



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-79-87>
УДК 621.79

Поступила 03.10.2022
Received 03.10.2022

ЛИТЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПОЛУЧЕНИЯ

В. А. КАЛИНИЧЕНКО, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65

А. А. АНДРУШЕВИЧ, Белорусский государственный аграрно-технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 99/2. E-mail: andru49@mail.ru

Рассматриваются теория и практика получения литых композиционных материалов, их классификация и особенности формирования структуры при их синтезе. Приведены результаты получения деталей ответственного назначения из литых композиционных материалов. Показано, что формирование переходной зоны происходит в процессе инфильтрации матричного расплава с последующим ее ростом в процессе выдержки при температуре синтеза.

Ключевые слова. Литые композиционные материалы, композиты, литые детали, синтез литейных композиционных материалов.

Для цитирования. Калиниченко, В. А. Литые композиционные материалы: состояние и перспективы получения / В. А. Калиниченко, А. А. Андрушевич // *Литье и металлургия*. 2022. №4. С. 79–87. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-79-87>.

CAST COMPOSITE MATERIALS: THE STATE AND PROSPECTS OF OBTAINING

U. A. KALINICHENKO, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.
A. A. ANDRUSHEVICH, Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus, 99/2, Nezavisimosti ave. E-mail: andru49@mail.ru

The paper considers the theory and practice of obtaining cast composite materials, their classification and features of the formation of the structure during their synthesis. The results of obtaining parts of responsible purpose from cast composite materials are presented. It is shown that the formation of the transition zone occurs during the infiltration of the matrix melt, followed by its growth during exposure at the synthesis temperature.

Keywords. Cast composite materials, composites, cast parts, synthesis of cast composite materials.

For citation. Kalinichenko U. A., Andrushevich A. A. Cast composite materials: the state and prospects of obtaining. *Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 4, pp. 79–87. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-79-87>.

Современное развитие науки и техники требует постоянного создания и применения новых материалов на основе инновационных решений с уникальными свойствами, которые отсутствуют у традиционных металлов и сплавов, для получения деталей, механизмов и машин с повышенными эксплуатационными характеристиками. В технике и быту используются естественные (природные) и искусственные (синтезированные) композиционные материалы (КМ) – композиты.

Под композитами, как правило, понимают искусственно созданные материалы, состоящие из двух или более различных по составу и структуре компонентов, разделенных границей. Такое сочетание компонентов способствует получению новых свойств материала. Композиционные материалы характеризуются наличием нескольких фаз в микромасштабе, но являются однородными на макроуровне. Причем состав композиции и форма структурных составляющих, а также распределение компонентов задаются заранее. Это охватывает широкий круг материалов, включая специальные стали, сплавы и чугуны, но исключает из рассмотрения композиты, обладающие макронеоднородностью, а также природные композиты [1].

Композиты – перспективные материалы, поскольку из них можно получать изделия с прогнозируемыми, регулируемые в зависимости от условий эксплуатации свойствами. Они эффективно заменяют

остродефицитные металлы и сплавы, производство из них деталей вполне технологично и практически безотходно, обеспечивается обширной сырьевой базой. Диапазон их применения очень широк: от деталей бытовой техники до конструкций аэрокосмических объектов. Обладая высокими удельными механическими характеристиками (прочностью, вязкостью, модулем упругости и др.), композиционные материалы находят все большее применение. Однако использование композитов в Беларуси и странах СНГ все еще ограничено. Для преодоления этого отставания необходимы дальнейшая разработка новых композитов с повышенными эксплуатационными свойствами и технологий производства из них качественных деталей. Армирующие элементы и матричные сплавы должны быть доступны, а технологические процессы изготовления изделий легко реализуемыми. К таким следует отнести литые композиционные материалы (ЛКМ), получаемые различными способами литья.

ЛКМ получают различными способами жидкофазного совмещения, когда отдельные армирующие элементы композита соединяют с матрицей, с использованием расплавленного жидкого металла, которые после затвердевания образуют единое целое. Следует отметить эффективность и доступность литейных технологий, которые позволяют наиболее простым путем получать изделия сложной конфигурации практически неограниченных размеров с минимальными припусками на последующую обработку (либо вообще без нее). В данной работе рассмотрены классификация, современное состояние и перспективы получения ЛКМ.

Классификация композиционных материалов имеет важное методологическое значение для технологов и специалистов, является основой для выбора оптимального вида материала, обеспечивающего соответствие требованиям служебным свойствам готовых изделий и технологию их получения.

Наиболее важным признаком классификации КМ является материал матрицы. Для ряда композиционных материалов понятия матрица и армирующий элемент теряют смысл, так как невозможно выделить один сплошной структурный элемент. В результате возможны разные примеры классификации и первым из них можно отметить *материаловедческий* признак. В соответствии с этим к ним относят материалы с измененным поверхностным слоем, например, сплавы с диффузионно измененным поверхностным слоем, обладающие повышенной твердостью и прочностью по сравнению с объемом самой детали, а в сочетании с более вязкой сердцевиной образуют новый слоистый материал. Далее следуют агломерационные материалы, соединенные из разнородных частиц в единое целое. К ним могут быть отнесены некоторые матричные композиты, псевдосплавы, порошковые материалы, а также бетоны, керамики и т.д. Туда же относят матричные композиты, содержащие отдельные частицы, волокна, нити, проволоку, пруты, пластины. Обязательным условием армирования является превышение модулей упругости арматуры над модулями упругости матрицы [2].

