

В. В. Ясюков, канд. техн. наук, приват-профессор

Т. В. Лысенко, д-р техн. наук, проф.

О. И. Воронова, приват-доцент, e-mail: olgaliptuga@ukr.net

Одесский национальный политехнический университет, Одесса

Композиционное литье – средство повышения эксплуатационной надежности литых деталей

Показано значение применения композиционных отливок для дальнейшего развития литейного производства. Качество композиционного литья в значительной степени зависит от получения однородной и управляемой контактной зоны элементов, где протекают сложные физико-химические процессы при нестационарном тепловом режиме.

Ключевые слова: композиционная отливка; механические, адгезионные, диффузионные связи; эксплуатационная надежность литых деталей.

Актуальность работы. Термин «композиция (лат. compositio) соответствует русскому «сочинение», «составление», «примирение». Он используется в различных областях человеческой деятельности – технике, литературе, искусстве. Сущность его проявляется в том случае, когда композиция состоит из отдельных частей, сохраняющих свою индивидуальность, специфические свойства и органически связанных друг с другом. В результате формируется новое качество, которого лишены отдельные части.

Следует подчеркнуть различие между понятиями «композиционные материалы» (УДК 620.22.4198) и «композиционные отливки» (УДК 621.74.04:621.763). Это различие заключается в том, что композиционное литье преследует конечной целью получение фасонной заготовки, а композиционные материалы позиционируют, как правило, в виде плит, прутков, труб, уголков и др. Аналогичное сравнение может быть проведено для установления различия между производством стального слитка и фасонной стальной отливки.

Опыт изготовления композиционных изделий известен с глубокой древности и использовался для производства украшений, посуды, оружия, сочетая металлы, драгоценные камни и другие элементы. Общеизвестная практика композиционного литья предусматривает наличие различных металлических элементов в твердом состоянии, объединенных в одно целое жидким расплавом. Синонимами к понятию «композиционное литье» являются «биметаллические», «армированные» отливки.

Композиционное литье по своей природе является неоднородной физико-химической системой, состоящей из различных по физическим свойствам или химическому составу частей. Одна часть отливки отделена от смежной с ней части поверхностью раздела (переходной зоной), на которой скачком изменяется одно или несколько свойств.

Литейное производство широко использует композиционное литье, а отдельные части отливки изготавливают из разных материалов и разными технологическими процессами: пластической деформации,

литием из сплавов, обладающих необходимыми свойствами, механической обработкой, твердофазным спеканием [1], плазменным напылением [2], гальванопластикой и другими способами. Все эти методы имеют, главным образом, технологическое значение и применяются там, где традиционными способами литейной технологии изготовить изделие невозможно (тонкие стенки, местное упрочнение, придание рабочей поверхности отливок особых свойств, формирование сложной гравюры на поверхности пресс-форм, повышение эксплуатационной надежности и т. д.).

Одной из разновидностей композиционного литья является суспензионная заливка литейных форм [3, 4]. Этот способ применим в производстве отливок из любых сплавов, при этом реализуются широкие возможности повышения качества отливок.

Постановка задачи. Внедрение композиционных отливок является одним из наиболее прогрессивных направлений развития литейного производства [5]. Такие отливки приобретают совокупность свойств, способных улучшить эксплуатационные характеристики литых деталей при одновременном снижении трудоемкости их изготовления; использование композиционных отливок во многих случаях позволяет экономить цветные и высоколегированные сплавы.

Качество композиционного литья в значительной степени зависит от получения однородной и управляемой по геометрическим параметрам и свойствам контактной зоны двух элементов, где и протекают сложные физико-химические процессы при нестационарном тепловом режиме. Широкое использование композиционного литья затруднено из-за нестабильности процессов взаимодействия отдельных элементов, получаемых разными методами, с жидким металлом отливки, объединяющим элементы в единое целое. Решение этой проблемы возможно только на базе углубленного знания контактных процессов, происходящих при формировании композиционных отливок.

