению защитных слоев. Исследования, описанные в источниках [20–23], показывают, что нанесение металлического слоя на рабочую поверхность пресс-формы может повысить общую эффективность процесса литья под давлением цветных металлов и сплавов, приводя к получению отливок с улучшенным качеством и увеличенным сроком службы. Материалами покрытия были выбраны вольфрам и карбид вольфрама. Однако в указанных исследованиях не установлена четкая корреляция между конкретными методами нанесения покрытия и результирующими показателями качества отливок. Кроме того, в них отсутствует целенаправленный анализ особых требований и проблем, присущих именно процессу литья под давлением алюминиевых сплавов.

Согласно результатам, представленным в научных работах [24–29], ионная имплантация хрома и молибдена демонстрирует значительный потенциал для модификации поверхностных свойств. Вместе с тем практическое применение этой методики сдерживается рядом технологических ограничений, ключевыми из которых являются формирование покрытия с недостаточной толщиной, негативно влияющей на сопротивление абразивному износу, а также высокая сложность реализации самого процесса осаждения.

Экспериментальные исследования, изложенные в работе [12], продемонстрировали перспективность применения композитных покрытий металл-керамика. Хотя полученные материалы характеризуются повышенной микротвердо-

стью, термической стабильностью и наноразмерной толщиной, они одновременно проявляют критичные эксплуатационные ограничения. К последним относится склонность к хрупкому разрушению и недостаточная адгезионная прочность как между разнородными слоями покрытия, так и на границе раздела с подложкой из материала пресс-формы.

Таким образом, современное производство располагает значительным арсеналом технологий осаждения металлизированных слоев на рабочие поверхности литейной оснастки. Тем не менее масштабное промышленное внедрение этих разработок сдерживается комплексом технико-экономических барьеров. Наиболее существенными из них выступают недостаточная адгезия к материалу подложки, технологическая сложность процессов нанесения, недостаточная износостойкость, склонность к хрупкому разрушению и строгие требования к минимальной толщине формируемого слоя.

Целью исследования является сравнительный анализ влияния различных методов упрочнения формообразующей поверхности пресс-форм – классического азотирования и нанесения износостойких покрытий методом катодно-ионной бомбардировки (TiN и многослойного TiCN-TiN-MoN) – на ключевые показатели качества алюминиевых отливок, полученных литьем под давлением.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- экспериментальная оценка пористости: проведен сравнительный анализ уровня и характера пористости в отливках, полученных с использованием пресс-форм с азотированной поверхностью и с поверхностями, защищенными покрытиями TiN и TiCN-TiN-MoN;

- исследование шероховатости поверхности: определено влияние типа защитного покрытия на шероховатость поверхности отливок и прослежена динамика изменения этого параметра в зависимости от количества рабочих циклов пресс-формы;

- сравнительный анализ эксплуатационной стойкости: оценен и сопоставлен эксплуатационный ресурс пресс-форм с различными типами защитных поверхностей по критерию сохранения требуемого качества отливок.

Методика исследований

Для подтверждения рабочей гипотезы о взаимосвязи между применением упрочняющих покрытий, нанесенных методом катодно-ионной бомбардировки (КИБ), и улучшением свойств литых деталей была реализована программа экспериментальных испытаний. Основной задачей этих испытаний стало сопоставление степени пористости и уровня шероховатости поверхности готовых отливок. Объектами сравнительного исследования выступили две группы образцов:

- образцы, полученные с использованием пресс-форм с КИБ-покрытиями – монослойным TiN (3 мкм) и многослойным TiCN-TiN-MoN (6 мкм);

- образцы, изготовленные по базовой технологии с применением азотированной пресс-формы из стали 4X5МФС, толщина упрочненного слоя которой составила 100 мкм. Данный метод азотирования принят в качестве стандартного в практике литья под давлением.

Выбор сравниваемых методов упрочнения с существенно различной толщиной формируемого слоя (азотирование ~100 мкм, однослойное TiN ~3 мкм, многослойное TiCN-TiN-MoN ~6 мкм) обусловлен их промышленной репрезентативностью. Указанные толщины соответствуют типичным технологическим режимам, применяемым в производстве для каждого из методов. Сравнение проводилось в условиях, максимально приближенных к реальной эксплуатации, где толщина слоя представляет собой неотъемлемую характеристику технологии. Целью работы являлось не изолированное сравнение свойств слоев равной толщины, а комплексная оценка конкурирующих технологических решений в их стандартном исполнении.

Нанесение КИБ-покрытий проводилось в вакуумной установке ВУ-1БС методом катодного распыления, где материал покрытия испарялся с катодной мишени и осаждался на поверхность пресс-формы, выступавшую в качестве анода. Режимные параметры процесса приведены в табл. 1.

