

Композиционные отливки с регулируемым поверхностным слоем

Технологический процесс изготовления композиционных отливок, заключающийся в пропитке жидким металлом пористых металлокерамических оболочек, формирующих рабочую поверхность отливки, обеспечивает низкую шероховатость (5-6 класс ГОСТ 2789-95), управление в широком диапазоне структурой поверхностного слоя и физико-механическими свойствами.

Ключевые слова: композиционная отливка, пористая металлокерамическая оболочка, спекание, диффузионные процессы

Актуальность работы. Известно, какую большую роль в эксплуатационной надёжности отливки играет поверхностный слой. Здесь учитываются, прежде всего, структура литой корочки, наличие или отсутствие дефектов усадочного, газового, эндогенного и экзогенного происхождения, различные виды пригара (химический, механический, смешанный) и, наконец, шероховатость поверхности. Технологические приёмы, направленные на решение каждой из этих проблем, чрезвычайно разнообразны. К основным из них следует отнести:

- регулирование теплопроводности литой формы с целью получения плотной мелкокристаллической структуры; это особенно важно для отливок, работающих в условиях ударно-циклических нагрузок при асимметрии цикла, когда усталостные трещины зарождаются на поверхности отливки;

- повышение качества поверхности литой формы с одновременным улучшением воспроизводимости поверхности жидким расплавом; здесь можно отметить как многообразие огнеупорных материалов для литых форм, так и способов их изготовления (набивные, керамические и керамизированные, металлические, оболочковые и др.); важную роль играют процессы плавки, рафинирования, модифицирования и других видов подготовок расплавов перед заливкой их в литую форму;

- создание условий, при которых отсутствует взаимодействие между формой и жидким металлом;

- применение внешнего воздействия на жидкий металл (давления, ультразвука, электрических полей и т. д.), что особенно эффективно для широкоинтервальных сплавов;

- пересмотр параметров, характеризующих точность отливок (на сегодняшний день понятие «геометрическая точность отливок» включает четыре параметра: размерная точность, качество поверхности, пространственные отклонения, точность конфигурации), при этом улучшение любого из четырёх параметров повышает геометрическую точность отливок. В идеале о геометрической точности необходимо судить по комплексу показателей. Между тем, с целью повышения экономичности показателей литой

производства без ущерба для качества не следует добиваться улучшения всех показателей в одинаковой степени. Например, в корпусном литье главным является размерная точность (расстояние между осями, соосность приливов, зазоры между подвижными и неподвижными частями и др.). Здесь остальные параметры имеют второстепенное значение. Для отливок, подвергающихся динамическим нагрузкам, важно качество литой поверхности. В ряде случаев главным является геометрическая форма отливки, которая в литом варианте без механообработки позволяет получить конфигурацию готовой детали. В любом случае, обязательным является уменьшение объёмов механической обработки отливок резанием, что позволяет сохранить литую структуру поверхности, удешевить процесс механообработки, снизить потери металла на стружке и её переплаве.

Далеко неполный перечень технологических приёмов, приведённых выше, позволяет сделать вывод, что широко распространённая на сегодняшний день технология литья не решает комплекс проблем, связанных с повышением эксплуатационной надёжности отливок и сближением свойств литых и кованных заготовок. Между тем существует метод формообразования – композиционное литьё, который имеет большие потенциальные возможности по уменьшению отходов металла, трудовых затрат, материалоёмкости машин. Это предопределяется тем, что при композиционном литье синтезируются отдельные элементы детали, которые могут быть выполнены наиболее эффективными методами формообразования для данного элемента, а также из оптимальных материалов в зависимости от требований, предъявляемых к деталям. Такие элементы, установленные в литую форму, после заливки матричным металлом объединяются в единое целое – композиционную отливку. Композиционное литьё по своей природе гетерогенно, что позволяет получать сумму служебных свойств нового качества, недоступного для отдельных элементов, составляющих композицию. Такие отливки могут быть получены, кроме всего прочего, с поверхностным композиционным слоем, обладающим заданными служебными свойствами.