Сущность и методы исследования. Область применения композиционного литья в технике чрезвычайно разнообразна. Примерами могут служить: ар-

мирование отливок из сплавов алюминия вставками из стали или чугуна, предотвращающими износ или смятие; с той же целью в головках поршней двигателей внутреннего сгорания канавки компрессионных колец выполняют из легированной стали или нирезиста; соединение разнородных сплавов достигается за счет прогрева вставки в расплаве алюминия, установки ее в форму и заливки матричным металлом. Аналогичная технология применяется для охлаждаемых воздухом цилиндров двигателей мотоциклов. Детали, обладающие повышенной хрупкостью, например, тормозные колодки из серого чугуна, армируются стальными вставками. Так же, во избежание бризантного воздействия, статоры шахтных электродвигателей армируются стальными лентами.

Ощутимая экономия дефицитных сплавов достигается при изготовлении, например, режущего инструмента. Дисковая фреза может состоять из трех частей: ножи из твердых сплавов типа ВК, ТК, ТТК, корпус – из силумина, втулка – из углеродистой стали.

С целью повышения технологичности изготовления деталей используют композиции: цилиндр из перлитного чугуна с ребрами воздушного охлаждения из фосфористого чугуна. Для холодильников горячей зоны (лещадь, горн, заплечики) доменных печей используют литые чугунные плиты, каналы в которых выполняются змеевиками из стальных труб. В результате надежность таких деталей возрастает. Композиционные турбинки для турбобуров состоят из двух частей: лопасти изготавливают отдельно прокатом или непрерывным литьем; затем они устанавливаются в форму и заливаются матричным металлом.

Повышение прочности чугунных отливок достигается армированием: литые корпуса задвижек нефтепроводов, арматура трубчатых печей для нефтеперегонки, детали, обеспечивающие одновременно жаростойкость и жаропрочность.

Узловая сборка и компоновка литьем в ряде случаев технологичнее, чем сварка или запрессовка. Она широко используется при литье под давлением. При этом, как правило, ухудшается качество переходной зоны, устранение этого недостатка достигается подогревом деталей и использованием различных флюсов.

При изготовлении композиционных отливок решающими являются контактные процессы, осуществляющие связь между элементами. Связи могут быть механические, адгезионные, диффузионные. Это деление часто может быть условным, так как при соединении деталей давлением жидкого металла могут обнаруживаться диффузионные связи. В свою очередь, диффузионные связи могут оказывать влияние на величину напряжений, в определенных условиях влияющих на механические связи. Распространенными сочетаниями механической связи являются вкладыши для подшипников скольжения, различные виды узловой сборки и компоновки, соединение цапф, осей с отливкой и др. Для более надежного соединения на поверхности вставок делают канавки, проточки, накатки и другие отклонения от цилиндрической поверхности. Если жидкий металл отливки

охватывает вставку, то под влиянием усадки в этом месте создается нормальное давление, определяемое величиной усадки, модулем упругости материала вставки и отливки, коэффициентом Пуассона. При заливке низкоуглеродистой стали (литая опока с цапфами, изготовленными механической обработкой) за счет перитектического превращения усадка увеличивается, и прочность соединения возрастает. Этот вид связи не всегда удовлетворяет требованиям, так как даже высокое давление матричного металла может оставить воздушный зазор между элементами, что совершенно недопустимо в условиях эксплуатации и может вызывать вибрацию, снижение теплопроводности и электропроводности.

При контакте расплава с твердой поверхностью композиционной отливки возникают связи, формирование которых определяется адгезионными силами. В этом случае начинают действовать силы межмолекулярного притяжения – силы Ван-дер-Ваальса, которые развиваются при смачивании расплавом поверхности арматуры. Мерой смачивания является краевой угол смачивания Θ для границы раздела «твердое тело (индекс 1) – жидкость (индекс 2) – газ (индекс 3)»:

$$\cos \Theta = \frac{\sigma_{13} - \sigma_{12}}{\sigma_{23}} \quad (1)$$

Это выражение носит название уравнения Юнга.

