

Таким образом, при облучении жидкой фазы НЭМИ существенно изменяются не только кристаллизационные параметры, физико-механические и эксплуатационные свойства [1–3], но и характер изменения растворимости олова в структурных составляющих оловянной бронзы и их количественное соотношение, а также габитус и дисперсность эвтектоида.

Наблюдаемые скачкообразные изменения кристаллизационных параметров, процесса структурообразования, физико-механических и эксплуатационных свойств бронзы и элементно-фазового состава α -твердого раствора и эвтектоида являются новым явлением, возникающим при облучении жидкой фазы НЭМИ определенной продолжительности.

Библиографический список

1. Влияние облучения жидкой фазы наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ) на кристаллизацию, структурообразование и физико-механические свойства меди и бронзы / Ри Э.Х., Ри Хосен, Бруй В.Н., Белых В.В. // Труды седьмого съезда литейщиков России. Новосибирск: Изд-во «Издательский дом «Историческое наследие Сибири», 2005. С. 278–283.
2. Облучение при плавке жидкой меди и бронзы наносекундными электромагнитными импульсами / Ри Э.Х., Дорофеев С.В., Крымский В.В., Ри Хосен, Кухаренко Е.Б. // *Металлургия машиностроения*. 2006. № 4. С. 13–17.
3. Свойства алюминия и силумина после облучения наносекундными электромагнитными импульсами / Ри Хосен, Ри Э.Х., Дорофеев С.В., Крымский В.В., Кухаренко Е.Б. // *Металлургия машиностроения*. 2006. № 4. С. 18–20.

УДК 621.74

И. Е. Илларионов, А. М. Столяров

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИЛ ФОРМОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМЕСЕЙ

1. Влияние пьезо- и трибоэлектрического эффектов на свойства смесей

Большое влияние на свойства формовочных смесей оказывает их основа – кварцевый песок. Химическая природа, количество и состав глинистой составляющей во многом определяют свойства формовочных песков и смесей. Этот вопрос получил значительное развитие в работах российских и зарубежных ученых. В работах П.П.Берга [1] отмечено, что зерно кварца несет на себе электрический заряд. Однако явление электризации зерен песка вследствие неизученности не находит практического применения в технологических процессах литейного производства.

Взаимодействие воды с зернами кварца, как и другими минералами, носит адсорбционный характер, вызванный наличием электрического силового поля на поверхности твердого тела.

Среди многочисленных факторов, влияющих на формирование прочности формовочных смесей (зерновой и минералогический состав песка, химический и минералогический состав глин, специальные добавки, степень перемешивания и т.д.), определенное значение имеют электрические свойства применяемого песка, которые характеризуются диэлектрической проницаемостью, удельным сопротивлением и диэлектрическими потерями [2, 3 и др.].

Применяемые кварцевые пески состоят из минерала кварца, отличительной особенностью которого является приобретение электрического заряда под действием механических напряжений. Сущность этого так называемого пьезоэлектрического эффекта состоит в том, что при механическом воздействии на кристалл кварца механическая энергия переходит в электрическую, в результате чего поверхности кварца приобретают электрические заряды (пьезоэлектрический эффект) [4].

В зависимости от направления усилий пьезоэлектрический эффект подразделяют на продольный и поперечный. В первом случае под действием усилия, направленного вдоль электрической оси, происходит вклинивание атома между атомами кислорода, а во втором – под действием усилия, направленного перпендикулярно электрической оси, происходит смещение атомов кремния и кислорода.

В результате указанных процессов на поверхности зерен кварца возникают электрические заряды. Согласно [5, 6 и др.] явления пьезоэлектрического эффекта для простых случаев могут быть описаны следующими уравнениями:

$$Q = dF; P = d\sigma; P = e\varepsilon,$$

где Q – величина электрического заряда; P – электрическая поляризация; F – механическая сила; σ –

упругое напряжение; ε – упругая деформация; e – пьезоэлектрическая константа; d – пьезоэлектрический модуль.

Из приведенных уравнений видно, что увеличение механической силы F приводит к возрастанию величины электрического заряда Q на поверхности твердой частицы. Однако это увеличение различно и зависит от значений пьезоэлектрического модуля d .

Очевидно, что применение наполнителя формовочных смесей с высокими значениями пьезоэлектрического модуля вызывает заметную электрическую поляризацию частиц даже при низких напряжениях и деформациях. Отсутствие цифровых значений d и ε для различных материалов лишает возможности анализа с рассматриваемой точки зрения. Вопрос осложняется тем, что значения d , как и ε , зависят от емкости [5], связанной с размерами и формой зерен песка, наличия глинистой составляющей и т.д.

Применяемые в литейном производстве формовочные пески подвергаются различным механическим воздействиям, например давлению катков при перемешивании в бегунах, что отражается на свойствах формовочных смесей. Однако явления пьезоэлектрического эффекта тесно переплетаются с другим – трибоэлектрическим эффектом [7]. Сущность трибоэлектрического эффекта заключается в том, что процессы сушки, транспортировки и перемешивания песка связаны с контактными явлениями и трениями минеральных частиц друг о друга, в результате чего последние приобретают электрические заряды – электризуются [7].