Постановка задачи. Большое значение имеет процесс объединения отдельных элементов композиционной отливки в единое целое расплавом, который после затвердевания связывает эти элементы. Решающими для этой технологии являются контактные процессы, осуществляющие связь между элементами. Связи могут быть адгезионными, механическими, диффузионными; при формировании таких связей часто происходят комплексные взаимодействия, протекающие при заливке жидкого металла в литейную форму. Таким образом, появляется реальная возможность замены традиционного поверхностного слоя отливки, образующегося при её кристаллизации, пористой оболочкой, изготавливаемой из порошков металлов и их соединений, которая позволяет управлять строением и свойствами поверхностного слоя. При этом заполнение пор оболочки происходит в процессе заливки с образованием композиционной отливки.

Целью этой работы является конкретизация процессов, происходящих как при изготовлении пористых металлокерамических оболочек (ПМКО), так и протекающих при заливке литейной формы.

Сущность и методы исследований. Получение пористых металлокерамических оболочек осуществлялось твёрдофазным спеканием металлических порошков. При твёрдофазном спекании имеется возможность управлять подготовкой дисперсной фазы, гранулометрическим составом, коэффициентом упаковки, седиментационной устойчивостью суспензий, параметрами обжига, пористостью. С этой целью приготавливали суспензию из металлического порошка необходимого состава (80-85 %) и органического пластификатора (парафин+полиэтилен либо парафин+стеарин). Оболочки необходимой конфигурации получали запрессовкой суспензии в пресс-форму [1] при температуре 45-50 °С. Важную роль на этом этапе имеет седиментационная устойчивость горячей суспензии, которую изучали измерением величины её электрического сопротивления в различных уровнях. Отпрессованную оболочку подвергали твёрдофазному спеканию при температуре (0,5-0,6) $T_{\text{пл}}$ порошка в среде адсорбента. Консолидация порошка происходит в результате протекания диффузионных процессов в контактных зонах и припекания частиц с образованием «шеек» в местах контакта.

В процессе спекания металлокерамика претерпевает изменения кристаллической структуры, вызванные рекристаллизацией. Первичную рекристаллизацию можно считать законченной после соприкосновения растущих зёрен. После первичной рекристаллизации зёрна новой поликристаллической массы начинают «поглощать» друг друга, этот процесс сопровождается уменьшением общей поверхности зёрен и их поверхностной энергии. Укрупнение зерновой структуры в этом процессе представляет собой вторичную рекристаллизацию. На этом этапе возможно резкое различие в формах и размерах зёрен. В дополнение к рекристаллизационным процессам на этом этапе возможно спекание в присутствии некоторого количества жидкой фазы, образующейся вследствие эвтектических включений (химические реакции между компонентами дисперсной фазы, либо наличие примесей в ингредиентах).

При рассмотрении модели зернистой структуры в стадии непрерывной вторичной рекристаллизации, и приводящей к исчезновению отдельных зёрен, вероятность прохождения движущихся границ зёрен через произвольную точку составляет

$$n = \sum_{k=0}^{N_i - N_f} \frac{1}{N_i - k}, \quad (1)$$

где N_i и N_f – исходное и конечное количество зёрен, соответственно.

Это уравнение даёт основание полагать, что не существует какого-либо соответствия между размером зерна и вероятностью его исчезновения. Уравнение (1) сокращается до $n = \ln N_i / N_f$. Поскольку $N_i / N_f = (d_f / d_i)^3$, (d_i и d_f – первоначальный и конечный диаметры зёрен), вероятное количество «проходов» за время увеличения диаметра зёрен от d_i до d_f

$$n = 3 \ln(d_f / d_i). \quad (2)$$

Появляется практический интерес к рекристаллизации ещё одного типа – прерывистой вторичной рекристаллизации или чрезмерному росту зёрен (рис. 1, количество граней отмечено цифрами, направление миграции границ зёрен указано стрелками). Это явление может происходить, если имеется зерно с большим числом граней, чем у среднего зерна, благодаря чему возрастают кривизна границ зёрен и движущая сила, вызывающая миграцию зёрен. Причиной этого служит наличие примесей, образующих жидкую фазу на границах зёрен, действующих как транспортная фаза в процессе растворения и осаждения, заставляющих крупное зерно приобретать правильную форму, идентичную форме кристалла, растущего из раствора или расплава. Такая разноразмерность приводит, как правило, к потере прочности ПМКО.