В качестве объекта исследования использовалась отливка типа «ручка», выполненная из алюминиевого сплава АК7 (ГОСТ 1583–93). Такой выбор обусловлен склонностью массивных сегментов данной конфигурации к образованию

Технологические параметры получения защитного покрытия

Process parameters for the production of a protective coating

Предельно-остаточное давление в рабочей камере	$5...4 \cdot 10^{-3}$ Па
Предварительный нагрев формообразующей поверхности и приспособления для нанесения покрытия	300...340 °С
	20...30 минут
Давление аргона в рабочей камере	$4...3,5 \cdot 10^{-2}$ Па
Ток соленоида источника	4 А
Напряжение на аноде	1200...1300 В
Установившийся ток анода	0,12...0,15 А
Очистка изделия включением испарителя	3 минуты
Опорное напряжение	100...150 В
Давление газовой среды	$6...5 \cdot 10^{-2}$ Па
Время нанесения покрытия	20 минут
Расстояние от катода до покрываемого изделия	240...260 мм

газовой пористости. Критическими геометрическими характеристиками отливки являлись максимальная толщина стенки 15 мм и масса 0,1 кг (рис. 1). Технические условия на изделие устанавливали жесткие требования к состоянию поверхности (шероховатость не более $Ra\ 3,2$ мкм) и механической стойкости (способность выдерживать крутящий момент до 25 Н·м без необратимых деформаций).

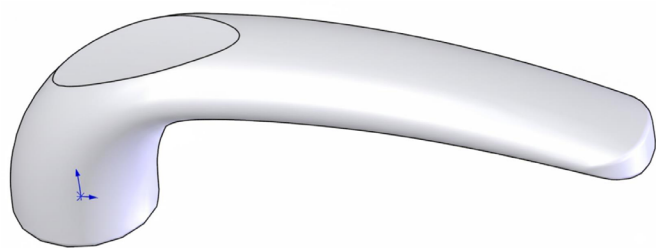


Рис. 1. Отливка типа «ручка»

Fig. 1. "Handle"-type casting

Определение уровня пористости проводилось в соответствии с параметрами, указанными в стандарте ГОСТ 1583–93, регламентирующем локализацию контрольного микрошлифа в центральной части изделия. Поскольку для алюминиевых отливок, сформированных литьем под давлением, характерно смещение максимальной плотности пор на определенную глубину от поверхности [14], то методика была модифицирована выполнением серии последовательных срезов для идентификации слоя с максималь-

ной дефектностью. Технология подготовки образцов, также прописанная в ГОСТ 1583–93, включала в себя фрезерную обработку вдоль зоны предполагаемой максимальной пористости (внутри объема отливки) с последующим изготовлением трех макрошлифов площадью 1 см², имеющих параметр шероховатости $Ra \leq 1,6$ мкм (рис. 2). Количественная оценка дефектов структуры осуществлялась методом визуального анализа с фиксацией количества пор, их диаметральных характеристик и последующим ранжированием по 5-балльной шкале, где минимальный балл указывает на незначительную пористость, а максимальный – на критическую концентрацию дефектов.

Определение шероховатости поверхности проводилось контактным профилометром

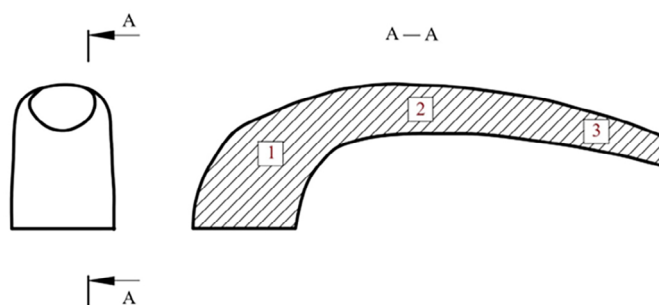


Рис. 2. Сечение отливки для определения пористости

Fig. 2. Cross-section of the casting for porosity determination

Mitutoyo SJ-210, оснащенным алмазным индентором радиусом 2 мкм. Для минимизации систематической погрешности, обусловленной ориентацией отливки относительно литников, финальное значение параметра Ra определялось путем усреднения результатов трех отдельных замеров, выполненных в различных точках поверхности образца.

Для каждой экспериментальной зоны выполняли $n = 3...5$ параллельных измерений. Результаты представлены как среднее арифметическое $\bar{x}$ плюс-минус доверительный интервал (95 %). Стандартное отклонение (s) и доверительные интервалы рассчитывали по стандартным формулам математической статистики. Статистическую значимость различий между группами определяли с помощью двухвыборочного t -теста с неравными дисперсиями ($p < 0,05$).

Для обеспечения статистической значимости данных выполнялся сравнительный анализ отливок, произведенных в рамках различных циклов плавки. Регламентированные технологические режимы литья включали в себя применение алюминиевого сплава АК7 (ГОСТ 1583–93), скорость инъекции расплава 5 м/с, давление прессования 80 ± 8 МПа, систему водяного охлаждения оснастки, усилие смыкания 300 ± 15 кН, четырехгнездовое исполнение пресс-формы, температурный диапазон расплава $660...670$ °С и температуру предварительного подогрева рабочей оснастки $130...150$ °С.

Результаты и их обсуждение

Разработанное многослойное покрытие TiCN-TiN-MoN демонстрирует комплекс эксплуатационных преимуществ, отвечающих специфическим условиям литья алюминиевых сплавов под давлением. Критически важными характеристиками композиции выступают устойчивость к химическому взаимодействию с расплавом, минимальное значение коэффициента трения ($f = 0,26...0,28$), субмикронная толщина ($3...10$ мкм), исключая необходимость корректировки геометрии оснастки, многослойность, а также повышенное сопротивление трещинам благодаря чередованию слоев с модулированной твердостью и значительными остаточными напряжениями сжатия. Дополнительным преимуществом является формиро-

вание прочных диффузионных связей на всех границах раздела – между последовательными слоями покрытия и на контакте базового слоя с материалом пресс-формы [6].