На величину трибоэлектрического эффекта оказывают влияние многие факторы, среди которых доминирующее значение имеют: химический состав, структура, удельное электрическое сопротивление, характер поверхности контактирующих или механически действующих друг на друга сред, температура, давление, влажность и характеристика внешнего электрического поля [8].

Изменение заряда песка происходит также и во время сушки. Величина его определяется формулой [8]

$$Q_t = \frac{r}{l^2} k T l_n \left(1 + \sqrt{\frac{2}{\pi m k T}} \cdot 2 r n_i e^2 t \right),$$

где Q_t – заряд частицы; r – радиус частицы; l – некоторый путь, прошедший носителем заряда после толчка в прежнем направлении; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; e – элементарный заряд; t – время пребывания частиц

при сушке; m – масса иона; n_i – число элементарный зарядов, полученных частицей вследствие диффузионной подвижности ионов за время t .

Увеличение размера частицы, температуры нагрева при сушке и продолжительности пребывания при высоких температурах согласно указанному выражению приводит к увеличению электрического заряда зерен песка. Очевидно, указанные изменения должны отражаться на свойствах формовочных смесей.

Изменение электрического заряда на поверхности зерен песка при перемешивании определяли по величине электрического сопротивления водных суспензий формовочных смесей, а также их осветленной части. Пробы водных суспензий отбирались одновременно с навесками для определения прочности смеси в зависимости от условий приготовления. В опытах применялись формовочная смесь состава (мас.ч.): Кичигинский песок марки 1К0315А – 100,0; Нижнеуфельская огнеупорная глина марки НУ-1 – 10,0 и вода – 5,0.

Смеси приготавливали по четырем режимам:

Режим А: перемешивание сухого песка и огнеупорной глины с поднятыми катками в течение 2 мин, после введения воды перемешивание с опущенными катками – 5 мин.

Режим Б: перемешивание сухого песка и огнеупорной глины с опущенными катками в течение 2 мин, после введения воды – 5 мин.

Режим В: перемешивание сухого песка с поднятыми катками в течение 3 мин, после введения огнеупорной глины с опущенными катками – 2 мин, после введения воды – 5 мин.

Режим Г: перемешивание сухого песка с опущенными катками – 2 мин, после введения огнеупорной глины – 2 мин, после введения воды – 5 мин.

Согласно принятой методике 600 г формовочной смеси перемешивались в течение 10 мин с 1000 мл дистиллированной воды на приборе для определения глинистой составляющей смеси. После 18 ч отстаивания осветленная часть раствора с помощью сифона сливалась в сосуд для измерения электросопротивления раствора, для уменьшения погрешностей измерения сосуд предварительно промывался 100 мл исследуемой осветленной части раствора. После замера электросопротивления осветленная часть сливалась в сосуд с отстоявшимся осадком раствора и перемешивалась в течение 5 мин. Затем полученная суспензия сливалась в сосуд для измерения электросопротивления (рис. 1).

Для избежания электролиза, влекущего за собой изменения концентрации раствора и поляризации электродов, измерение электросопротив-

ления производится в цепи переменного тока с частотой 400 Гц.

Результаты экспериментальных данных по замеру электросопротивления в суспензиях смесей и водородного показателя смесей приведены в **табл. 1**.

Видно, что условия приготовления формовочных смесей (**табл. 1**, А, Б, В, Г) оказывают заметное влияние на величину электросопротивления как осветленной части раствора, так и суспензии, что может происходить в результате изменения концентрации водородных ионов. Поэтому представляло значительный интерес исследование влияния условий перемешивания сухого песка в смеси на величину водородного показателя (рН). Измерение рН растворов проводилось на приборе ЛПУ-01.

Приведенные в **табл. 1** результаты измерений рН осветленной части раствора и суспензии отражают влияние электризации поверхности кварцевого песка на изменение концентрации водородных ионов.

Изменения электросопротивления, как и концентрации водородных ионов, являются лишь частью многочисленных факторов, отражающих влияние электризации на свойства формовочных смесей.

Предполагается, что установленные явления наблюдаются и при формировании свойств формовочных смесей, в результате чего изменяется строение двойных электрических слоев коллоидных частиц смеси, что, в свою очередь, приводит к изменению прочности формовочной смеси.

