

ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЕЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ И ФОРМ

Л.Г. Знаменский, О.В. Ивочкина, И.Н. Ердаков

Принципиально новым направлением в решении проблемы повышения качества отливок является разработка высоких технологий формообразования, основанных на активации наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ) материалов и процессов в точном литье.

В этом отношении Россия занимает лидирующее положение, обладая уникальной технологией создания генераторов мощных НЭМИ. Однако в отечественной и зарубежной научно-технической литературе практически отсутствуют данные по использованию НЭМИ в точном литье. Вместе с тем, принимая во внимание энергетические характеристики современных генераторов таких полей (мощность 1... 1,5 МВт, длительность импульсов 10^{-10} ... 10^{-9} с при частоте их повторений до 1000 Гц), появляется возможность реального управления структурой и свойствами связующих растворов [1]. Это создает условия для разработки новых технологий электроимпульсно-фильтрационного формообразования в процессах точного литья.

В отличие от традиционного подхода в случае фильтрационного формообразования в оснастку засыпают только сухой наполнитель, представляющий собой огнеупорный зернистый материал (ЗМ), плакированный гелеобразователем. Активированный НЭМИ связующее вводят в наполнитель методом фильтрации через специальные отверстия в оснастке. Продвигаясь в межзерновом пространстве плакированного зернистого материала (ПЗМ), пропитывающий раствор контактирует с гелеобразователем, химически отверждается, придавая прочность смеси.

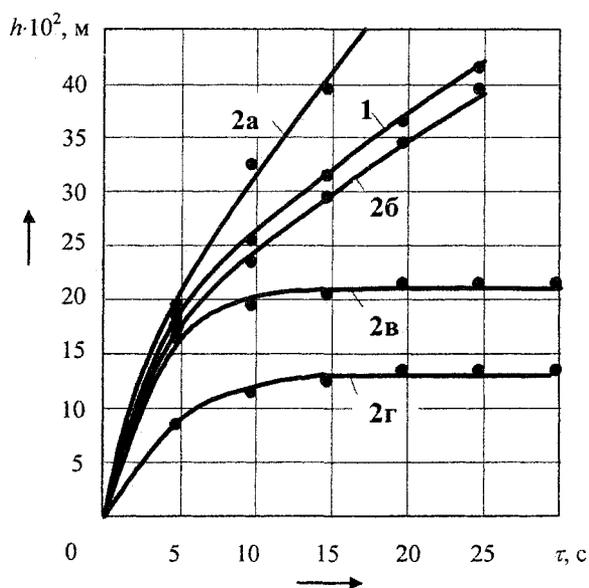
Исходя из анализа свойств известных связующих растворов, применяемых в литье по выплавляемым моделям, выбрано жидкое стекло (ЖС). В качестве плакирующего состава наполнителя использован водный раствор хлорида алюминия (ХА). Выбор гелеобразующей системы «жидкое стекло - наполнитель, плакированный ХА» диктуется возможностью ускоренного получения в пористом теле коагуляционных структур (геля), обеспечивающих адгезионное «сцепление» частиц пористой среды и повышение термостойкости керамических стержней и форм.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что продвижение пропитывающего раствора в поровом пространстве ПЗМ сопровождается потерей текучести и гелеобразованием связующего с последующим формированием прочности смеси.

Учитывая многофакторность процессов филь-

трации в гелеобразующих системах, по существу задача в математической форме состоит в аналитическом выводе зависимости перемещения связующего раствора в плакированном наполнителе от времени при заданных значениях физико-химических свойств и параметрах электроимпульсной обработки формовочных материалов. Решение задачи в таком виде обеспечивает возможность расчета оптимальных технологических параметров для изготовления стержней и форм различных типоразмеров и массы.

Вопросам теории фильтрации посвящена обширная литература. При этом центральное место в ней занимает кинетика фильтрационных процессов в пористых средах [2]. Проверка адекватности уравнений классической теории результатам экспериментов по исследованию кинетики фильтрации ЖС, обработанного НЭМИ, через плакированный его гелеобразователем зернистый наполнитель показала, что расчетные данные неудовлетворительно аппроксимируют полученные опытные значения параметров. На рисунке представлены теоретическая и экспериментальные кинетические зависимости $h = f(\tau)$. Данные получены при соблюдении средних значений экспериментальных факторов, приведенных в табл. 1.