На межфазные натяжения можно оказывать влияние путем изменения химического состава арматуры, а также обработки поверхности флюсами [1]. Используя эти приемы, достигаются адгезионные связи, что расширяет возможность композиционного литья. На формирование адгезионных связей большое влияние оказывают условия заполнения формы и тепловой режим при охлаждении отливки. При ламинарном режиме смачивание улучшается. Состав газовой фазы в объеме литейной формы при наличии взаимодействия с жидким металлом может привести к формированию оксидных пленок (Al_2O_3 , Cr_2O_3 и др.). Такие пленки препятствуют смачиванию поверхности металлических вставок и образованию адгезионной связи.

Кроме механической и адгезионной связи важную роль играет наличие диффузионной связи. При изготовлении композиционных вставок одна из составляющих композиции находится в жидком состоянии. В стадии диффузионного взаимодействия главной составляющей процесса являются дефекты кристаллического строения; в пористых металлокерамических оболочках (ПМКО) порошки различных металлов имеют значительно больше дефектов, чем компактные материалы, которые сосредоточены на границах зерен. Поэтому возможными механизмами диффузии являются обменные, вакансионные, межузельные и краудсионные.

При наличии других сочетаний композиционной отливки механизм диффузии может отличаться от описанного. Количественно диффузия характеризуется коэффициентом диффузии. Зависимость коэффициента диффузии (D) от температуры (T) выражается уравнением:

$$D = A \cdot e^{-\frac{Q}{RT}}, \text{ см}^2/\text{с}, \quad (2)$$

где A – коэффициент, зависящий от параметра кристаллической решетки и частоты колебаний; Q – энергия активации; e – основание натурального логарифма; R – универсальная газовая постоянная Больцмана; T – температура, К.

В твердых растворах внедрения диффузия происходит легче, чем в твердых растворах замещения, где нужно выводить замещенный атом из своего постоянного состояния. В железоуглеродистых сплавах главное значение имеют диффузионные процессы, протекающие при наличии градиента концентрации углерода. В композиционной паре чугуна (расплав) – сталь (твердый элемент) переход углерода из чугуна в сталь может протекать в такой последовательности: 1 – насыщение поверхностных слоев стали углеродом из чугуна; 2 – расплавление поверхностного слоя стали; 3 – диффузия углерода из жидкого поверхностного слоя стали вглубь стального образца. Одновременно происходит взаимная диффузия других элементов. Независимо от состава железоуглеродистых сплавов основным критерием полноты контактных процессов остается температура переходной зоны и соотношение масс жидкого и твердого металла. Максимальное значение контактной температуры лежит в области твердожидкого состояния. На диффузионные процессы в контактной зоне твердый элемент – расплав оказывают влияние граничные барьеры. Это ламинарный подслои, корка затвердевшего металла, неметаллические включения на поверхности, газовые включения водородного происхождения, воздушная прослойка между фазами.

При необходимости соединения пары сталь-сталь с равным содержанием углерода целесообразно подвергнуть цементации твердый элемент, что интенсифицирует диффузионные процессы.

Конкретизируя различные способы получения композиционных отливок, следует обратить внимание на формирование свойств стального литья при суспензионной заливке. Необходимость применения этого способа продиктована образованием горячих трещин в низкоуглеродистых сталях (25Л, 20ГЛ и др.) для вагонного литья, корпусов турбин и др. [3, 4]. Факторы, оказывающие влияние на этот вид брака, чрезвычайно многообразны [6]. Повышение трещиностойкости стали основной электроплавки с вводом 1,5 % микрохолодильников из железного порошка и силикокальция получено на корпусных отливках сложной конфигурации массой от 0,7 до 5 т и склонных к трещинообразованию. Исследование полученных отливок корпусов турбины показало повышение пластических свойств: δ на 10 %, ψ на 7 % и ударной вязкости на 44 %. По мнению авторов, это объясняется уменьшением ликвационной неоднородности и измельчением структуры. Помимо повышения трещиностойкости отмечено улучшение качества поверхности отливок, заливаемых суспензионным способом.