Однако влияние отмеченных эффектов на

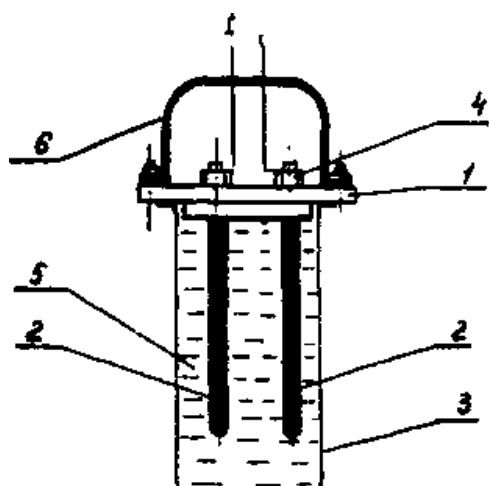


Рис. 1. Схема установки электродов для измерения электросопротивления растворов:
1 – держатель электродов; 2 – электроды;
3 – измерительный сосуд; 4 – клеммы электродов;
5 – испытуемый раствор; 6 – ручка держателя электродов

прочность и другие свойства формовочных смесей не находило количественной оценки. Влияние электризации песков на свойства ПГС проверялось в лабораторных условиях при перемешивании формовочной смеси указанного состава. В проводимых исследованиях изменялись условия и продолжительность предварительного перемешивания сухого песка в бегунах.

При этом продолжительность совместного перемешивания сухих составляющих смеси (песок, огнеупорная глина) была 2 мин, а после введения воды – 5 мин.

С некоторыми допущениями предполагается, что изменение свойств формовочной смеси заданного состава при перемешивании песка в бегунах с поднятыми катками при прочих равных условиях происходит преимущественно в результате явлений трибоэлектрического эффекта, а при перемешивании в бегунах с опущенными катками – в результате одновременного проявления пьезо- и трибоэлектрического эффектов, а также образования активных центров на поверхности песка в результате некоторого измельчения. Для увеличения точности измерений навеска смеси взвешивалась с точностью до 0,025 г, а высота смеси в гильзе устанавливалась постоянной с точностью $\pm 0,1$ мм с помощью специального переоборудованного и смонтированного на копре штангенциркуля.

Результаты экспериментальных данных указывают на сложный характер формирования свойств формовочных смесей в связи с явлением электризации поверхности зерен песка в процессе перемешивания.

Отмеченное изменение свойств смесей наблюдается как при перемешивании сухих составляющих смеси, так и при предварительном перемешивании одного песка.

Наименьшая прочность на сжатие в сыром состоянии – 0,031 МПа наблюдается при перемешивании сухих составляющих с поднятыми катками. Предварительное перемешивание сухого песка

Таблица 1

Изменение электросопротивления и водородного показателя смеси от режима перемешивания

Наименование измеряемой величины	Перемешивание по режиму			
	А	Б	В	Г
Электросопротивление осветленной части раствора	29,0	34,0	52,0	74,5
Электросопротивление суспензии	50,5	56,0	65,5	69,0
рН осветленной части раствора	8,63	8,86	8,95	9,07
рН суспензии	9,15	9,31	9,65	9,37

в течение 2 мин приводит к росту прочности до 0,036 МПа, что объясняется влиянием трибоэлектрического эффекта. Дальнейшее увеличение прочности на сжатие в сыром состоянии происходит при перемешивании с опущенными катками в результате одновременного проявления пьезо- и трибоэлектрических эффектов. Прочность смеси при перемешивании сухих составляющих равнялась 0,033 МПа, а с предварительным перемешиванием песка в течение 3 мин – 0,042 МПа.

Естественно предположить, что повышение прочности смеси связано с возникновением электрического заряда на поверхности кварцевых зерен, в результате чего усиливается взаимодействие между минеральными частицами смеси.

С указанным предположением согласуется обнаруженное в исследовании снижение прочности смеси на сжатие в сыром состоянии с увеличением влажности песка при одной и той же влажности смеси. Экспериментально установлено, что повышение влажности песка до 5% (без изменения влажности смеси) приводит к снижению прочности при перемешивании с опущенными катками с 0,033 до 0,029 МПа (точность определения $\pm 0,001$ МПа). Поэтому предварительная сушка песка является одним из факторов повышения прочности смесей в сыром состоянии.

Снижение прочности при использовании влажных песков объясняется влиянием адсорбированных слоев влаги на ослабление процессов электризации поверхности зерен при перемешивании в связи с ростом электропроводности [8].

Влияние электризации зерен кварцевого песка на прочность формовочной смеси выявляется при оценке эффективности предварительного перемешивания песка, которая определялась по прочностному эффекту:

$$\eta = \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\sigma_0} \cdot 100\%,$$

где η – коэффициент эффективности; σ_1 – прочность смеси на сжатие с предварительным пере-

мешиванием песка; σ_0 – прочность смеси без предварительного перемешивания песка.

Эффективность предварительного перемешивания песка с опущенными катками возрастает с увеличением времени перемешивания до оптимальной величины ($\eta=26\%$). Дальнейшее увеличение продолжительности перемешивания незначительно отражается на прочностных свойствах смеси. Для исследуемого случая за указанное время довольно полно проявляется электризация зерен песка, в результате чего устанавливается определенная электрическая характеристика поверхностей зерен кварцевого песка и дальнейшее перемешивание не приводит к росту эффективности. Установленный факт увеличения прочности смесей свидетельствует о возможности практического использования эффекта электризации поверхности зерен песка в технологических процессах.