Кинетические зависимости фильтрационных процессов $h = f(\tau)$: 1 — зависимость $h = f_1(\tau)$, рассчитанная по уравнениям классической теории фильтрации [2], 2 — экспериментальные зависимости $h = f_2(\tau)$; а — ЗМ и НЭМИ, б — ЗМ без НЭМИ, в — ПЗМ и НЭМИ, г — ПЗМ без НЭМИ

Диапазон значений экспериментальных факторов

Наименование факторов	Диапазон значений факторов
1. Остаточное давление воздуха в оснастке, 10^5 , Па	0,1...0,8
2. Количество лакирующего раствора к массе наполнителя, %	1...4
3. Плотность пропитывающего раствора, $\text{кг}/\text{м}^3$	1100...1250
4. Плотность ЖС, $\text{кг}/\text{м}^3$	1150...1400
5. Модуль ЖС	2,5...3,0
6. Средний размер зерен наполнителя, 10^{-4} , м	1...4
7. Удельная мощность НЭМИ, $\text{МВт}/\text{м}^3$	30...70
8. Частота НЭМИ, Гц	700...1500
9. Продолжительность обработки НЭМИ, мин	10...30

В теоретическом плане разработка математической модели электроимпульсно-фильтрационного формообразования должна быть нацелена на отражение специфики указанного варианта фильтрации, т.е. учет влияния процесса гелеобразования на продвижение связующего в межзерновом пространстве уплотненного лакированного наполнителя и активации НЭМИ пропитывающего раствора.

Полагая, что скорость фильтрации является производной перемещения фронта фильтрующейся жидкости по времени, уравнение Дарси [2] может быть представлено в следующей дифференциальной форме:

$$\frac{dh}{d\tau} = K \frac{\Delta P}{\eta h}. \quad (1)$$

Разделяя переменные, получим

$$h dh = K \frac{\Delta P}{\eta} d\tau. \quad (2)$$

Интегрирование левой части дифференциального уравнения не представляет математических трудностей. Сложность интегрирования правой части состоит в том, что для рассматриваемого варианта вязкость жидкости является функцией времени. Причем, на первом этапе вязкость пропитывающего раствора при увеличении продолжительности его обработки НЭМИ уменьшается. На втором этапе в процессе фильтрации через наполнитель, лакированный гелеобразователем, наблюдается резкое повышение вязкости раствора относительно полученной после его обработки НЭМИ.

Таким образом, для решения дифференциального уравнения (2) необходимо знать законы изменения вязкости раствора со временем в процессах его обработки НЭМИ и фильтрации через наполнитель, лакированный гелеобразователем. На основании анализа кривых кинетики отверждения получены в аналитической форме следующие зависимости:

$$\frac{\eta_{\text{НЭМИ}}}{\eta_0} = b^{\tau_{\text{обр.НЭМИ}}}, \quad (3)$$

где $\eta_{\text{НЭМИ}}$ – вязкость ЖС после обработки его НЭМИ, Па·с; η_0 – исходная вязкость ЖС, Па·с; b – коэффициент интенсивности «разжижения»

связующего при его обработке НЭМИ; $\tau_{\text{обр.НЭМИ}}$ – продолжительность обработки НЭМИ, мин.

$$\frac{\eta - \eta_{\text{НЭМИ}}}{\eta_{\text{НЭМИ}}} = A\tau_{\text{фильтр}}^2, \quad (4)$$

где η – вязкость жидкого стекла, изменяемая в процессе фильтрации через ПЗМ, Па·с; A – коэффициент интенсивности гелеобразования ЖС при его фильтрации через ПЗМ, с^{-2} ; $\tau_{\text{фильтр}}$ – продолжительность фильтрации, с.

Из (4) зависимость вязкости ЖС от времени при его фильтрации через лакированный наполнитель описывается выражением

$$\eta = \eta_{\text{НЭМИ}} (1 + A\tau_{\text{фильтр}}^2), \quad (5)$$

где $\eta_{\text{НЭМИ}}$ из (3) можно представить следующим образом:

$$\eta_{\text{НЭМИ}} = \eta_0 b^{\tau_{\text{обр.НЭМИ}}}. \quad (6)$$

Тогда

$$\int_0^{\tau_{\text{фильтр}}} \frac{d\tau}{\eta} = \int_0^{\tau_{\text{фильтр}}} \frac{d\tau}{\eta_{\text{НЭМИ}} (1 + A\tau^2)}. \quad (7)$$

Учитывая, что вязкость ЖС после обработки НЭМИ не зависит от продолжительности фильтрации, параметр $\eta_{\text{НЭМИ}}$ может быть вынесен из-под знака интеграла, а над подынтегральным выражением выполнены математические преобразования

$$\begin{aligned} \int_0^{\tau_{\text{фильтр}}} \frac{d\tau}{\eta_{\text{НЭМИ}} (1 + A\tau^2)} &= \\ &= \frac{1}{\eta_{\text{НЭМИ}} \sqrt{A}} \int_0^{\tau_{\text{фильтр}}} \frac{d(\sqrt{A}\tau)}{1^2 + (\sqrt{A}\tau)^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