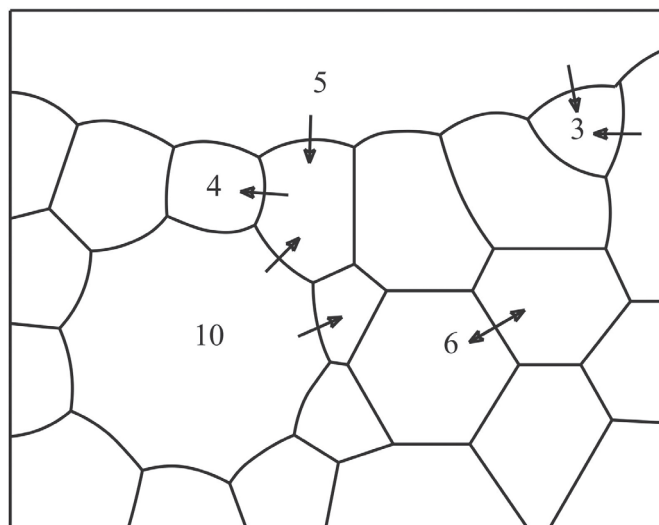


Рис. 1. Схема поликристаллического образца, показывающая изменение знака кривизны границ зёрен в зависимости от количества граней (отмечено цифрами); направление миграции границ зёрен указано стрелками

Важными составляющими этого процесса являются формирование шероховатости рабочей поверхности оболочки (то есть будущей отливки), линейная усадка, плотность, пористость. Регулирование пористости (до 50-60 %) осуществлялось скоростью нагрева при обжиге, выбором гранулометрии порошка, температурой спекания. Всё это обеспечило малую шероховатость поверхности ПМКО (до 6-7 класса), управление в широком диапазоне структурой поверхностного слоя отливки и его физико-механическими характеристиками.

При заливке литейной формы необходимым условием заполнения пор ПМКО жидким металлом является прогрев оболочки до температуры кристаллизации расплава. Аналитический расчёт температурного поля в данной системе жидкий металл-ПМКО-литейная форма осуществляли решением дифференциального уравнения теплопроводности Фурье методом конечных разностей. При этом процессы теплопереноса (рис. 2) в средах 1 (воздух), 2 (материал литейной формы), 3 (ПМКО), 4 (жидкий металл отливки) описываются уравнением

$$\frac{dt_i}{d\tau} = a_i \frac{d^2 t_i}{dx^2}, \quad (3)$$

где индекс $i = 1, 2, 3, 4$ относится соответственно к окружающему форму воздуху, материалу литейной формы, ПМКО, жидкому металлу отливки.

В общем виде система разностных уравнений при равномерной разбивке каждой среды на элементы следующая:

$$T_m^{n+1} = A_i(T_{m-1}^n + T_{m+1}^n) + (1 - 2A_i)T_m^n, \quad (4)$$

где T_m^n – температура m -го элемента в n момент времени; n – индекс строки; m – индекс столбца; A_i – параметр, определяющий устойчивость вычислительного процесса; $A_i = \frac{a_i \cdot \Delta\tau}{(\Delta x_i)^2}$, $\Delta\tau$ – шаг по времени.

Анализ расчётных данных показывает, что необходимый для пропитки прогрев ПМКО сложно обеспечить только за счёт перегрева жидкого металла, особенно при небольших соотношениях размеров R (толщина стенок отливки) к r (толщина оболочки). В этих случаях целесообразно применять предварительный подогрев формы, либо перепуск металла.

Процесс взаимодействия между составляющими композиционной отливки при пропитке, как правило, делится на 3 стадии: смачивание и растекание с образованием физического контакта и формированием межатомных связей на границе раздела; диффузионное или химическое взаимодействие между твёрдой и жидкой фазами, сопровождающееся изменением химического состава контактных зон, образованием твёрдых растворов или интерметаллидов [2]; кристаллизация жидкой фазы, фиксирующая структурное состояние композиционной отливки, формирующееся в результате межфазного взаимодействия.