На основе выполненных исследований были проведены опытно-промышленные испытания стержневых смесей в литейном цехе Челябинского металлургического завода, результаты которых приведены в **табл. 2**.

Предварительное перемешивание сухого песка в течение 3-х мин приводит к повышению прочности смеси на 15–20%, что позволяет сократить расход огнеупорной глины на 10–15% при сохранении и сходной прочности смеси. Вполне вероятно, что изменение состава формовочных смесей, добавление к пескам различных "активирующих" веществ, изменяющих их электрические характеристики, а также использование так называемых безреагентных способов обработки (например, магнитной) дадут возможность менять эффективность обработки в широких пределах, и это экономически выгодно использовать в технологических процессах литейного производства.

Приведенные результаты исследований показывают возможность практического использования явлений пьезоэлектрического и трибоэлектрического эффектов на различных стадиях технологического процесса приготовления формовочных песков и смесей.

Таблица 2

Зависимость свойств песчано-глинистых смесей от режима приготовления

Состав смеси, мас.ч.				Физико-механические свойства смеси					
				без предварительного перемешивания сухого песка			с предварительным перемешиванием сухого песка		
Кичигинский песок марки КОЗ 15	ЛСТ $\gamma=1270-1300$ кг/м ³	Бускульская глина	Древесные опилки	Прочность на сжатие в сыром состоянии, МПа	Влажность, %	Газопроницаемость, ед.	Прочность на сжатие в сыром состоянии, МПа	Влажность, %	Газопроницаемость, ед.
100	1,0	16	–	0,04–0,06	6,0–0,7	≥ 80	0,05–0,07	6,0–7,0	≥ 80
100	1,0	20	2	0,055–0,065	6,5–7,5	≥ 80	0,065–0,075	6,5–7,5	≥ 100
100	1,0	20	4	0,055–0,065	6,0–7,0	≥ 100	0,065–0,08	6,5–7,0	≥ 100

2. Отверждение стержней под воздействием токов высокой частоты

Формовочные и стержневые смеси представляют собой гетерогенную систему, состоящую из жидкой, твердой и газообразной фаз.

При перемешивании составляющих и смеси в электрическом поле они заряжаются по-разному. В общем случае частицы гетерогенного материала различаются электропроводностью и другими параметрами, и воздействие электрического поля отражается на свойства смеси неравнозначно. Так, наблюдается макроструктурная поляризация, обусловленная тем, что каждая частица, имеющая разноименные заряды, может быть употреблена диполем, которая ведет себя, как громоздкая поляризационная молекула.

Формовочные и стержневые смеси относятся к диэлектрикам. В стержне, помещенном между двумя параллельными электродами – металлическими (медными) пластинами 4 (рис. 2), присоединенными к высокочастотному генератору 2, возникает высокочастотное переменное поле. Это вызывает молекулярное движение и способ-

ствует выделению тепла за счет межмолекулярного трения, что приводит к повышению температуры стержня и ускорению процесса отверждения до нескольких мин. При этом обеспечивается $U=20\text{ В}$, $f_j=13,56\text{ МГц}$.

В исследованиях применялась смесь следующего состава (мас.ч.): кварцевый песок марки Об1К02А – 100, огнеупорная глина марки НУ-1 – 1,0, АХФС от 2 до 6, порошкообразный отвердитель – алюминиевая пудра марки ПАП-1 в количестве от 0,1 до 3,0. Сухие составляющие с песком перемешивали в течение 2 мин в бегунах модели 018М, со связующим АХФС – 2 мин. Стандартные цилиндрические образцы после выдержки их на воздухе в течение 10 мин устанавливали на нижнюю обкладку рабочего конденсатора 4 (см. рис. 2). С помощью регулировочного винта 14 приводили в соприкосновение верхнюю обкладку рабочего конденсатора 4 с торцевой поверхностью цилиндрического образца 11 и подавали напряжение 20 В. Видно, что с повышением содержания АХФС при диэлектрическом нагреве наблюдается рост прочностных свойств. При этом существен-

ное влияние оказывает применение добавки – алюминиевой пудры ПАП-1 (рис. 3). С увеличением содержания в смеси АХФС наблюдается одновременное повышение сопротивления R смеси и прочности на сжатие.