После этого может быть осуществлено интегрирование выражения (7) следующим образом:

$$\int_0^{\tau_{\text{фильтр}}} \frac{d(\sqrt{A}\tau)}{1^2 + (\sqrt{A}\tau)^2} = \text{arctg}(\sqrt{A}\tau). \quad (9)$$

Таким образом, принимая во внимание выражения (7), (8) и (9), дифференциальное уравнение (2) имеет решение

$$h = \sqrt{\frac{2K\Delta P}{\eta_{\text{НЭМИ}} \sqrt{A}}} \cdot \text{arctg}(\sqrt{A}\tau_{\text{фильтр}}), \quad (10)$$

где ΔP – градиент давления, вызывающий фильтрацию, Па; K – коэффициент проницаемости уплотненного ПЗМ в оснастке, м².

Функция $\arctg(\sqrt{A}\tau)$ при расчетах по формуле (10) вычисляется в радианах. Значения коэффициента проницаемости K зависят, главным образом, от марки песка, применяемого для подготовки ПЗМ.

Подставив (6) в (10), получаем математическую модель кинетики фильтрации активированного НЭМИ связующего раствора через плакированный его отвердителем наполнитель в виде следующего выражения:

$$h = \sqrt{\frac{2K\Delta P}{\eta_0 b^{\tau_{\text{обр.НЭМИ}}} \sqrt{A}} \cdot \arctg(\sqrt{A}\tau_{\text{фильтр}})}. \quad (11)$$

Влияние НЭМИ на глубину капиллярной пропитки h в разработанной математической модели (11) учитывается параметрами: продолжительностью обработки НЭМИ пропитываемого раствора ($\tau_{\text{обр.НЭМИ}}$), а также коэффициентом ν , зависящим от удельной мощности излучения НЭМИ (P) и частоты импульсов (ν). Анализ модели (11) показывает, что с увеличением $\tau_{\text{обр.НЭМИ}}$ параметр h возрастает. Это согласуется с установленными общетеоретическими и экспериментальными сведениями о том, что повышение продолжительности обработки НЭМИ раствора ЖС вызывает эффект его «разжижения» и создает условия для роста скорости фильтрационных процессов. Увеличение мощности и частоты излучения НЭМИ снижает вязкость ЖС и, тем самым, способствует ускорению фильтрационных процессов в системе «активированный НЭМИ раствор ЖС-ПЗМ».

Влияние на параметр h процесса гелеобразования, сопровождающего фильтрацию ЖС через плакированный его отвердителем зернистый наполнитель, характеризуется коэффициентом A . Значения этого коэффициента зависят от массы гелеобразователя, приходящегося на единицу поверхности наполнителя (m_{Γ}), а также плотности пропитываемого раствора ЖС ($\rho_{\text{ЖС}}$) при постоянном его модуле ($M = 3,0$). Причем, чем больше указанные параметры, тем выше A и интенсивнее процесс гелеобразования при фильтрации ЖС через ПЗМ. При этом модель показывает, что увеличение значений коэффициента A , вызванное повышением m_{Γ} и $\rho_{\text{ЖС}}$, приводит к уменьшению величины h . Это верно отражает физическую природу рассматриваемого явления, поскольку в этом случае возрастает интенсивность гелеобразования пропитываемого раствора в порах ПЗМ, что приводит к уменьшению глубины капиллярной пропитки. При варьировании факторов расхождение расчетных и опытных значений параметров не превышает 5...8 %, что, в целом, свидетельствует об адекватности полученных теоретических зависимостей электроимпульсно-фильтрационного формообразования.

Разработанная и экспериментально подтвер-

жденная математическая модель кинетики фильтрации гелеобразующего связующего через ПЗМ позволяет рассчитывать для различных условий производства оптимальные технологические параметры и эффективно управлять процессами фильтрационного формообразования с активированным НЭМИ пропитываемым раствором.

Методика расчета технологических параметров фильтрационного формообразования с активацией пропитываемого раствора НЭМИ реализована в разработанной программе «FILTRAT». Она позволяет для каждого типоразмера стержней и форм рассчитать оптимальные значения остаточного воздушного давления в оснастке и прогнозировать изменения вязкости связующего при обработке НЭМИ и в процессе фильтрации, определяющие характер формообразования при соблюдении условия ламинарного потока жидкости в пористой среде. При этом наиболее эффективным является следующий способ изготовления керамических форм и отливок. Модельный блок, выполненный например из массы МВС-15 или Р-3 припаивается в центре металлического диска воронкой книзу. Диск снабжен штуцерами и вентилями, подсоединенными через трубопровод к нагнетательному бачку, подающему гелеобразующий связующий раствор под давлением. Сверху на блок устанавливается цилиндрическая опока и пропаявается для герметичности по контуру модельной массой. В опоку засыпается плакированный гелеобразователем наполнитель и герметично накрывается прозрачным материалом, например оргстеклом, подсоединенным к вакуумному насосу. Форму вакуумируют и осуществляют подачу предварительно обработанного НЭМИ связующего раствора в плакированный наполнитель под действием градиента давления. В процессе принудительной фильтрации происходит пропитка наполнителя и гелеобразование связующего с формированием прочности смеси. При этом после пропитки осуществляют продувку воздухом формы для получения ее капиллярно-пористой структуры. Опока с затвердевшей смесью (монолитная форма) удаляется с диска и проходит все стадии литья по выплавляемым моделям: сушку, вытопку модельной массы, прокатку и заливку жидким металлом с последующими выбивкой и обработкой.