Совокупность указанных свойств приводит к снижению значений критерия Рейнольдса, что минимизирует образование турбулентных завихрений металлического расплава в наиболее проблемных участках формы. К таким зонам относятся галтельные переходы; области, расположенные напротив литниковых каналов; узкие полости. Вследствие появления ламинарного потока уменьшается количество захваченных газовых включений в теле отливки, что в конечном счете положительно сказывается на ее структурной целостности и эксплуатационных характеристиках.

Физический механизм положительного влияния многослойного КИБ-покрытия на качество отливок является комплексным:

- снижение трения и улучшение заполнения формы: низкий коэффициент трения ($f = 0,26...0,28$) и высокая гладкость покрытия минимизируют адгезионное взаимодействие на границе «расплав – оснастка». Это способствует ламинаризации потока (подтверждается снижением критерия Рейнольдса), уменьшению захвата воздуха и более полному заполнению тонких элементов формы;

- управление тепловым потоком: многослойная структура с чередованием слоев различной теплопроводности (TiCN, TiN, MoN) создает регулируемый термический барьер. Это способствует более равномерному отводу тепла от поверхности отливки, уменьшая термические напряжения и снижая риск образования горячих трещин;

- химическая инертность: покрытие выступает как барьер, препятствующий диффузии и химическому взаимодействию между активным алюминиевым расплавом и сталью пресс-формы, что напрямую уменьшает вероятность образования поверхностных дефектов.

Проведенный послойный анализ макроструктуры (рис. 2) выявил зону максимальной концентрации поровых дефектов в интервале глубин $1...4$ мм от внешней поверхности отливки. На основании установленной закономерности для последующих исследований была выбрана стандартизированная глубина 3 мм, соответствующая

щая области наиболее выраженной пористости (рис. 3).

Согласно результатам проведенных исследований (табл. 2) образцы, произведенные в пресс-формах с азотированием, соответствуют 3-му баллу по принятой классификации пористости, т. е. среднему уровню дефектности. В то же время изделия, полученные с использованием оснастки с покрытиями, нанесенными методом катодно-ионной бомбардировки, демонстрируют улучшенные структурные характеристики – уменьшение максимального диаметра пор

и снижение их общего количества, что позволяет классифицировать их по 2-му баллу как образцы с пониженной пористостью.

Следует отметить, что макрошлиф № 1 показал наивысший уровень пористости, что объясняется особенностями течения расплава в данной зоне, связанными с изменением направления его движения, а также увеличенной толщиной стенки изделия в этом сечении.

Параметр шероховатости поверхности отливок сохранял стабильные значения на всех контролируемых участках, не превышая уровня

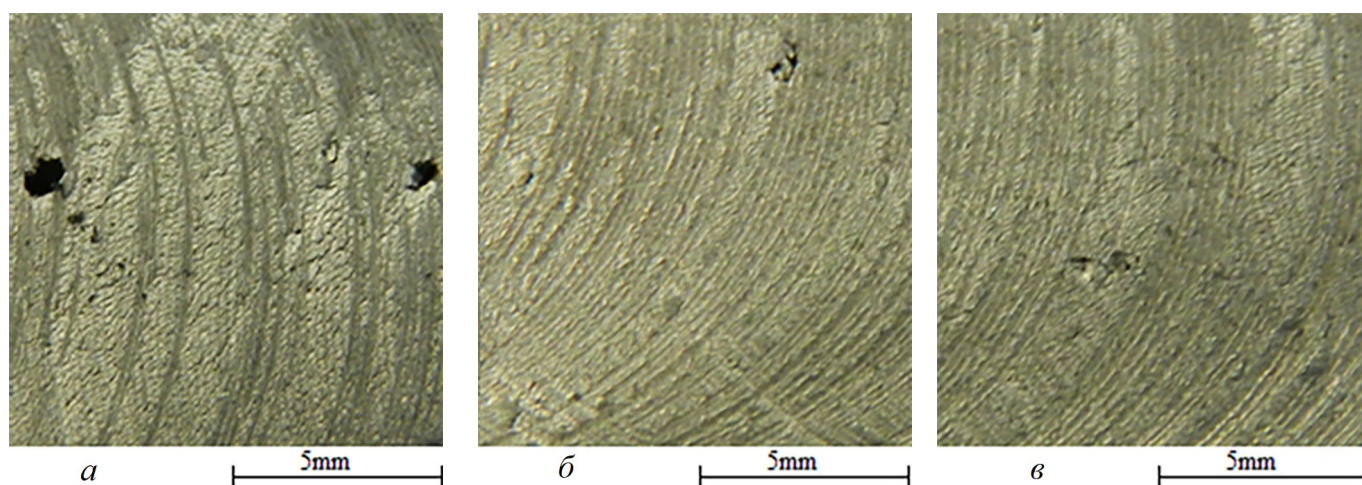


Рис. 3. Макрошлиф отливки типа «ручка», полученной в пресс-форме:
а – с азотированием; б – с покрытием TiN; в – с покрытием TiCN-TiN-MoN