При содержании в смеси 2% АХФС увеличение расхода отвердителя алюминиевой пудры ПАП-1 от 0,1 до 0,5% приводит к незначительному изменению $\sigma_{сж}$ до 30 мин прогрева стержня. Дальнейшее повышение продолжительности выдержки способствует росту $\sigma_{сж}$ до 1,3 МПа (при 60 мин). При увеличении соотношения $K = Ж/Т = \text{связующее/отвердитель}$ наблюдается ускорение процесса в 4–10 раз отверждения и достижение оптимальных свойств при более коротком цикле диэлектрического нагрева. Отмечается существенное снижение прочности смеси на сжатие при увеличении расхода АХФС от 3 до 6% в первые 30 мин отверждения. Однако дальнейшая их выдержка, особенно в период между 30 и 60 мин прогрева, приводит к резкому росту $\sigma_{сж}$. Увеличение расхода алюминиевой пудры, т.е. при сниже-

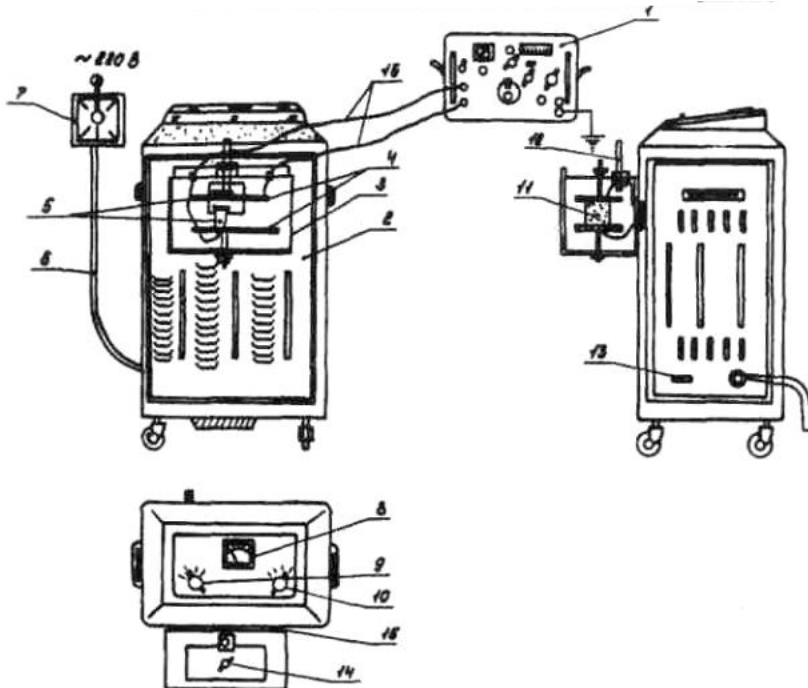


Рис. 2. Схема установки ТВЧ мощностью 13,56 МГц для исследования процесса отверждения стержней:

- 1 – мост переменного тока; 2 – генератор ТВЧ; 3 – камера рабочего конденсатора; 4 – обкладки (медные пластины) рабочего конденсатора; 5 – медные шины многослойные; 6 – кабельный ввод; 7 – рубильник; 8 – вольтметр Э-421; 9 – ступенчатый переключатель; 10 – регулятор тока; 11 – испытуемый образец (стержень); 12 – шинный разъединитель; 13 – предохранительная ячейка; 14 – регулировочный винт; 15 – изоляторы

нии коэффициента $K = \mathcal{J}/T$, наблюдается достижение оптимума $\sigma_{сж}$ при более коротком прогреве и снижении $\sigma_{сж}$ при дальнейшем прогреве, что связано с повышением осыпаемости смеси. Увеличение цикла отверждения при повышении расхода связующего АХФ связано с ростом влажности смеси. Определение влажности проводили по ГОСТ 23409.5-78. Достижение оптимального значения $\sigma_{сж}$ зависит от содержания алюминиевой пудры и величины подводимого напряжения к обкладке рабочего конденсатора.

При тепловой сушке достижение оптимальной прочности стержней из смеси с 5% АХФС происходит лишь через 120–150 мин при 483 К.

Во время сушки стержней ТВЧ проводили замер температуры прогрева с помощью термопары и определение влажности. Интенсивный рост температуры и снижение влажности стержня происходит в первые 10 мин, а затем температура стержня практически остается постоянной с тенденцией к снижению при длительной выдержке. Это характеризует завершение процесса отверждения за счет протекания физико-химических реакций между связующим, отвердителем и наполнителем и уменьшение диэлектрических потерь. Для каждого состава смеси существует оптимальное время диэлектрического нагрева. Так, время достижения высоких прочностных свойств составляет 20 мин. С увеличением напряжения на обкладках конденсатора (см. рис. 3) до 40 В повышается скорость отверждения стержней из фосфатных смесей. Однако при сушке песчано-глинистых смесей это может привести к взрывообразному удалению влаги из них.