Улучшение свойств чугунного литья может быть достигнуто путем объемного армирования отливок проволокой и поверхностного армирования компози-

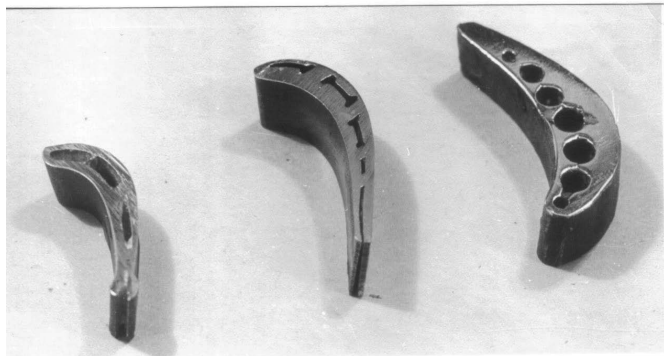
ционными оболочками [7, 8]. Технология получения армированных отливок предусматривает изготовление армирующего каркаса из стальной низкоуглеродистой проволоки, установку каркаса в полость литейной формы и заливку ее чугуном. При этом сохраняются ее основные исходные свойства в композиционной отливке и обеспечена диффузионная связь матрицы и арматуры. Для определения оптимальных параметров процесса армирования построена физическая модель элементарной ячейки армированного металла и математическая модель процесса теплообмена в системе «арматура – матрица – окружающая среда». Анализ термических условий формирования композиционной отливки своден к решению задачи теплопроводности цилиндра (армирующего волокна) при граничном условии третьего рода. При создании объемноармированных отливок исследована структура переходного слоя, толщина которого составляет 100–350 мкм и изменяется от перлито-цементитной до феррито-перлитной. Она определяется диффузией углерода из расплава чугуна в арматуру на стадии отвода теплоты перегрева.

Для повышения износостойкости чугунных отливок используются композиционные оболочки, изготовленные из пластифицированных порошков железа и меди с последующим твердофазным спеканием. Заливка оболочек чугуном приводит к диффузионному соединению элементов. Объектами использования композиционных оболочек являются отливки с износостойкой рабочей поверхностью – подшипники скольжения, детали гидроаппаратуры.

Композиционные отливки дают хорошие результаты при производстве сложных по конфигурации деталей, к которым предъявляются жесткие требования по геометрической точности и эксплуатационной надежности. Сюда относят лопаточные отводы в насосостроении, турбины турбобуров, пресс-формы литья под давлением и другие детали. При разработке технологии производства таких отливок композиционными методами используются гальванопластические и литые оболочки, позволяющие получать шероховатость поверхности по 10 классу и с размерной точностью по 9 качеству [9]. С этой целью изучено влияние водорода на качество диффузионной связи, зависимость свойств переходной зоны от различных параметров, обоснована целесообразность интенсификации диффузионных процессов путем внешнего воздействия на расплав.

Получение тонкополостных отливок (охлаждаемых лопаток турбин, лопастных колес и др.), связанное с удалением стержней из полостей в агрессивных средах, упрощается при использовании солекерамических стержней твердофазного спекания [10]. Вследствие разности температур плавления соли (NaCl с добавками, $T_{\text{плавл}} = 808^\circ\text{C}$) и металла отливки, стержни должны быть защищены от расплавления. Эту функцию выполняет защитный слой из никеля, нанесенный на стержни на установке ЭЛУН (рисунок).

Защитный слой сваривается с металлом, формирует внутренние полости лопатки, образуя композиционную отливку. Достигается это правильным выбором соотношения между толщинами стержня,



а



б

а – темплеты литых лопаток различной конфигурации; б – солекерамические стержни (светлый – после обжига, темный – после напыления)

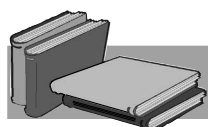
отливки и защитного слоя, а также теплофизических характеристик системы. Численное моделирование температурных полей в рассматриваемой системе проводили с использованием конечно-разностного представления дифференциального уравнения теплопроводности Фурье [11].