Fig. 3. Macrosection of the “Handle”-type casting produced in a die with:
а – a nitrided surface; б – a TiN coating; в – a TiCN-TiN-MoN coating

Таблица 2

Table 2

Показатели пористости отливок
Porosity indicators of the castings

Вид обработки формообразующей поверхности / Surface treatment of the mold cavity	№ макрошлифа / Macrosection No.	Максимальный диаметр пор, мм / Maximum pore diameter (mm)	Количество пор, ед. / Number of pores	Балл пористости по ГОСТ 1583–93 / Porosity grade accord- ing to GOST 1583–93
Азотирование / Nitriding	1	0,9	15	4
	2	0,5	11	3
	3	0,6	8	3
Покрытие TiN / TiN coating	1	0,4	10	3
	2	0,2	6	2
	3	0,2	4	2
Покрытие TiCN-TiN-MoN / TiCN-TiN-MoN coating	1	0,3	8	3
	2	0,2	6	2
	3	0,2	5	2

Ra 0,8 мкм в начальный период эксплуатации пресс-формы независимо от способа обработки рабочей поверхности оснастки. В течение первых 50 тыс. рабочих циклов технология с нанесением покрытия на поверхности пресс-формы не демонстрировала существенного влияния на данный показатель, однако при дальнейшем увеличении количества запрессовок разница в значениях шероховатости продукции, полученной с использованием разных методов обработки, заметно возрастала (рис. 4).

Ресурсные испытания показали, что к моменту достижения 75 тыс. рабочих циклов шероховатость поверхности отливок, сформированных в азотированной пресс-форме, достигла критического порога в Ra 3,2 мкм. Напротив, образцы, полученные с применением покрытий, нанесенных методом катодно-ионной бомбардировки, сохраняли значение параметра Ra на уровне в среднем вдвое ниже. Проведенный анализ позволяет заключить, что пресс-форма с азотированным покрытием сохраняет приемлемое качество поверхности в течение 75 тыс. циклов, тогда как оснастка с покрытиями, полу-

ченными методом катодно-ионной бомбардировки, обеспечивает соответствие требованиям к шероховатости вплоть до 100 тыс. рабочих циклов. Сравнительная оценка также выявила преимущество многослойной системы TiCN-TiN-MoN над монослойным покрытием TiN по комплексу эксплуатационных характеристик.

Технико-экономический анализ показывает, что нанесение износостойких покрытий методом катодно-ионной бомбардировки (КИБ) обладает не только технологическими, но и экономическими преимуществами перед традиционным азотированием. При сопоставимой капитальной стоимости оборудования трудоемкость процесса КИБ (2...3 часа) на порядок ниже, чем у азотирования (20...30 часов), что обеспечивает сокращение операционных расходов и уменьшение времени простоя пресс-форм. Многослойное покрытие TiCN-TiN-MoN, сочетающее высокую износостойкость и низкую трудоемкость нанесения, может быть рекомендовано для серийного производства как наиболее рациональное решение, обеспечивающее снижение себестоимости отливок при одновременном повышении их качества.

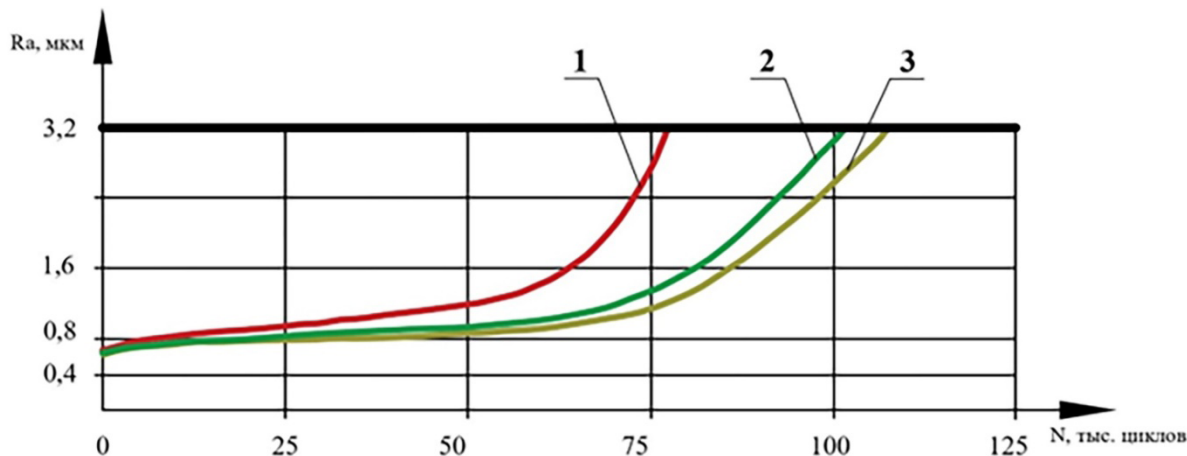


Рис. 4. Значения шероховатости отливок, полученных в пресс-формах:
1 – с азотированием; 2 – с покрытием TiN; 3 – с покрытием TiCN-TiN-MoN

Fig. 4. Roughness values of castings produced in dies with:
1 – a nitrided surface; 2 – a TiN coating; 3 – a TiCN-TiN-MoN coating

Выводы

На основе проведенного исследования было установлено, что нанесение износостойких покрытий методом катодно-ионной бомбардировки статистически значимо снижает объемную газовую пористость отливок по сравнению

с классическим азотированием. Наиболее эффективным является многослойное покрытие TiCN-TiN-MoN, которое обеспечивает снижение максимального диаметра пор на 58 %, а их общего количества – на 40 %, что позволяет классифицировать получаемые отливки как изделия с пониженной пористостью (2 балла



по ГОСТ 1583–93 против 3 баллов для азотирования).