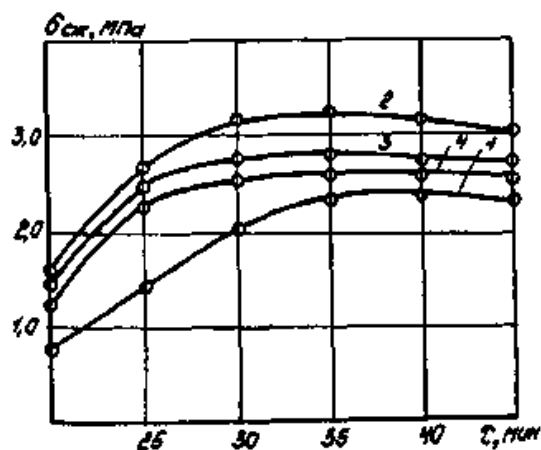


Рис. 3. Зависимость прочности ХТС на сжатие с 3% АХФС, отверждаемой алюминиевой пудрой ПАП-1, от продолжительности диэлектрического нагрева: 1 – 0,2% ПАП-1; 2 – 0,4% ПАП-1; 3 – 0,6% ПАП-1; 4 – 0,8% ПАП-1

Таким образом, вполне очевидно, что способ отверждения стержней в электрическом поле высокой частоты 13,56 МГц позволяет резко сократить цикл отверждения стержней из фосфатных смесей по сравнению с существующим тепловым способом сушки и повысить производительность труда.

3. Формирование свойств смесей под действием электрических сил

Совершенствование технологических процессов производства отливок требует изыскание новых способов улучшения свойств формовочных материалов и смесей.

В работах [9, 10 и др.] установлен факт повышения уплотняемости, текучести, прочности и изменения других свойств смесей под действием электрических и магнитных сил. Однако теоретические аспекты этих вопросов остаются еще во многом противоречивыми и малоизученными. Это можно объяснить значительными трудностями, с которыми сталкиваются исследователи при изучении отмеченных вопросов. Вероятно, поэтому до настоящего времени удовлетворительно не объяснены изменения, которые происходят под действием электрических сил даже в относительно простых системах, не говоря уже о такой сложной композиции, какой является формовочная смесь. Отсюда вытекает необходимость высказать, опираясь на имеющийся практический и теоретический материал, некоторые гипотезы о механизме формирования прочности и изменения других свойств формовочных смесей под действием электрических и магнитных сил.

Исследование влияния электрической энергии на прочность песчано-глинистой смеси проводилось на стандартных цилиндрических образцах, изготовленных из ПГС с 8 мас.ч. огнеупорной глины марки НУ-1.

В работе изучалось действие на образец формовочной смеси переменного, постоянного и импульсного тока с помощью установки, приведенной на рис. 4.

Величина переменного тока регулировалась с помощью автотрансформатора ЛАТР-1. Постоянный ток получали от выпрямителя, напряжение на выходе которого изменяется от 0 до 400 В. Импульсный ток поступал от конденсатора емкостью $1,2 \cdot 10^{-6}$ Ф, заряженного до напряжения $7-12 \cdot 10^3$ В.

Во всех случаях ток пропускали от одного основания цилиндрического образца к другому. Сопrotивление образца смеси составляло около 2000 Ом. После пропускания тока определялась прочность образца смеси на сжатие в сыром состоянии.

Исследования показали, что действие переменного тока на образец не приводит к заметному изменению прочности смеси. Пропускание постоянного и импульсного тока сопровождается повышением прочности, величина которой зависит от количества энергии (W), внесенной в образец током. При обработке смеси импульсным током энергия одного разряда составляла 30 Дж.

Величина прироста прочности смеси находится в зависимости от величины энергии, внесенной в смесь при обработке как постоянным, так и импульсным током. Поэтому нами принято связывать прочность образца смеси с энергией тока или в общем виде, величину упрочнения (%):

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} = \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\sigma_0} \cdot 100\%,$$

равной отношению разности прочности образцов смеси до σ_0 и после обработки σ_1 к исходной прочности σ_0 смеси с объемной плотностью тока в образце.

Максимальная величина упрочнения составляет 27% (для данного состава смеси). Одной и той же степени упрочнения смеси при обработке ее постоянным и импульсным током соответствуют идентичные значения плотности электрической энергии при любом режиме обработки. Поэтому упрочнение можно выражать в функции объемной плотности электрической энергии, затраченной на обработку. Предлагаемая форма выражения изменения свойств смеси позволяет сравнить эффективность и оценить целесообразность различных методов электрообработки.

Упрочнение связано с повышением уплотняемости смеси и возрастает с увеличением плотности электрической энергии в образце. Прочность образца смеси (с содержанием 8% огнеупорной глины НУ-1) на сжатие в сыром состоянии при электрообработке повышается с 0,029 до 0,037 МПа. Упрочнение ($\Delta\sigma W_{сж}$) составляет

$$\Delta\sigma W_{сж} = 0,008 \text{ МПа} = 8000 \text{ Н/м}^2.$$

Приращение прочности $\Delta\sigma W_{сж}$, т.е. увеличение разрушающего усилия ΔF , рассчитанное на единицу поверхности (S), равно увеличению потенциальной энергии взаимодействия (ΔW) частиц песка (энергия связи), рассчитанной на единицу объема (V), т.е.

$$\Delta\sigma W_{сж} = \frac{\Delta F}{S} = \frac{\Delta W}{V} = 80000 \text{ Н/м}^2 = 8000 \text{ Дж/м}^3.$$

Известна совершенно аналогичная зависимость упрочнения формовочной смеси от времени сухого перемешивания кварцевого песка в бегунах, причем максимальная величина упрочнения также составляла 25–30%. В этом случае упрочнение обусловлено совместным действием пьезо- и трибоэффекта, по-видимому, аналогичным электрообработке током.