На примере армированных композитов становится понятным неприемлемость ограничения неоднородности композиционных материалов микроуровнем. Для многих литых армированных композитов диаметры линейной арматуры достигают 12 мм и более, а армирующих гранул – 6 мм [3].

По структуре КМ делятся на группы с матричной, слоистой, каркасной и комбинированной структурой [4]. Матричную структуру имеют высокие дисперсно-упрочненные и армированные композиты. К материалам со слоистой структурой относятся композиции, полученные из набора чередующихся слоев фольги или листов материалов различной природы и состава. К композиционным материалам с каркасной структурой относятся жидкофазные материалы, полученные методом пропитки. Комбинированную структуру имеют материалы, содержащие комбинации первых трех групп.

По геометрическим признакам структурных элементов КМ делят на нульмерные элементы структуры [5] (в состав которых входят частицы, имеющие длину, ширину и высоту одного порядка), одномерные элементы структуры (входят элементы, один из линейных размеров которых значительно превышает два других), двумерные элементы структуры (у которых два линейных размера превышают третий). Также известны классификации композиционных материалов по взаиморасположению структурных материалов и изменению свойств, связанных с расположением; с применением однонаправленных армирующих элементов для создания структуры по пространственному расположению.

В основу классификации по методам получения положены технологические процессы, обеспечивающие окончательное формирование КМ. Композиты подразделяются на материалы, полученные жидко- и твердофазными методами, комбинированными методами, состоящие в последовательном или параллельном применении нескольких методов.

К жидкофазным методам относятся различные виды литья и пропитки, а также направленная кристаллизация сплавов. Для достижения этих целей в мировой практике широко используют литье в

твердожидком (ТЖ) состоянии. На сегодняшний день наибольшее развитие получили два базовых технологических подхода к ТЖ литью: реолитье (rheocasting) и тиксолитье (thixocasting) [3].

В реолитье исходным материалом служит расплав, который подвергается частичной кристаллизации в условиях интенсивного перемешивания. При этом за счет сдвиговых сил происходит измельчение дендритов. В результате материал переводится в ТЖ состояние, в котором он представляет собой суспензию, состоящую из расплава и равномерно распределенных в его объеме мелких глобулярных кристаллических частиц. Полученная ТЖ смесь (суспензия) инжектируется под давлением в литейную форму, где происходит ее полная кристаллизация до формирования отливки с однородной мелкозернистой глобулярной структурой [3].

Жидкофазные методы обладают рядом существенных преимуществ:

- 1) получение изделий сложной конфигурации с минимальными припусками;
- 2) ограниченное силовое воздействие на хрупкие армирующие элементы;
- 3) широкая номенклатура используемых компонентов;
- 4) упрощенное аппаратное обеспечение;
- 5) возможность механизации и автоматизации техпроцессов;
- 6) высокая производительность.

В настоящее время использование литых композиционных материалов достаточно ограничено в основном изготовлением литых заготовок деталей аэрокосмической и военной техники, спортивных автомобилей. Отливки получают литьем в кокиль, под давлением, в песчаные формы, по выплавляемым моделям, направленной кристаллизацией и др. В то же время применение ЛКМ позволяет значительно улучшить эксплуатационные свойства, уменьшить массу деталей, повысить триботехнические и другие характеристики, в том числе автотракторной и сельскохозяйственной техники.

К твердофазным методам получения КМ относятся волочение, прокатка, экструзия, ковка, штамповка, диффузионная сварка, сварка взрывом и др. [4]. При получении КМ методами осаждения-напыления матрица наносится на волокна из растворов солей или других соединений, из парогазовой фазы, плазмы и т. п. Комбинированные методы заключаются в последовательном или параллельном применении нескольких методов.

ЛКМ формируются в результате многостадийных процессов, к которым относятся окисление и испарение армирующих элементов и расплава матрицы, физико-химическое взаимодействие при контакте жидкой и твердой фаз, диффузионные процессы, затвердевание и кристаллизация матрицы и др. Для получения литых композиционных материалов высокого качества необходимы интенсификация одних и замедление других процессов.

В качестве нерасплавляемых элементов структуры ЛКМ используются тугоплавкие металлы и неметаллические соединения расплаваемых матриц – металлы с более низкими температурами плавления. Компоненты КМ, получаемых жидкофазным совмещением, должны отвечать определенным требованиям: существенное различие температур плавления компонентов; минимальная взаимная растворимость компонентов; смачивание тугоплавких составляющих легкоплавкими; равновесный химический состав расплава по отношению к элементам твердой фазы при температуре взаимодействия. В реальных условиях требуемый эффект совместимости компонентов может быть достигнут управлением процессом формирования ЛКМ. Различия в исходных материалах, структуре и свойствах, многообразие типов соединений с металлическими матрицами обеспечивают широкие возможности создания ЛКМ с заранее заданными характеристиками.