Доказано, что покрытия, нанесенные методом КИБ, обеспечивают более стабильное и низкое значение шероховатости (Ra) на протяжении всего жизненного цикла оснастки. Пресс-форма с азотированной поверхностью гарантирует соответствие требованиям к шероховатости ($Ra \leq 3,2$ мкм) в течение 75 тыс. циклов, в то время как оснастка с покрытиями TiN и TiCN-TiN-MoN сохраняет этот параметр на уровне $Ra \leq 1,6$ мкм вплоть до 100 тыс. циклов, демонстрируя двукратное превышение критерия по параметру шероховатости.

Таким образом, применение многослойного наноструктурированного покрытия TiCN-TiN-MoN является наиболее технологически оправданным методом повышения эксплуатационного ресурса пресс-форм. Данное покрытие, сочетающее низкий коэффициент трения, химическую инертность и высокую адгезию, не только улучшает качественные показатели отливок, но и увеличивает стойкость самой оснастки, что в комплексе существенно повышает эффективность процесса литья под давлением по сравнению с азотированием и однослойным покрытием TiN.

Список литературы

1. Горюнов И.И. Пресс-формы для литья под давлением. – Л.: Машиностроение, 1973. – 256 с.
2. Жуков А.А., Немтырев О.В., Хасанова Л.А. Исследование коррозионной стойкости сталей для пресс-форм литья под давлением // Заготовительные производства в машиностроении. – 2014. – № 4. – С. 31–35.
3. Gavariyev R.V., Gavariyeva K.N. The principle of choosing the composition of the protective coating for die casting molds // Defect and Diffusion Forum. – 2021. – Vol. 410. – P. 495–500. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/ddf.410.495.
4. Белонухов А.К. Технологические режимы литья под давлением. – М.: Машиностроение, 1985. – 272 с.
5. Жуков А.А., Немтырев О.В. Исследование тепловой структурной стабильности сталей для пресс-форм литья под давлением // Научно-технические исследования в машиностроении. – 2014. – № 4 (34). – С. 3–10.
6. Case-based product development of a high-pressure die casting injection subset using design science research / M.C. Tojal, F.J.G. Silva, R.D.S.G. Campilho, A.G. Pinto, L.P. Ferreira // FME Transactions. – 2022. – Vol. 50 (1). – P. 32–45. – DOI: 10.5937/fme2201032T.
7. Gavariyev R.V., Soldatkina E.N., Gavariyeva K.N. Coatings and lubricant to forming surfaces of molds for casting under pressure // Solid State Phenomena. – 2021. – Vol. 316. – P. 789–793. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.316.789.
8. Лившиц В.Б., Мильчакова Н.Е., Берестнев А.А. Способ упрочнения вкладышей пресс-форм для литья с кристаллизацией под давлением // Литейное производство. – 2018. – № 3. – С. 30–32.
9. Development trend in composition optimization, microstructure manipulation, and strengthening methods of die steels under lightweight and integrated die casting / Z.-J. Bao, H.-Y. Yang, B.-X. Dong, F. Chang, C.-D. Li, Y. Jiang, L.-Y. Chen, S.-L. Shu, Q.-C. Jiang, F. Qiu // Materials. – 2023. – Vol. 16 (18). – P. 6235. – DOI: 10.3390/ma16186235.
10. Experimental analysis of heat transfer at the interface between die casting molds and additively manufactured cooling inserts / P. Capela, I.V. Gomes, V. Lopes, F. Prior, D. Soares, J.C. Teixeira // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2023. – Vol. 32 (23). – P. 10934–10942. – DOI: 10.1007/s11665-023-08425-z.
11. Enhanced cooling channel efficiency of high-pressure die-casting molds with pure copper linings in cooling channels via explosive bonding / S.-S. Shin, S.-K. Lee, D.-K. Kim, B. Lee // Journal of Materials Processing Technology. – 2021. – Vol. 297. – P. 117235. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117235.
12. Clark L.D., Davey K., Hinduja S. Novel cooling channel shapes in pressure die casting // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2001. – Vol. 50 (10). – P. 2411–2440. – DOI: 10.1002/nme.126.
13. Schuchardt T., Müller S., Dilger K. A near-surface layer heat treatment of die casting dies by means of electron-beam technology // Metals. – 2021. – Vol. 11 (8). – P. 1236. – DOI: 10.3390/met11081236.
14. К вопросу пористости алюминиевых отливок, полученных литьем под давлением / Р.В. Гавариев, И.А. Савин, И.О. Леушин, К.Н. Гавариева // Цветные металлы. – 2021. – № 8. – С. 76–82. – DOI: 10.17580/tsm.2021.08.12.
15. Akkaya E., Kayır Y. The effect of aluminium injection parameters on the mechanical properties of the material produced by high pressure die-casting // Gazi University Journal of Science, Part C: Design and Technology. – 2023. – Vol. 11 (2). – P. 421–430. – DOI: 10.29109/gujsc.1211920.
16. Effect of injection parameters and vacuum on the strength and porosity amount of die-casted A380 alloy / B. Yalçın, M. Koru, O. Ipek, A.E. Özgür // International Journal of Metalcasting. – 2017. – Vol. 11 (2). – P. 195–206. – DOI: 10.1007/s40962-016-0046-2.
17. Concer D., Marcondes P.V.P. Experimental and numerical simulation study of porosity on high-pressure