Изготовление форм (стержней) по холодной оснастке методом пропитки связующим зернистого наполнителя, плакированного гелеобразователем, обеспечивает стабильность структурообразования вследствие равномерного распределения в смеси отвердителя. При этом, в отличие от «Шоу-процесса» удается добиться практически нулевой усадки за счет предварительного создания в оснастке жесткой скелетной структуры сухого наполнителя и последующего введения в него жидкого гелеобразующего связующего. В результате практически полностью устраняется трещинообразование форм (стержней).

Показатели технологии электроимпульсно-фильтрационного формообразования

Показатели	Вариант технологии	
	базовый	разработанный
1. Живучесть смеси, мин	25...30	Неограничена
2. Длительность отверждения смеси, с	15...30	600...900
3. Прочность керамических образцов, МПа: – после вытопки моделей; – в горячем состоянии	1,8...2,5 2,8...3,5	3,5...4,0 4,2...4,5
4. Способ удаления из отливок	Механический или выщелачивание	Высыпание
5. Масса отливок после удаления стержней, кг: «Конь с попоной» «Лось»	8,1 4,5	6,0 3,0
6. Преобладающая толщина стенки отливки, мм	4...5	2,5...3

Метод электроимпульсно-фильтрационного формообразования положен в основу технологии изготовления крупногабаритных стержней для чугуна художественного литья по выплавляемым моделям [3]. В этом случае представляется целесообразным ярусный подвод связующего в стержневой ящик. Поэтому используется следующая методика расчета фильтрационного формообразования. Задаваясь параметрами связующего раствора, его обработки НЭМИ, а также свойствами плакированного наполнителя и технологически приемлемыми значениями остаточного давления в оснастке и продолжительностью гелеобразования, определяют значения радиуса отвержденной части смеси. Указанный параметр является основным при проектировании оснастки для изготовления стержней. В частности, расстояние между отверстиями для пропитки не должно превышать рассчитанное значение радиуса отвержденной части смеси. Только в этом случае при ярусном подводе связующего раствора в оснастку с плакированным наполнителем может быть достигнуто перекрытие полусфер отвержденной части смеси. В результате обеспечивается точность воспроизведения стержнем сложной рабочей поверхности оснастки [3].

Указанные технологии являются логическим развитием «АлЗнаС-процесса» [4] и разрабатывались, как альтернатива «Шоу-процесса» с использованием выплавляемых моделей (базовый вариант). Влияние разработанных технологий на свой-

ства керамических форм, стержней и художественных отливок представлено в табл. 2.

Промышленные испытания проводились на широкой гамме кабинетных художественных отливок: «Конь с попоной», «Лось», «Медведь на задних лапах» и др. (более тридцати наименований с годовым объемом производства пять тонн отливок). С использованием модели и методик расчета определены оптимальные технологические параметры в зависимости от различных условий производства. Отмечено улучшение качества литой поверхности, снижение в 1,4...1,7 раза толщин стенок и массы крупногабаритных художественных отливок при сокращении более чем в 1,5 раза себестоимости их изготовления.

Литература

1. Знаменский, Л.Г. *Электроимпульсные нанотехнологии в литейных процессах: монография* / Л.Г. Знаменский, В.В. Крымский, Б.А. Кулаков. - Челябинск: Изд-во ЦНТИ, 2003. - 130 с.
2. *Макрокинетика процессов в пористых средах* / Ю. А. Чизмаджев, В.С. Маркин, Н.Р. Тарасевич и др. - М.: Наука, 1971. - 364 с.
3. Пат. Российская Федерация. *Способ изготовления керамических стержней по холодной оснастке в литье по выплавляемым моделям* / Л.Г. Знаменский. - №2229357; 2004, Бюл. №15.
4. Александров, В.М. «АлЗнаС-процесс» для изготовления стержней / В.М. Александров, Л.Г. Знаменский, А.А. Солодянкин // *Литейное производство*. - 1993. - № 1-С. 13-14.