Приведенные примеры, не претендуя на их полноту, показывают широкие возможности композиционных отливок из различных комбинаций составляющих, позволяющих получать нужные эксплуатационные свойства.

Выводы

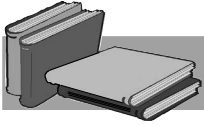
Композиционная отливка состоит из отдельных частей, органически связанных друг с другом, но сохраняющих свою индивидуальность и специфические свойства. В результате формируется новое качество, которого лишены отдельные части. Композиционное литье по своей природе является неоднородной физико-химической системой, состоящей из различных по физическим свойствам или химическому составу частей. Эти части отделены поверхностью раздела, на которой скачком изменяется одно или несколько свойств. Качество композиционного литья в значительной степени зависит от получения однородной и управляемой по геометрическим параметрам и свойствам поверхности раздела двух элементов, где протекают сложные физико-химические процессы при нестационарном тепловом режиме. Поверхность раздела может формироваться под воздействием механических, адгезионных и диффузионных процессов. Независимо от состава элементов композиции, основным критерием полноты контактных процессов остается температура переходной зоны и соотношение масс жидкого и твердого металла.

Приведенные примеры показывают широкие возможности композиционных отливок из различных комбинаций составляющих, позволяющих получать нужные эксплуатационные свойства.



ЛИТЕРАТУРА

1. Ясюков В. В., Лысенко Т. В., Волянская К. В. Композиционные отливки с регулируемым поверхностным слоем // *Металл и литье Украины*. – 2016. – № 4. – С. 36–40.
2. Ясюков В. В., Солоненко Л. И., Цыбенко О. В. Композиционные отливки пресс-форм литья под давлением // *Металл и литье Украины*. – 2015. – № 9. – С. 26–29.
3. Совершенствование технологии стального литья / А. А. Рыжиков, М. И. Роцин, В. И. Фокин, В. И. Паньшин и др. – М.: Машиностроение, 1977. – 143 с.
4. Затуловский С. С. Суспензионная разливка. – Киев: Высшая школа, 1981. – 260 с.
5. Оболенцев Ф. Д. Физикохимия и технология композиционного литья. – Одесса: ОПИ, 1984. – 97 с.
6. Ясюков В. В., Лысенко Т. В., Солоненко Л. И., Чередник В. А. Анализ и синтез физико-химического воздействия на эксплуатационную надежность отливок // *Металл и литье Украины*. – 2016. – № 8–10. – С. 19–23.
7. А. с. № 996063 (СССР). Способ изготовления биметаллических отливок / В. Б. Курушин, Ф. Д. Оболенцев, В. В. Ясюков. – Оpubл. в Б. И., 1983, № 6.
8. А. с. № 969462 (СССР). Способ пропитки пористых спеченных заготовок / В. Г. Борщ, В. Б. Курушин, Ф. Д. Оболенцев, В. В. Ясюков. – Оpubл. в Б. И., 1982, № 40.
9. Оболенцев Ф. Д., Савченко О. Я. Геометрическая точность композиционных отливок с гальванопластическими оболочковыми стержнями // *Литейное производство*. – 1983. – № 11. – С. 27–28.
10. Оболенцев Ф. Д., Ясюков В. В., Савченко О. Я., Телис М. Я. Теплофизическая защита стержней для получения тонкополостных отливок // *Литейное производство*. – 1982. – № 9. – С. 20–22.
11. Ясюков В. В., Панова Т. Н., Науменко Е. А. Моделирование температурных полей отливок // V Международная научно-практическая выставка-конференция «Литье 2009». – Запорожье – 2009. – С. 160–162.