aluminum die casting process // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2017. – Vol. 39. – P. 3079–3088. – DOI: 10.1007/s40430-016-0672-x.

18. *Nourian-Avval A., Fatemi A.* Characterization and analysis of porosities in high-pressure die cast aluminum by using metallography, X-ray radiography, and micro-computed tomography // Materials. – 2020. – Vol. 13 (14). – P. 3068. – DOI: 10.3390/ma13143068.

19. Study on the influence of injection velocity on the evolution of hole defects in die-cast aluminum alloy / H. Cao, Q. Zhang, W. Zhu, S. Cui, Q. Yang, Z. Wang, B. Jiang // Materials. – 2024. – Vol. 17 (20). – P. 4990. – DOI: 10.3390/ma17204990.

20. *Верещака А.С.* Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.

21. *Юсубов Н.Д., Аббасова Х.М.* Полнофакторная матричная модель точности выполняемых размеров на многоцелевых станках с ЧПУ // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 6–20. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-6-20.

22. *Yusubov N.D., Abbasova H.M.* Models of cutting forces in the matrix theory of multitool machining accuracy // Key Engineering Materials. – 2024. – Vol. 979. – P. 27–38. – DOI: 10.4028/p-bW48Sb.

23. *Yusubov N., Abbasova H., Khankishiyev I.* Development of a planning theory for multi-tool machining with the possibilities of modern CNC machine tools // Forschung im Ingenieurwesen. – 2021. – Vol. 85 (2). – P. 661–678. – DOI: 10.1007/s10010-021-00478-7.

24. *Gavariev R.V., Savin I.A., Gavarieva K.N.* Determination of properties of wear-resistant coatings of metal forms // Solid State Phenomena. – 2021. – Vol. 316. – P. 732–737. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.316.732.

25. Tribological and wear performance of nanocomposite PVD hard coatings deposited on aluminum die casting tool / J.M. Paiva, G. Fox-Rabinovich, E. Locks Junior, P. Stolf, Y.S. Ahmed, M.M. Martins, C. Bork, S. Veldhuis // Materials. – 2018. – Vol. 11 (3). – P. 358. – DOI: 10.3390/ma11030358.

26. *Gopal S., Lakare A., Shivpuri R.* Evaluation of thin film coatings for erosive–corrosive wear prevention in die casting dies // Surface Engineering. – 1999. – Vol. 15 (4). – P. 297–300. – DOI: 10.1179/026708499101516632.

27. Experimental evaluation of ceramic coatings for die protection in low-pressure die-casting process / A. López-Ortega, O. Areitioaurtena, E. Fuentes, A. Igar-tua, L. Merchán, E. Pardo, J. Montero, R. Granado, I. Martinez de la Pera, J. Mendizabal, B. Zabala // Coatings. – 2024. – Vol. 14 (5). – P. 643. – DOI: 10.3390/coatings14050643.

28. Study of wear phenomena of coatings for die-casting / G. Gautier, M. Faga, V. Tebaldo, G. Martra, F. Cartasegna // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 302. – P. 520–524. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.302.520.

29. Performance enhancements of die casting tools through PVD nanocoatings / M. Rosso, D. Ugues, E. Torres, M. Perucca, P. Kapranos // International Journal of Material Forming. – 2008. – Vol. 1, suppl. 1. – P. 1259–1262. – DOI: 10.1007/s12289-008-0131-z.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2026 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Enhancing the efficiency of the die casting process in metal molds

Igor Savin^{1, a}, Nizami Yusubov^{2, b, *}, Renat Gavariev^{1, c}, Heyran Abbasova^{2, d}

¹ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, 10, K. Marx St., Kazan, 420111, Russian Federation

² Azerbaijan Technical University, 25 H. Cavid avenue, Baku, AZ 1073, Azerbaijan

^a <https://orcid.org/0000-0001-8653-9960>, 1705kzn@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0002-6009-9909>, nizami.yusubov@aztu.edu.az;

^c <https://orcid.org/0000-0003-3417-9670>, RVGavariev@kai.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0002-0407-5275>, abbasova.heyran@aztu.edu.az

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 12 December 2025

Revised: 06 January 2026

Accepted: 31 January 2026

Available online: 15 March 2026

Keywords:

Die casting

Protective coatings

Cathode-ion bombardment

Porosity reduction

Aluminum alloys

Funding

This work was supported by the Azerbaijan Science Foundation under Grant No. AEF-MGC-2024-2(50)-16/01/1-M-01.