В качестве армирующих элементов в макрогетерогенных литых композиционных материалах часто используются литая стальная или чугунная дробь, гранулы или частицы твердых сплавов, керамики, спеченных порошков, в некоторых случаях для формирования пластичной связи матрицы гранулы цветных металлов на основе алюминия и меди. Литая стальная или чугунная дробь является одним из наиболее доступных элементов для получения износостойких литых композиционных материалов.

Основная масса применяемых КМ армирована волокнами. Только в последнее время стали использовать нульмерные элементы и псевдосплавы. Металлические проволоки, получаемые волочением, также являются распространенными армирующими элементами литых композитов. Хорошим сочетанием прочности, тепло- и жаростойкости обладают молибденовые, титановые, бериллиевые проволоки. Кроме того, они могут применяться в виде сеток различной формы плетения. Для армирования матриц с температурами плавления выше 500 °С используют керамические и стеклянные волокна.

При выборе сплава для матрицы ЛКМ необходимо руководствоваться требованиями, предъявляемыми к окончательному изделию. Одним из основных критериев выбора материалов для получения

отливок различной конфигурации являются их литейные свойства. Они должны хорошо заполнять полость литейной формы и обеспечивать комплекс эксплуатационных свойств, плотность, точные размеры. В качестве матриц для ЛКМ используют сплавы на основе алюминия, меди, цинка, олова, железа и тугоплавких металлов. При этом важно оценить их удельную прочность, коррозионную стойкость, способность обработки резанием, стоимость и т.д. Например, удельная прочность некоторых материалов располагается в следующей последовательности: магниевые сплавы – 50–80 МПа; алюминиевые – до 130; латуни и бронзы – до 50; стали – 30–50; чугуны – 10–30 МПа.

КМ с использованием литейных технологий получают в основном двумя способами: соединением твердой и жидкой фаз, совмещением различных компонентов, находящихся в жидком состоянии.

Процесс соединения твердой и жидкой фаз осуществляется по схемам (рис. 1): размещение армирующих элементов в полости литейной формы с последующей заливкой матричного расплава (*I– III*); заливка в литейную форму гетерогенного матричного расплава, содержащего армирующие элементы (*IV*); введение армирующих элементов в матричный расплав в процессе заливки (*V, X*); сборка армирующих элементов в присутствии жидкого матричного расплава (*IX*) [5].

Технологический процесс получения изделий жидкофазным совмещением различных компонентов состоит из этапов: подготовки компонентов; сборки и размещения в полости формы армирующих элементов; заливки матричным расплавом, пропитки; затвердевания жидкой фазы с наложением внешних воздействий или без них; извлечения из формы; термической и механической обработки композиционных изделий.

В процессе кристаллизации для повышения качества, устранения несовершенств литой структуры применяется наложение различных видов воздействий (рис. 1, *VI – VIII*): вакуумирование, давление, вибрация, ультразвуковые колебания и др.

Технологическая схема получения композиционных материалов различными методами литья включает следующие операции: 1) подготовка компонентов (калибровка, подготовка поверхности армирующих элементов); 2) подготовка матричного сплава; 3) размещение армирующих элементов в форме; 4) нагрев формы; 5) заливка металлическим сплавом, пропитка; 6) выдержка в форме, охлаждение и выемка из формы; 7) механическая и термическая обработка композиционных изделий.

Структура ЛКМ формируется под комплексным влиянием трех групп факторов: физико-химических (свойства армирующих элементов и матрицы, характер их взаимодействия, условия кристаллизации и затвердевания), конструктивных (параметры армирования, геометрические размеры литых заготовок), технологических (подготовка компонентов, способ литья, метод приготовления расплава, последующая обработка заготовки).

При заливке матрицы, которая в исходном состоянии имела равновесную структуру отожженного металла, формируется структура со слабо развитыми дендритами, имеющими более высокую микротвердость в сравнении с микротвердостью литой матрицы. Металлографический анализ показывает прямую связь исходного состояния шихты со структурой матрицы ЛКМ, приводящую к изменению механических свойств. Способ управления структурой и свойствами матрицы за счет эффекта наследственности предварительно обработанной шихты может быть значительным.

Требования к армирующим элементам и матрицам ЛКМ с повышенными триботехническими характеристиками можно изложить в самом общем виде и конкретизировать их в каждом случае. Возможность изменять в широком диапазоне свойства армирующих элементов и матриц при периодическом повторении армирующих гранул, связанных с матрицей, позволяет создавать композиционный материал с заданным комплексом свойств – повышенными триботехническими характеристиками, в котором полностью реализуется принцип Шарпи [6].

Получение ЛКМ высокого качества, надежная взаимосвязь структурных элементов, повышенные эксплуатационные свойства требуют установления общей закономерности формирования структуры. Для макрогетерогенных композитов необходимо, чтобы структура состояла из участков армирующих элементов повышенной твердости и матричных участков с высокой вязкостью материала. Армирующие элементы должны быть высокопрочными, износостойкими, не претерпевать химических превращений, иметь стабильную структуру, малоизменяющуюся при нагреве в процессе трения. Матрицы таких ЛКМ должны хорошо противостоять циклическим нагрузкам, быть пластичными и вязкими, иметь равномерное распределение фазовых составляющих. По возможности все компоненты должны быть недефицитными и технологичными.