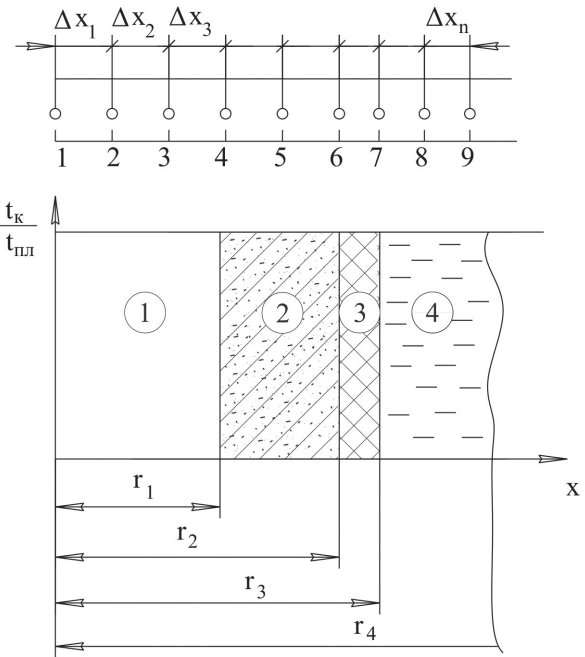


Рис. 2. Теплофизическая схема расчёта температурного поля: 1 – воздух, 2 – материал литейной формы, 3 – ПМКО, 4 – жидкий металл отливки

В первой стадии заметную роль играют адгезионные силы, проявляющиеся в контактно-смачивании с участием трёх фаз – твёрдой, жидкой и газообразной. Мерой смачивания является краевой угол смачивания, который определяется условиями равновесия лежащей на подложке капли, на которую одновременно действуют межфазные натяжения: расплав (жидкость)-газовая фаза ($\sigma_{жг}$); расплав (жидкость)-твёрдая поверхность ($\sigma_{жт}$); твёрдая поверхность-газовая фаза ($\sigma_{тг}$). Из равновесия сил следует, что

$$\sigma_{тг} = \sigma_{жт} + \sigma_{жг} \cdot \cos \theta \quad \text{или} \quad \cos \theta = \frac{\sigma_{тг} - \sigma_{жт}}{\sigma_{жг}}, \quad (5)$$

где θ – краевой угол смачивания (рис. 3).

На межфазные натяжения можно влиять, а, следовательно, влиять на краевой угол смачивания. При этом, чем меньше θ , тем больше адгезия расплава к твёрдой поверхности. Зависимость между поверхностным натяжением и величиной адгезии определяется уравнением Дюпре:

$$W_A = \sigma_{жг} (1 + \cos \theta), \quad (6)$$

из которого следует, что работа адгезии жидкости к твёрдой поверхности зависит от величины