REFERENCES

1. Yasiukov V. V., Lysenko T. V., Volianskaia K. V. (2016). Kompozitsionnye otlivki s reguliruемым poverkhnostnym sloem [Composite castings with adjustable surface layer]. Metall i lit'e Ukrainy, no. 4, pp. 36–40 [in Russian].
2. Yasiukov V. V., Solonenko L. I., Tsybenko O. V. (2015). Kompozitsionnye otlivki press-form lit'ia pod davleniem [Composite castings of die-casting molds]. Metall i lit'e Ukrainy, no. 9, pp. 26–29 [in Russian].
3. Ryzhikov A. A., Roshchin M. I., Fokin V. I., Pan'shin V. I. et al. (1977). Sovershenstvovanie tekhnologii stal'nogo lit'ia [Improvement of steel casting technology]. Moscow: Mashinostroenie, 143 p. [in Russian].
4. Zatulovskii S. S. (1981). Suspensionnaia razlivka [Suspension casting]. Kiev: Vysshaia shkola, 260 p. [in Russian].
5. Obolentsev F. D. (1984). Fizikokhimiia i tekhnologiiia kompozitsionnogo lit'ia [Physico-chemistry and technology of composite casting]. – Odessa: OPI, 97 p. [in Russian].
6. Yasiukov V. V., Lysenko T. V., Solonenko L. I., Cherednik V. A. (2016). Analiz i sintez fiziko-khimicheskogo vozdeistviia na ekspluatatsionnuu nadezhnost' otlivok [Analysis and synthesis of physico-chemical impact on the operational reliability of castings]. Metall i lit'e Ukrainy, no. 8–10, pp. 19–23 [in Russian].
7. A. s. № 996063 (USSR). Sposob izgotovleniia bimetallicheskih otlivok [Method for manufacturing bimetallic castings]. V. B. Kurushyn, F. D. Obolentsev, V. V. Yasiukov. Opubl. v B. I., 1983, no. 6 [in Russian].
8. A. s. № 969462 (USSR). Sposob propitki poristyx spechennykh zagotovok [Method for impregnating porous sintered blanks]. V. G. Borshch, V. B. Kurushyn, F. D. Obolentsev, V. V. Yasiukov. Opubl. v B. I., 1982, no. 40 [in Russian].
9. Obolentsev F. D., Savchenko O. Ya. (1983). Geometricheskaia tochnost' kompozitsionnykh otlivok s gal'vanoplasticheskimi obolochkovymi sterzhniami [Geometrical accuracy of composite castings with electroformed shell cores]. Liteinoe proizvodstvo, no. 11, pp. 27–28 [in Russian].
10. Obolentsev F. D., Yasiukov V. V., Savchenko O. Ya., Telis M. Ya. (1982). Teplofizicheskaia zashchita sterzhnei dlia poluchenii tonkoplostnykh otlivok [Thermophysical protection of rods for obtaining thin-film castings]. Liteinoe proizvodstvo, no. 9, pp. 20–22 [in Russian].
11. Yasiukov V. V., Panova T. N., Naumenko E. A. (2009). Modelirovanie temperaturnykh polei otlivok [Modeling of temperature fields of castings]. V Mezhdunarodnaia nauchno-prakticheskaia vystavka-konferentsiia «Lit'e 2009». Zaporozh'e, pp. 160–162 [in Russian].

Анотація

Ясюков В. В., Лисенко Т. В., Воронова О. І.

Композиційне литво – засіб підвищення експлуатаційної надійності литих деталей

Показано значення застосування композиційних виливків для подальшого розвитку ливарного виробництва. Якість композиційного литва значною мірою залежить від отримання однорідної і керованої контактної зони елементів, де протікають складні фізико-хімічні процеси при нестационарному тепловому режимі.

Ключові слова

Композиційна виливка; механічні, адгезійні, дифузійні зв'язки; експлуатаційна надійність литих деталей.

Summary

Yasiukov V., Lysenko T., Voronova O.

Composite casting – a means of increasing the operational reliability of cast parts

It is shown the significance of using composite castings for the further development of foundry. The quality of composite casting largely depends on the production of a homogeneous and controlled contact zone of elements, where complex physicochemical processes take place under non-stationary thermal conditions.

Keywords

Composite casting; mechanical, adhesive, diffusion bonds; operational reliability of the cast parts.

Поступила 29.09.17