Применение литейной технологии для синтеза композиционных материалов с макрогетерогенной структурой (КММС) позволяет снизить стоимость продукции и получать детали различной

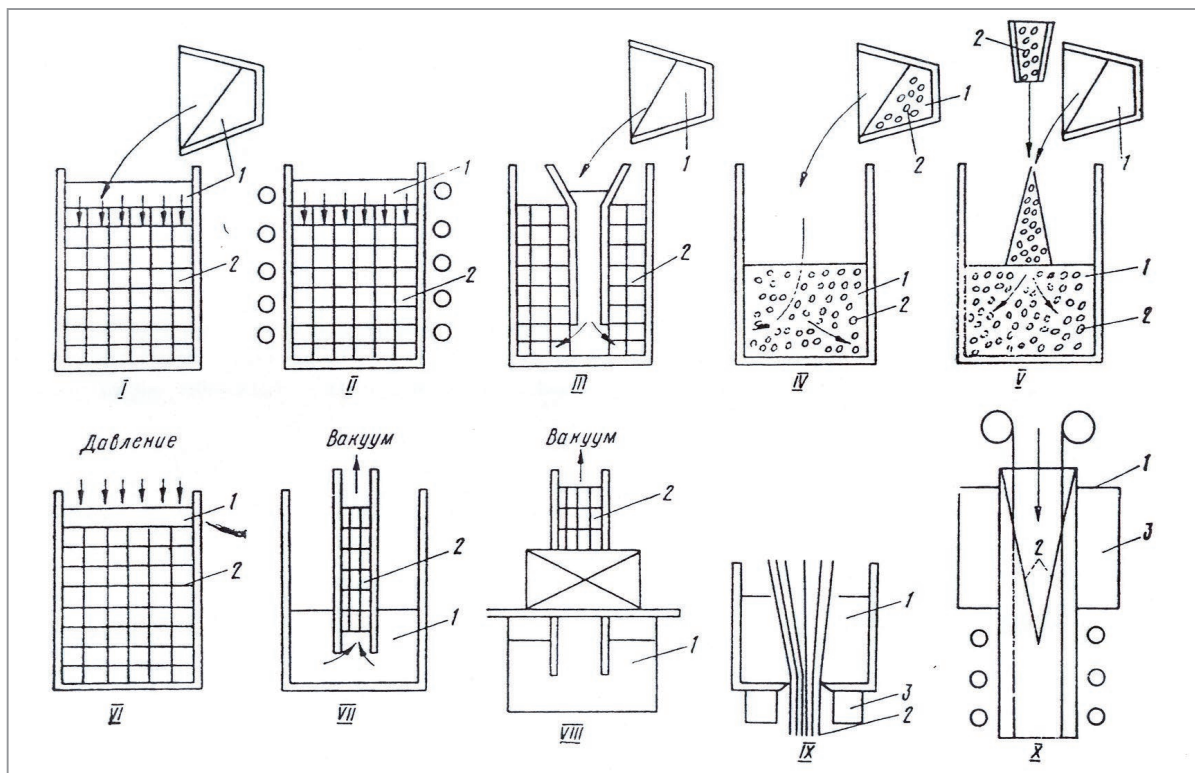


Рис. 1. Схемы получения изделий из КМ методами литья:

I – заливка матричным расплавом с предварительно установленной арматурой; *II* – изотермическая пропитка; *III* – сифонная заливка арматуры матричным расплавом; *IV* – литье гетерогенного расплава; *V* – суспензионная заливка; *VI* – литье под давлением; *VII* – литье вакуумным всасыванием; *VIII* – литье с комплексным и вакуумным воздействием; *IX* – пропитка способом непрерывного литья; *X* – непрерывное литье с вводом арматуры (*1* – расплав; *2* – армирующие элементы; *3* – кристаллизатор)

конфигурации. Наиболее часто КММС получают путем пропитки металлическим сплавом армирующего каркаса. Реже применяется замешивание армирующих элементов в матричный расплав. Процесс пропитки можно реализовать одним из следующих способов: пропитка с кристаллизацией под давлением, литье под давлением, литье в кокиль. Литье в кокиль относится к жидкофазному методу совмещения и при организации масштабного производства обладает определенными преимуществами, так как не требует сложного оборудования и позволяет получать отливки значительной массы и различной геометрии.

Структура КМ с макrohетерогенной структурой представляет собой упрочняющие элементы, равномерно распределенные в матрице. Среди факторов, влияющих на их эксплуатационные свойства, существенное значение имеют степень армирования композитов и линейные размеры армирующих элементов. К армирующим элементам предъявляется ряд требований, среди которых одним из важнейших является фактор формы, равный или больший 0,9. Это обеспечивает ряд преимуществ, в частности, высокую текучесть матричного расплава при заполнении литейной формы [2].