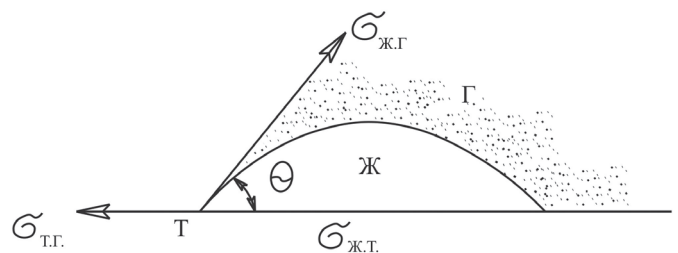


Рис. 3. Форма капли на поверхности твёрдого тела при наличии смачиваемости

поверхностного натяжения жидкости на границе с газом и от θ . При условии, когда $\theta = 0$ и $\cos \theta = 1$, работа адгезии $W_A = 2\sigma_{жг}$. В тех случаях, когда смачивание не происходит, адгезия уменьшается, а при полном несмачивании $\theta = 180^\circ$, $\cos \theta = -1$, $W_A = 0$. Контакта в этом случае между ПМКО и расплавом происходить не будет. Примером влияния на краевой угол смачивания является пропитка ПМКО на основе сормайта жидким чугуном [3]. Хром, входящий в состав сормайта, образует на поверхности плёнку оксида хрома Cr_2O_3 , которая не смачивается жидким чугуном ($\theta = 137^\circ$). Смачивание и растекание наступает только после восстановления оксидной плёнки углеродом матричного чугуна, а это требует длительного контакта расплава с ПМКО (до 1 часа), что в условиях литейной формы затруднительно. Положительное решение было достигнуто за счёт ввода в ПМКО порошка железа и обработки поверхности тетраборатом натрия $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ ($\theta = 54^\circ$).

В стадии диффузионного или химического взаимодействия решающую роль играют дефекты кристаллического строения, тем более, что ПМКО состоит из порошков различных металлов, имеющих значительно больше дефектов, чем компактные материалы. В ПМКО основным структурным элементом поликристаллического вещества является граница зерна – область аномально высокой диффузионной подвижности. Поэтому возможными механизмами диффузии являются обменные (1, 2), вакансионные (3), межузельные (4, 5) и, для особо сложных порошковых композиций, краудионные (6) (рис. 4).

Микроструктура композиционных отливок формируется в процессе пропитки ПМКО жидким металлом отливки и последующей кристаллизации. Движение жидкого металла по капиллярам металлокерамики сопровождается интенсивной диффузией, что влечёт за собой изменение химического состава контактирующих фаз, оплавление и частичное растворение зёрен [4]. Чем сложнее порошковая композиция, тем ярче выражен этот процесс и тем более разнообразны свойства поверхности отливок.

При исследовании условий проникновения жидкого металла в ПМКО была установлена зависимость

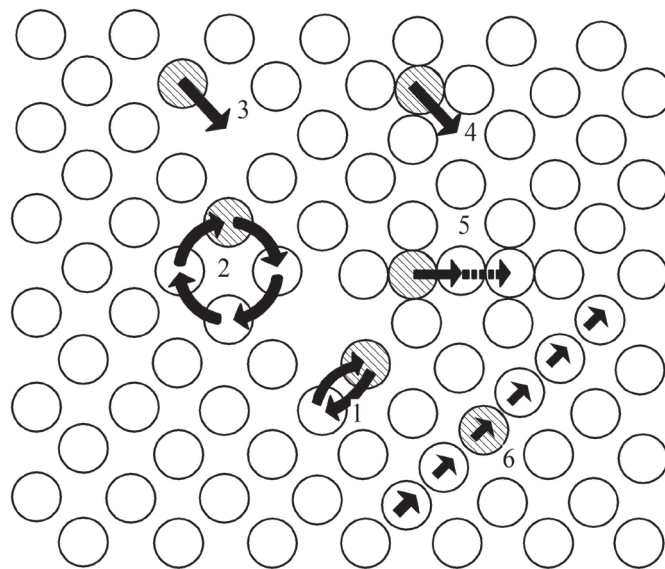


Рис. 4. Возможные механизмы диффузии: 1, 2 – обменные; 3 – вакансионные; 4, 5 – межузельные; 6 – краудионные

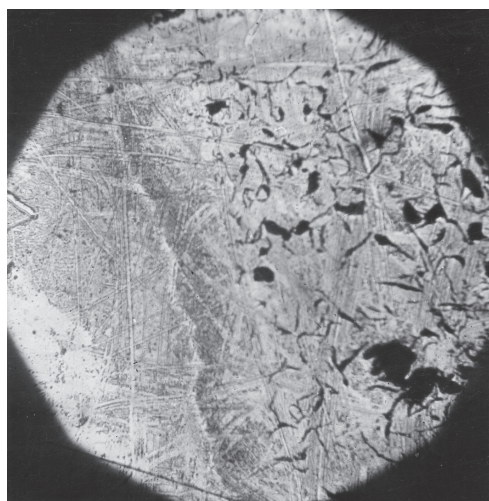
скорости проникновения в поры от соотношения температуры оболочки и температуры металла.