В работе [9] достигнуто улучшение прочности, уплотняемости, текучести и других свойств формовочной смеси в результате магнитной обработки воды и глинистой суспензии в пределах 25–35%.

Магнитную обработку воды и глинистой суспензии можно рассматривать как один из методов электрообработки, так как в воде и суспензии, протекающих в магнитном поле, возникают индукционные токи.

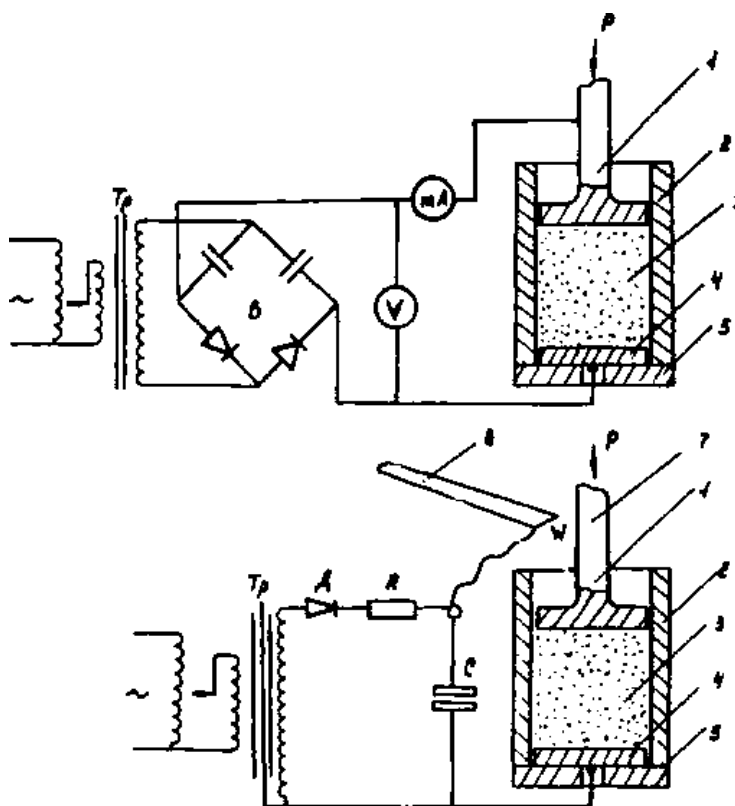


Рис. 4. Схема установки для уплотнения образца под воздействием переменного, постоянного и импульсного тока: 1 – уплотняющий электрод; 2 – изолирующий стакан; 3 – формовочная смесь; 4 – нижний электрод; 5 – изолирующее основание; 6 – изолирующая ручка; 7 – искровой разряд; Тр_р – повышающий трансформатор; Д – диод Д-1008; R – сопротивление 0,5 МОм; С – конденсатор 1.2·10⁻⁶ Ф; В – выпрямитель

Таким образом, при самых разных методах электрообработки максимальный эффект упрочнения практически оказался одинаковым. Это обусловлено тем, что механизм упрочнения и изменения уплотняемости, текучести и других свойств под действием электрических сил в рассматриваемых случаях один и тот же.

Поэтому можно считать целесообразным упрочнение и изменение других технологических свойств смеси при ее электрообработке выражать в функции объемной плотности электрической энергии, затраченной на обработку. Предлагаемая форма выражения зависимости свойств смеси от энергии обработки позволит сравнивать эффективность и оценивать целесообразность различных методов электрообработки смеси.

По данным [11 и др.] на поверхности твердых частиц, в частности кварца и глины, существует двойной электрический слой, образованный ионами водорода, гидроксильными группами и др. На поверхности песка и глины происходит спонтанная, униполярная ориентация диполей и ионов жидкости, которая образует диффузный слой ионов, способных перемещаться под действием электрических сил. Можно предположить, что приложенная к образцу смеси разность потенциалов способствует деформации двойного электрического слоя и поляризации частиц, составляющих смесь. При этом диполи жидкости располагаются не перпендикулярно поверхности, а приобретают преимущественную ориентацию по отношению к поверхности минеральных частиц (песка и глины). Диффузный слой ионов, окружающий частицы, также поляризуется, но в обратном направлении, уменьшая их общий дипольный момент. Деформация двойного электрического слоя приводит к появлению сил, способствующих усилению сцепления между частицами и действующих на расстоянии 1000 и более А [12].