В системе «металл–армирующая фаза–форма» протекают гетерофазные процессы, движущей силой которых является наличие градиентов химических потенциалов в различных фазах. Взаимодействие между компонентами может осуществляться на стадии формирования, когда матрица находится в расплавленном состоянии, на стадии затвердевания и охлаждения, при последующих нагревах и деформации в процессе обработки или эксплуатации.

Одно из основных условий формирования КММС – смачивание армирующих элементов расплавом матрицы и заполнение им пор, капилляров и других пустот. Смачивание расплавом приводит к тесному контакту – необходимому условию для развития процессов химического взаимодействия на границе раздела. При смачивании уменьшается межфазное поверхностное натяжение на границе раздела фаз. Необходимо отметить, что процессы, происходящие на границе раздела фаз «армирующие элементы – матрица», являются наиболее важными с точки зрения формирования композитной системы, поскольку они определяют большинство механических свойств. Экспериментальное установление формирования структуры поверхности раздела фаз, зависимость ее от процессов взаимодействия фаз и затвердевания – важная задача управления процессом получения КММС с заданными свойствами.

Несомненный практический интерес представляет получение ЛКМ на основе бронзы с применением в качестве армирующей фазы быстрозакаленных чугунных гранул (рис. 2). Процесс получения литых композиционных материалов – одна из промежуточных стадий рассмотренных процессов, так как в их составе могут находиться, например, чугунная армирующая составляющая и бронзовая матричная основа. При этом в процессе их заливки составляющая из чугуна остается в твердом состоянии и заполняется расплавленной матрицей из бронзы. Благодаря чувствительности чугуна к режиму термообработки, возможно, получить композиты с широким диапазоном свойств. Химический состав и температурно-временной режим термической обработки литой дроби служат определяющими в формировании эксплуатационных свойств.

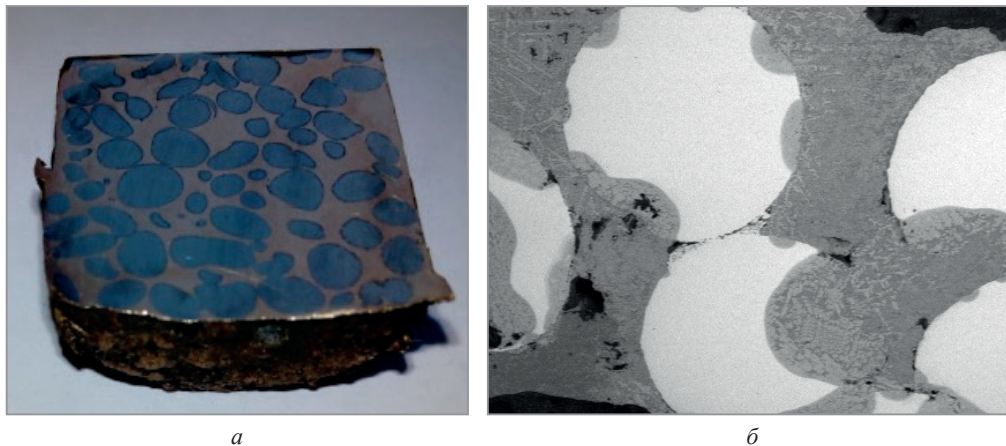


Рис. 2. Макро- (а) и микроструктура (б) литого композиционного материала – матрица БрКЗМц1 (Cu – 3% Si – 1% Mn) и чугунные гранулы

Образцы композиционных материалов отливали в цилиндрических графитовых формах. Температура заливки – 1100 °С, температура предварительного нагрева гранул – не ниже $0,8 T_{пл}$. Скорость заполнения формы – 5 – 8 мм/с. Скорость свободного охлаждения отливки от температуры литья до 800–850 °С была 0,15 – 1,2 К/с. Ускоренное охлаждение отливки особенно от температуры заливки до 830–860 °С приводит к формированию структуры матрицы с зернами разной травимости, опирающимися на чугунные гранулы, в которых наблюдается структура, подобная обезуглероженному слою. С увеличением времени выдержки при высоких температурах поверхностный слой гранулы претерпевает изменение, которое тем больше, чем больше время выдержки. Кроме того, на эффективность жидкофазного соединения влияют тепловые параметры процесса (температуры расплава и литейной формы).

На характер образования прослойки на границе чугунных гранул и матрицы оказывают влияние и состав матричного сплава. Выявлен характер взаимодействия чугунных гранул с матрицами Cu – 3% Si – 1% Mn (БрКЗМц1) и Cu – 5,5% Si (БрК5,5). Сравнение показывает, что при использовании матрицы из бронзы БрКЗМц1 толщина зоны взаимодействия в несколько раз меньше по сравнению с матрицей из бронзы БрК5,5.

Оценка свойств ЛКМ может быть получена на основе анализа свойств его компонентов. Однако существующие теоретические модели описания состояния композитов сложны и часто не удовлетворяют требованиям инженерных расчетов, в частности на основе правила смесей. Поэтому основным в определении свойств ЛКМ является метод прямого эксперимента.