ABSTRACT

Introduction. Die casting remains one of the most productive methods for producing complex thin-walled castings from aluminum alloys. However, typical problems of the process include subsurface gas porosity and the deterioration of product surface roughness due to the wear of the mold cavity surfaces. **The purpose of the work** is to conduct a comparative assessment of the effectiveness of various methods for strengthening the working surface of molds – traditional nitriding and the deposition of wear-resistant coatings by cathode-ion bombardment (TiN and multilayer TiCN–TiN–MoN) – to improve the quality of aluminum alloy castings. **Research Methods.** Experimental studies were conducted on “Handle”-type castings made of AK7 alloy. The quality of castings obtained using molds with three types of protective surface coatings (nitriding, TiN, and TiCN–TiN–MoN) was evaluated based on the level of volumetric porosity (in accordance with GOST 1583-93) and the change in the roughness parameter *Ra* during durability tests (up to 100,000 casting cycles). **Results and Discussion.** It was established that the application of coatings using the CIB (cathode-ion bombardment) method statistically significantly improves the quality of castings compared to nitriding. The multilayer TiCN–TiN–MoN coating demonstrated the best results: a reduction in the maximum pore diameter by 58% and in their total number by 40%, which allowed the castings to be classified in the reduced porosity category (Grade 2 vs. Grade 3 for nitriding). Durability tests showed that the mold with a nitrided surface ensures acceptable casting roughness (*Ra* ≤ 3.2 μm) for 75,000 cycles, while the molds with TiN and TiCN–TiN–MoN coatings maintain this parameter at *Ra* ≤ 1.6 μm up to 100,000 cycles. An important practical advantage of the CIB method is the significantly lower processing time of the deposition process (2–3 hours) compared to nitriding (20–30 hours), which reduces operating costs and equipment downtime. **Conclusions.** The application of the multilayer nanostructured TiCN–TiN–MoN coating deposited by cathode-ion bombardment is the most rational solution for increasing the service life of molds and improving the quality of aluminum alloy castings. This technology ensures a comprehensive improvement of key indicators (porosity, roughness) and offers significant economic potential due to the reduction in the duration of the mold strengthening process.

For citation: Savin I.A., Yusubov N.D., Gavariev R.V., Abbasova H.M. Enhancing the efficiency of the die casting process in metal molds. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2026, vol. 28, no. 1, pp. 101–113. DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.1-101-113. (In Russian).

References

1. Goryunov I.I. *Press-formy dlya lit'ya pod davleniem* [Press molds for injection molding]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1973. 256 p.
2. Zhukov A.A., Nemtyrev O.V., Khasanova L.A. Issledovanie korrozionnoi stoikosti stalei dlya press-form lit'ya pod davleniem [Research of corrosion resistance of steels for dies for die casting]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii = Blank Production in Mechanical Engineering*, 2014, no. 4, pp. 31–35.
3. Gavariev R.V., Gavarieva K.N. The principle of choosing the composition of the protective coating for die casting molds. *Defect and Diffusion Forum*, 2021, vol. 410, pp. 495–500. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ddf.410.495.

* Corresponding author

Yusubov Nizami D., D.Sc. (Engineering), Professor
 Azerbaijan Technical University,
 25 H. Javid avenue,
 AZ 1073, Baku, Azerbaijan
 Tel.: +994 (55) 324 50 12, e-mail: nizami.yusubov@aztu.edu.az