Если соблюдается режим нестынувшей жидкости, скорость проникновения металла увеличивается с увеличением размера пор, в соответствии с уравнением Невье-Стокса:

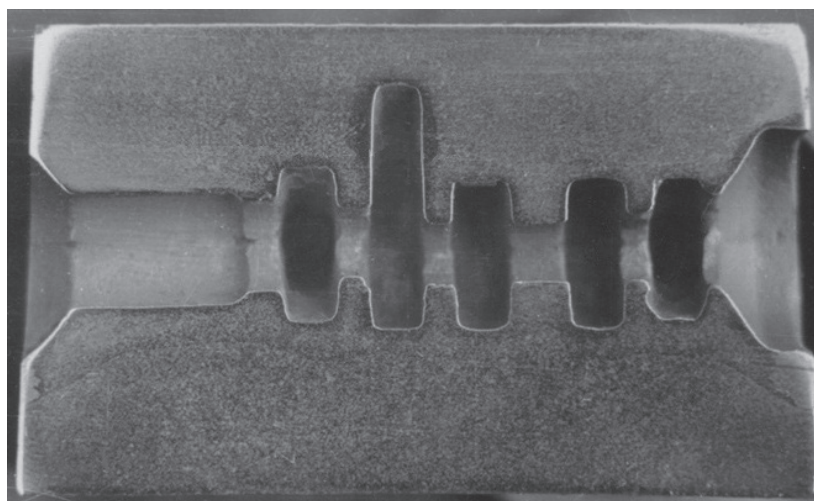
$$\frac{dl}{d\tau} = \frac{r^3 \gamma_m}{g \cdot \eta} \left(\frac{2\sigma \cos \theta}{r \cdot \gamma_m \cdot l} - g \sin \phi \right), \quad (7)$$

где l , r – длина и радиус капилляра; ϕ – угол наклона капилляра; η , γ_m , σ – вязкость, плотность, поверхностное натяжение жидкого металла; τ – время движения жидкого металла; γ – ускорение свободного падения. Если капиллярный потенциал исчерпывается и капиллярное давление будет равно гравитационному, то $dl / d\tau = 0$. Если капилляр мал, то скорость проникновения тоже мала, но капиллярный потенциал будет выше и проникновение металла происходит на большую глубину.

На связь ПМКО с жидким металлом оказывает влияние температура заливки (для чугуна 1300-1450 °C)



а



б

Рис. 5. Шлиф контактной зоны ПМКО (а) и матрицы; разрез отливки корпуса гидрораспределителя (б)

и соотношение толщин стенки отливки и ПМКО. При благоприятном соотношении этих величин прочность связи τ_{cp} может колебаться в интервале $(5-20) \cdot 10^7$ Па. Оценка связи проводится также по шлифам контактных зон (рис. 5, а, ПМКО состоит из смеси порошков хрома, никеля, матричный металл – серый чугун). Проведённые исследования позволяют рекомендовать применение ПМКО из порошков металлов и их соединений для управления строением и свойствами поверхностного слоя отливок.

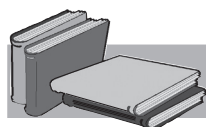
Эта технология может быть рекомендована для изготовления широкой номенклатуры отливок: корпуса гидрораспределителей (рис. 5, б), клапанные плиты холодильных машин, вставки пресс-форм литья под давлением, коррозионностойкие детали аппаратов химического машиностроения, отливки с износостойкой и антифрикционной поверхностью, отливки, работающие в контакте с подвижными и жидкими и газообразными средами, радиоволнами.

Выводы

Технологический процесс изготовления композиционных отливок, заключающийся в пропитке жидким металлом пористых металлокерамических оболочек, формирующих рабочую поверхность отливки, обеспечивает низкую шероховатость (5-6 класс

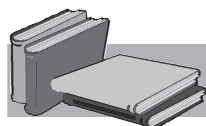
ГОСТ 2789-95), управление в широком диапазоне структурой поверхностного слоя отливки и физико-механическими свойствами.