Перспективность использования КМ в различных отраслях техники определяется широким спектром самых различных свойств. Высокая прочность и удельная жесткость, малая чувствительность к концентраторам напряжений и повышенное сопротивление усталостному разрушению, износостойкость и жаропрочность, а также антифрикционные, теплозащитные, эрозионностойкие и другие свойства далеко не полный перечень их важнейших характеристик. Заданный уровень комплекса механических, физических и других свойств формируется в процессе получения – конструирования материала непосредственно из компонентов.

Предварительные расчетные оценки эффективности применения КМ на основании свойств компонентов по правилу аддитивности показывают возможности повышения прочности в 1,5–2,0 раза, жесткости и сопротивления усталости – в 2,5–3,0 раза и т.д. Перспективным является применение металлических композиционных материалов в ракетно- и авиастроении, в частности при создании тяжелых

транспортных и сверхзвуковых пассажирских самолетов [7]. Использование таких материалов в количестве до 30% позволяет снизить массу самолета на 15 - 20%. Наиболее рационально в этом случае применение титановых и алюминиевых сплавов, армированных волокнами бора или титановых сплавов, армированных волокнами из боралюминия, соединяемых пайкой. Боралюминиевые композиционные материалы могут использоваться на космических летательных аппаратах, в узлах конструкций, подвергающихся нагреву от реактивной струи двигателя, в герметических кабинах экипажа.

Композиционные материалы на основе алюминия и титана, армированные бериллиевой проволокой применяются при создании газотурбинных двигателей для изготовления литых лопаток вентилятора и компрессора [8].

Литые композиционные материалы также используют в машиностроении, судостроении, автомобилестроении. Целесообразность их применения связана со значительным уменьшением массы конструкций при сохранении или даже повышении прочностных характеристик (например, для облегчения кузовов, коробок передач, поршней цилиндров, передаточных механизмов, рессор и т.д.) [9].

ЛКМ со свинцовой матрицей, армированные углеродными волокнами, применяют в химической промышленности при производстве батарей и аккумуляторов, в строительстве, в изделиях, работающих на трение, и др. [3].

Для изготовления подшипников, работающих без смазки, успешно опробовали антифрикционный композиционный материал на основе свинца, армированный 20% проволоки из нержавеющей стали или оловянистой бронзы. В космических условиях, где применение обычной смазки в узлах трения невозможно, можно также применять ЛКМ с нитевидными кристаллами Al_2O_3 [8].

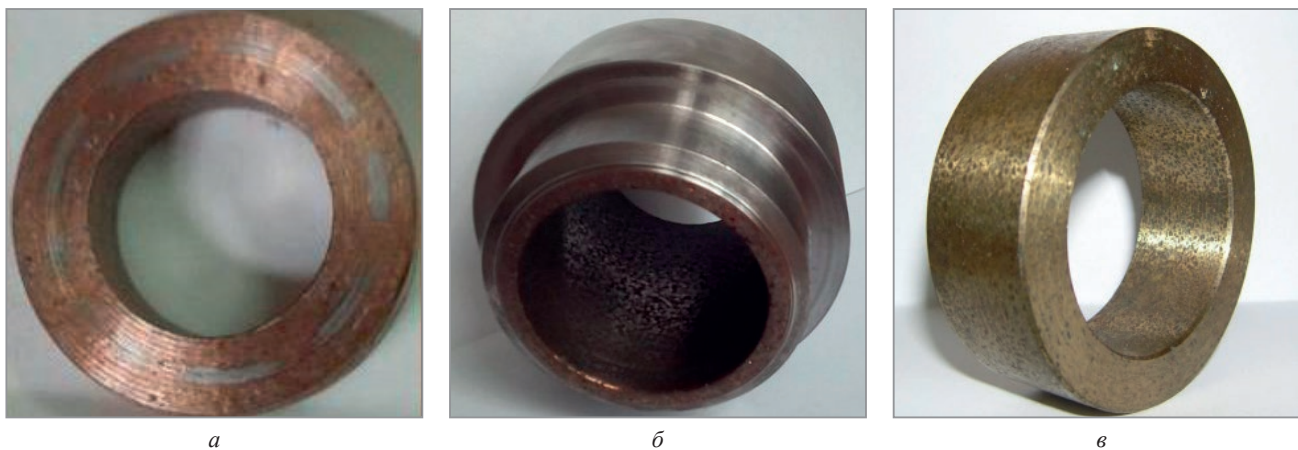
При эксплуатации машин и оборудования, в частности сельскохозяйственной техники, важную роль играют снижение расходов на техническое обслуживание, плановые и текущие ремонты. В узлах трения данный аспект может быть решен с помощью выхода эксплуатационных свойств используемых материалов в режим «безыносного трения», реализация которого наиболее предпочтительна при идеальном выполнении принципа Шарпи. Для повышения надежности, в том числе износостойкости, целесообразно использование новых перспективных материалов, включая композиционные. Литые композиционные материалы на основе медных сплавов и чугуновых гранул или алюминий-медные композиции максимально приближены к указанному принципу. За счет введения в металлическую матрицу высокопрочных и высокомодульных гранул удается резко повысить прочность, вязкость, жесткость материалов. Сочетание матрицы и гранул, обладающих специальными физическими свойствами, открывает широкие возможности для создания новых композиционных материалов и позволяет эксплуатировать сельскохозяйственные машины в тяжелых условиях, включая режимы сухого трения. При изготовлении деталей узлов трения из литых КМ на основе гранул чугунов марки ДЛЧ с матрицей из бронзы БрКЗМц1 установлено образование массивной прослойки интерметаллида (200–500 мкм). При таких толщинах интерметаллид должен разрушаться при минимальных динамических нагрузках, в действительности этого не происходит. С его появлением можно связать высокую износостойкость этих КМ по сравнению с другими материалами подобного типа. Они уже применяются для тяжелонагруженных пар трения, в различных областях промышленности.