4. Belopukhov A.K. *Tekhnologicheskie rezhimy lit'ya pod davleniem* [Technological modes of die casting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 272 p.
5. Zhukov A.A., Nemtyrev O.V. Issledovanie teplovoi strukturnoi stabil'nosti stalei dlya press-form lit'ya pod davleniem [Research of thermal structural stability of steels for casting press moulds]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2014, vol. 4 (34), pp. 3–10.
6. Tojal M.C., Silva F.J.G., Campilho R.D.S.G., Pinto A.G., Ferreira L.P. Case-based product development of a high-pressure die casting injection subset using design science research. *FME Transactions*, 2022, vol. 50 (1), pp. 32–45. DOI: 10.5937/fme2201032T.
7. Gavariev R.V., Soldatkina E.N., Gavarieva K.N. Coatings and lubricant to forming surfaces of molds for casting under pressure. *Solid State Phenomena*, 2021, vol. 316, pp. 789–793. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.316.789.
8. Livshits V.B., Milchakova N.E., Berestnev A.A. Sposob uprochneniya vkladyshei press-form dlya lit'ya s kristallizatsiei pod davleniem [Method of strengthening inserts of press molds for casting with crystallization under pressure]. *Liteinoe proizvodstvo = Foundry. Technology and Equipment*, 2018, no. 3, pp. 30–32.
9. Bao Z.-J., Yang H.-Y., Dong B.-X., Chang F., Li C.-D., Jiang Y., Chen L.-Y., Shu S.-L., Jiang Q.-C., Qiu F. Development trend in composition optimization, microstructure manipulation, and strengthening methods of die steels under lightweight and integrated die casting. *Materials*, 2023, vol. 16 (18), pp. 6235. DOI: 10.3390/ma16186235.
10. Capela P., Gomes I.V., Lopes V., Prior F., Soares D., Teixeira J.C. Experimental analysis of heat transfer at the interface between die casting molds and additively manufactured cooling inserts. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2023, vol. 32 (23), pp. 10934–10942. DOI: 10.1007/s11665-023-08425-z.
11. Shin S.-S., Lee S.-K., Kim D.-K., Lee B. Enhanced cooling channel efficiency of high-pressure die-casting molds with pure copper linings in cooling channels via explosive bonding. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, vol. 297, p. 117235. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117235.
12. Clark L.D., Davey K., Hinduja S. Novel cooling channel shapes in pressure die casting. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2001, vol. 50 (10), pp. 2411–2440. DOI: 10.1002/nme.126.
13. Schuchardt T., Müller S., Dilger K. A near-surface layer heat treatment of die casting dies by means of electron-beam technology. *Metals*, 2021, vol. 11 (8), p. 1236. DOI: 10.3390/met11081236.
14. Gavariev R.V., Savin I.A., Leushin I.O., Gavarieva K.N. K voprosu poristosti alyuminievykh otlivok, poluchennykh lit'em pod davleniem [On the question of porosity of aluminum castings obtained by injection molding]. *Tsvetnye Metally*, 2021, no. 8, pp. 76–82. DOI: 10.17580/tsm.2021.08.12. (In Russian).
15. Akkaya E., Kayır Y. The effect of aluminium injection parameters on the mechanical properties of the material produced by high pressure die-casting. *Gazi University Journal of Science, Part C: Design and Technology*, 2023, vol. 11 (2), pp. 421–430. DOI: 10.29109/gujsc.1211920.
16. Yalçın B., Koru M., Ipek O., Özgür A.M. Effect of injection parameters and vacuum on the strength and porosity amount of die-casted A380 alloy. *International Journal of Metalcasting*, 2017, vol. 11 (2), pp. 195–206. DOI: 10.1007/s40962-016-0046-2.
17. Concer D., Marcondes P.V.P. Experimental and numerical simulation study of porosity on high-pressure aluminum die casting process. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2017, vol. 39, pp. 3079–3088. DOI: 10.1007/s40430-016-0672-x.
18. Nourian-Avval A., Fatemi A. Characterization and analysis of porosities in high-pressure die cast aluminum by using metallography, X-ray radiography, and micro-computed tomography. *Materials*, 2020, vol. 14, p. 3068. DOI: 10.3390/ma13143068.
19. Cao H., Zhang Q., Zhu W., Cui S., Yang Q., Wang Z., Jiang B. Study on the influence of injection velocity on the evolution of hole defects in die-cast aluminum alloy. *Materials*, 2024, vol. 17 (20), p. 4990. DOI: 10.3390/ma17204990.
20. Vereshchaka A.S. *Rabotosposobnost' rezhushchego instrumenta s iznosostoikimi pokrytiyami* [Performance of cutting tools with wear-resistant coatings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993. 336 p.
21. Yusubov N., Abbasova H. Full-factor matrix model of accuracy of dimensions performed on multi-purpose CNC machines. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23 (4), pp. 6–20. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-6-20.
22. Yusubov N.D., Abbasova H.M. Models of cutting forces in the matrix theory of multitool machining accuracy. *Key Engineering Materials*, 2024, vol. 979, pp. 27–38. DOI: 10.4028/p-bW48Sb.
23. Yusubov N., Abbasova H., Khankishiyev I. Development of a planning theory for multi-tool machining with the possibilities of modern CNC machine tools. *Forschung im Ingenieurwesen*, 2021, vol. 85 (2), pp. 661–678. DOI: 10.1007/s10010-021-00478-7.

24. Gavariev R.V., Savin I.A., Gavarieva K.N. Determination of properties of wear-resistant coatings of metal forms. *Solid State Phenomena*, 2021, vol. 316, p. 732–737. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.316.732.
25. Paiva J.M., Fox-Rabinovich G., Locks Junior E., Stolf P., Ahmed Y.S., Martins M.M., Bork C., Veldhuis S. Tribological and wear performance of nanocomposite PVD hard coatings deposited on aluminum die casting tool. *Materials*, 2018, vol. 11 (3), p. 358. DOI: 10.3390/ma11030358.
26. Gopal S., Lakare A., Shivpuri R. Evaluation of thin film coatings for erosive–corrosive wear prevention in die casting dies. *Surface Engineering*, 1999, vol. 15 (4), pp. 297–300. DOI: 10.1179/026708499101516632.
27. Lopez-Ortega A., Areitioaurtena O., Fuentes E., Igartua A., Merchán L., Pardo E., Montero J., Granado R., Martinez de la Pera I., Mendizabal J., Zabala B. Experimental evaluation of ceramic coatings for die protection in low-pressure die-casting process. *Coatings*, 2023, vol. 14 (5), p. 643. DOI: 10.3390/coatings14050643.
28. Gautier G., Faga M., Tebaldo V., Martra G., Cartasegna F. Study of wear phenomena of coatings for die-casting. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 302, pp. 520–524. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.302.520.
29. Rosso M., Ugues D., Torres E., Perucca M., Kapranos P. Performance enhancements of die casting tools through PVD nanocoatings. *International Journal of Material Forming*, 2008, vol. 1 (suppl. 1), pp. 1259–1262. DOI: 10.1007/s12289-008-0131-z.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2026 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).