С целью практического использования технологии исследовано большое количество исходных вариантов: условия эксплуатации литых деталей и их конструктивные особенности; теплофизические характеристики сплава, формы, материала оболочки; толщина стенки отливки и оболочки, толщина формы, различные соотношения между ними; подбор порошковых смесей, гранулометрии порошков. Для решения такой многовариантной системы одного экспериментального подхода недостаточно, так как каждый эксперимент несущий достоверную информацию, не всегда позволяет обобщить возможные варианты исследований. Поэтому в дополнение к экспериментам проводился аналитический метод решения задачи, ориентированный на использовании конечно-разностного представления дифференциального уравнения теплопроводности Фурье. Сравнение экспериментальных и расчётных данных показало высокую сходимость результатов; металлографический анализ зоны контакта оболочки с матрицей отливки фиксирует плотный переходный слой, свидетельствующий о качественном протекании диффузионных процессов.



ЛИТЕРАТУРА

1. Оболенцев Ф. Д. Изготовление пористых металлокерамических оболочек для композиционных отливок / Ф. Д. Оболенцев, Е. И. Литвинова, С. В. Попов // Литейное производство. – 1985. – № 1. – С. 20-21.
2. Бокштейн Б. С. Диффузия в металлах / Б. С. Бокштейн // Диффузия в металлах. – М.: Металлургия, 1978. – 245 с.
3. Оболенцев Ф. Д. Применение пористых металлокерамических оболочек при изготовлении отливок / Ф. Д. Оболенцев, В. Г. Борщ // Литейное производство. – 1981. – № 5. – С. 15-16.
4. Ясюков В. В. Кинетика пропитки пористых металлокерамических оболочек / Моделирование в прикладных научных исследованиях: Материалы XV семинара. – Одесса. – 2009. – С. 64-65.



REFERENCES

1. Obolentsev F. D., Litvinova E. I., Popov S. V. (1985) Izgotovlenie poristyykh metallokeramicheskikh obolochek dlya kompozitsionnykh otlivok [The manufacturing of the porous ceramic-metal shells for composite castings]. Moscow: Liteynoe proizvodstvo, no. 1, pp. 20-21. [in Russian].
2. Bokshhteyn B. S. (1978). Diffuziya v metallakh [Diffusion in Metals]. Moscow: Metallurgiya, 1978, pp. 245. [in Russian].
3. Obolentsev F. D., Borshch V.G. (1981). Primenenie poristyykh metallokeramicheskikh obolochek pri izgotovlenii otlivok [The use of the porous ceramic-metal shells in the manufacture of castings]. Moscow: Liteynoe proizvodstvo, no. 5, pp. 15-16. [in Russian].
4. Yasiukov V. V. (2009) Kinetika propitki poristyykh metallokeramicheskikh obolochek [Kinetics of impregnation of the porous ceramic-metal shells]. Materialy XV seminar: Modelirovanie v prikladnykh nauchnykh issledovaniyakh. Odessa, 2009, pp. 64-65. [in Russian].

Анотація

Ясюков В. В., Лисенко Т. В., Волянська К. В.

Композиційні виливки з поверхневим шаром, що регулюється

Технологічний процес виготовлення композиційних виливків, який полягає в насиченні рідким металом пористих металокерамічних оболонок, які формують робочу поверхню виливка, забезпечує низьку шорсткість (5-6 клас ГОСТ 2789-95), управління в широкому діапазоні структурою поверхневого шару і фізико-механічними властивостями.

Ключові слова

композиційний виливок, пориста металокерамічна оболонка, спікання, дифузійні процеси

Summary

Yasiukov V., Lysenko T., Volianska K.

Composite casting with a controlled surface layer

The technological process of the manufacture of composite castings, which consists in impregnating of the porous ceramic-metal shells by the liquid metal, forming the working surface of the casting, provides a low surface roughness (GOST 2789-95 class 5-6), managing a wide range of surface layer structure and physico-mechanical properties.

Keywords

composite casting, the porous ceramic-metal shells, caking, diffusion processes

Поступила 19.04.2016