Из разработанных материалов могут изготавливаться детали практически любой геометрической формы и размеров, включая биметаллические заготовки, например, направляющие различного назначения, шестерни, подшипники скольжения, втулки и т.п., предназначенные для использования в узлах трения сельскохозяйственных машин.

На рис. 3 представлены полученные изделия из литых композиционных материалов на основе бронз. Благодаря особенностям и высоким механическим свойствам (общий износ пары трения – не более 0,1 мм/км пути; коэффициент трения со смазкой – 0,04–0,06; удельное давление – до 10 МПа; электрохимическая стойкость при работе с ответной парой трения) данный тип материалов может эксплуатироваться в ряде агрессивных сред с высокой запыленностью, повышенной температурой или влажностью и др., где использование аналогичных материалов невозможно. Температура эксплуатации деталей – до 500 °С.

Разработанные композиционные материалы использованы для изготовления подшипников скольжения, используемых в элементах подвески тракторных прицепов. Шестерни из композиционного материала применены в качестве червячных пар на Борисовском заводе «Автогидроусилитель» и других предприятиях Республики Беларусь.

Разнообразие армирующих элементов и матриц, способов синтеза ЛКМ обеспечивают получение изделий с различными и высокими эксплуатационными свойствами, например, конструкционных,



а

б

в

Рис. 3. Образцы изделий из литых композиционных материалов:

а – втулка с волокнисто-гранульным армированием; б – биметаллическая втулка элемента подвески прицепа;
в – композиционная втулка механизма дверей

износостойких, жаропрочных материалов. В сельхозмашиностроении из КМ изготавливают детали тракторов, режущие части плугов, дисковых косилок и т.д., что позволяет увеличить срок службы сельскохозяйственной техники. Целесообразность их применения заключается в снижении массы, повышении прочности деталей, увеличении проходимости и грузоподъемности машин, уменьшении расхода горючего и расхода резины, тем самым, увеличения срока эксплуатации

Отдельное место занимают композиционные материалы на основе алюминия, применяемые не только в узлах трения, но и в качестве конструктивных деталей. Повышение износостойкости и других эксплуатационных характеристик деталей цилиндропоршневой группы двигателей внутреннего сгорания достигается армированием алюминиевых сплавов дискретными волокнами и нульмерными частицами, а также использованием пористых каркасов из оксидной керамики. Для их получения наиболее эффективны методы литья с импеллером, под давлением, вакуумная пропитка, которые обеспечивают введение заданного количества армирующей фазы до 25% (TiC, WB, ZO_2 , SiC, Al_2O_3 , SiO_2). При этом повышаются механические свойства алюминиевых сплавов, износостойкость, качество литой поверхности. Все более широкое применение для увеличения рабочих температур двигателей находят также армированные ЛКМ с использованием жаростойких материалов.

Литые алюминий-медные композиционные материалы с повышенными механическими и эксплуатационными свойствами целесообразно использовать для производства высокоэффективных конструктивных узлов сельскохозяйственной техники из-за более низкой стоимости (25–40%) по сравнению с аналогами, получаемыми методами порошковой металлургии.

Необходимо иметь в виду, что ЛКМ, так же как и традиционные сплавы, не являются универсальными. Использование их по назначению в той или иной конструкции рационально только в том случае, когда это технически обосновано и экономически целесообразно [10].

Выводы

Качество получаемых ЛКМ определяется правильным выбором состава матрицы и упрочняющей (армирующей) фазы применительно к условиям работы деталей, тщательной подготовкой используемых материалов. На эффективность технологического процесса получения литых деталей существенное влияние оказывают тепловые параметры (температуры расплава и литейной формы).

Литые композиционные материалы достаточно широко используются в различных областях техники и народного хозяйства. Однако эффективным их применение оказывается только при выполнении следующих условий:

- 1) специальное конструирование деталей и узлов конструкций с учетом особенностей свойств этих материалов;
- 2) создание специальной технологии изготовления деталей, поскольку способы изготовления деталей из традиционных сплавов неприемлемы для композиционных материалов;
- 3) осуществление контроля технологического процесса и качества исходных материалов и изделий на основных этапах их изготовления для обеспечения надежности материалов при длительной эксплуатации.

Предложенные технологии изготовления деталей различной техники из литых композиционных материалов могут быть реализованы с минимальными затратами как в единичном, так и серийном производстве при изготовлении и ремонте машин практически на любых видах предприятий, имеющих стандартное литейное оборудование и оснастку (плавильные печи, бегуны, литейные формы, кокиля и т.п.).

Приведенные примеры не исчерпывают всевозможные области эффективного применения литых композиционных материалов, однако свидетельствуют о больших перспективах их использования при изготовлении различных деталей современной техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Калиниченко, В. А.** Композиционные материалы на основе алюминия / В. А. Калиниченко // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 12-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2014. Т. 1. С. 308 – 309.
2. **Кезик, В. Я.** Формирование структуры поверхности объема литых макрогетерогенных композиционных материалов в условиях низкоскоростного трения без смазки / В.Я. Кезик, А.С. Калиниченко, Р.К. Иванова // Литье и металлургия. 2003. № 2. С. 118–123.
3. **Толочко, Н. К.** Современные литейные технологии / Н.К. Толочко и др. Минск: БГАТУ, 2009. 358 с.
4. Новые композиционные материалы / Д. М. Карпинос, Л. И. Тучинский, Л. Р. Вишняков. Минск: БНТУ, 1977. 312 с.
5. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://studfile.net/preview/4215632/page:5/> – дата доступа: 30.05.2022.
6. **Арзамасов, Б. Н.** Материаловедение / Б.Н. Арзамасов и др. М.: Изд-во МГТУ, изд. 8-е, 2008. 648 с.
7. **Бондалетова, Л. И.** Полимерные композиционные материалы / Л. И. Бондалетова, В. Г. Бондалетов. Томск: Изд-во ТПУ, 2013. 118 с.
8. Композиционные материалы в машиностроении / Ю.Л. Пилиновский, Т.В.Грузина, А.Б.Сапожников и др. Киев: Техника, 1990. 141 с.
9. **Песковский С.М., Кезик В.Я., Затоловский С.С. и др.** Восстановление деталей нефтяных насосов с применением литых композиционных материалов // Защита от коррозии и охрана окружающей среды. 1990. № 8. С. 15–19.
10. **Калиниченко В.А., Андрушевич А.А., Парфенов А.И.** Прикладные исследования: литые композиционные материалы для техники агропромышленного комплекса // Тр. VII Междунар. науч.-практ. конф. «Модернизация аграрного образования». 14 декабря 2021 г. г.Томск. С. 846 – 849.

REFERENCES

1. **Kalinichenko V.A.** Kompozicionnye materialy na osnove aljuminija [Composite materials based on aluminum]. *Nauka-obrazovaniju, proizvodstvu, jekonomike = Science-education, production, economics. Material 12-j Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii* [Material of the 12th International Scientific and Technical Conference]. Minsk, BNTU Publ., 2014, vol. 1, pp. 308 – 309.
2. **Kezik V.Ja., Kalinichenko A.S., Ivanova R.K.** Formirovanie struktury poverhnostnogo ob'ema lityh makrogeterogennyh kompozicionnyh materialov v uslovijah nizkoskorostnogo trenija bez smazki [Formation of the structure of the surface volume of cast macroheterogeneous composite materials under conditions of low-speed friction without lubrication]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*. 2003, no. 2, pp. 118–123.
3. **Tolochko N.K.** *Sovremennye litejnye tehnologii* [Modern foundry technologies]. Minsk, BGATU Publ., 2009, 358 p.
4. **Karpinos D.M., Tuchinskij L.I., Vishnjakov L.R.** *Novye kompozicionnye materialy* [New composite materials]. Minsk, BNTU Publ., 1977, 312 p.
5. <https://studfile.net/preview/4215632/page:5/>
6. **Arzamasov B.N.** *Materialovedenie* [Materials Science]. Moscow, MG TU Publ., 2008, 648 p.
7. **Bondaletova L.I., Bondaletov V.G.** *Polimernye kompozicionnye materialy* [Polymer composite materials]. Tomsk, TPU Publ., 2013, 118 p.
8. **Pilinovskij Ju.L., Gruzina T.V., Sapozhnikov A.B.** *Kompozicionnye materialy v mashinostroenii* [Composite materials in mechanical engineering]. Kiev, Tjehnika Publ., 1990, 141 p.
9. **Peskovskij S.M., Kezik V.Ja., Zatulovskij S.S.** Vosstanovlenie detalej nefjtjanyh nasosov s primeneniem lityh kompozicionnyh materialov [Restoration of parts of oil pumps using cast composite materials]. *Zashhita ot korrozii i ohrana okruzhajushhej sredy = Corrosion protection and environmental protection*, 1990, no. 8, pp. 15-19.
10. **Kalinichenko V.A., Andrushevich A.A., Parfenov A.I.** Prikladnye issledovanija: litye kompozicionnye materialy dlja tehniky agropromyshlennogo kompleksa [Applied research: cast composite materials for agricultural machinery]. *Trudy VII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Modernizacija agrarnogo obrazovanija». 14 dekabrja 2021 g., g. Tomsk* [Proceedings of the VII International scientific and practical conference “Modernization of agricultural education” December 14, 2021, Tomsk], pp. 846 – 849.