Для выяснения роли двойного электрического слоя (д.э.с.) в механизме упрочнения смеси необходимо сравнить энергию, внесенную током с энергией д.э.с. всех частиц необработанной смеси.

При среднем диаметре частиц $d_{cp} = 0,315$ мм число зерен в одном кубическом сантиметре смеси составит примерно $n = 3 \cdot 10^4$. Поверхность одного зерна $s = 3 \cdot 10^{-3}$ см², а общая поверхность зерен в 1 см³ примерно составит 100 см². Если принять средний диаметр глинистых частиц за 2 мкм ($2 \cdot 10^{-4}$ см), то при 8% связующего поверхность частиц глины в 1 см³ смеси составит примерно 300 см², а общая поверхность д.э.с. в 1 см³ смеси будет ориентировочно равна 400 см². Энергию д.э.с. можно подсчитать как энергию заряженного конденсатора. Толщина [9] двойно-

го электрического слоя составляет $x = 10^{-6}$ см, поверхностная плотность зарядов – $\delta = 4 \cdot 10^{-7}$ К/см². Энергия поля конденсатора с площадью пластин $s = 400$ см² и расстоянием $x = 10^{-6}$ см равна:

$$W = \frac{\delta^2}{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \cdot s \cdot x \approx 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ Дж/см}^3,$$

где $\varepsilon = 80$, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; δ – поверхностная плотность электрических зарядов; ε , ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды.

Эта энергия почти в 2000 раз меньше той, которая остается в 1 см³ смеси после пропуска тока в виде потенциальной энергии взаимодействия частиц (энергия связи), приводящей к упрочнению смеси. Следует отметить, что в д.э.с. при обычных условиях ориентирована только 1/25... 1/30 часть всех имеющихся диполей. Следовательно, под действием электрических сил средняя плотность зарядов и энергия д.э.с. может увеличиваться в 25–30 раз, а в приконтактном слое между частицами, там где существует наибольшая плотность тока и напряженность электрического поля, плотность зарядов может достигать и большей величины – до $\sim 0,01$ Дж/см³. Она в зоне, по которой происходит разрушение образца, приводит к увеличению энергии д.э.с. в несколько сотен раз. Эта величина сравнима с количеством энергии, приводящей к упрочнению смеси.

При 5% связующего (воды) средняя толщина пленки на поверхности кварцевого зерна примерно равна $x \approx 5 \cdot 10^{-4}$ см. Можно считать, что это и будет среднее расстояние между взаимодействующими поверхностями зерен песка. Один контакт занимает 1,5–2% поверхности зерна, а так как зерно песка находится в контакте с несколькими другими, то примем, что общая площадь контактов составит $\sim 10\%$ поверхности зерен песка. То же самое относится и к частицам огнеупорной глины. Это составит 40 см² приконтактных поверхностей в 1 см³ формовочной смеси (s).

При разрушении образца образуется определенная поверхность скола под определенным углом к основанию образца. Можно считать, что на каждый см³ образца приходится 1,0–1,5 см³ скола. Так как разрушение образца происходит по приконтактному слою каждой частицы смеси, то истинная поверхность скола (S_0) составит 0,1–0,15 см² на 1 см³ смеси. В случае, когда смесь упрочнена обработкой током, на разрушение 0,10–0,15 см² приконтактных слоев частиц затрачивается дополнительно $8 \cdot 10^{-3}$ Дж энергии. Следовательно, энергия связи 1 см³ образца смеси равна:

$$W_c = \Delta\sigma \frac{s}{s_0} = \frac{8 \cdot 10^{-3} \cdot 40}{0,1} = 3,2 \text{ Дж/см}^3.$$

Эта величина сравнима с величиной энергии тока, внесенной в смесь при ее обработке (энергии активации), равной 8 Дж/см^3 . Энергия связи (W_c), приводящая к упрочнению формовочной смеси, равна разности энергии упрочнения ($W_{упр}$) и энергии активации ($W_{акт}$):

$$W_c = W_{упр} - W_{акт}.$$

Отсюда энергия упрочнения

$$W_{упр} = W_{акт} + W_c = 11,2 \text{ Дж/см}^3.$$

При обработке формовочной смеси переменным током движение ионов также существует, однако, за каждый полупериод тока смещение происходит в противоположную сторону. Поэтому в этом случае движение ионов в при контактной области зерен не усиливается, хотя напряженность поля может быть достаточна для активации водородных ионов и деформации д.э.с. Ионы водорода не могут сконцентрироваться в указанной области и обеспечить стабилизацию упрочнения смеси. Известно, что водородные связи разрушаются при нагревании. Вероятно, поэтому при длительной электрообработке или при большей мощности тока, т.е. повышенной плотности энергии, наблюдается нагрев смеси и снижение ее прочности. Предварительное смачивание песка перед электрообработкой не дает эффекта повышения прочности ни при перемешивании, ни при обработке током [10], вероятно, потому, что поле, образующееся в проводящей пленке связующего, окружающей зерно песка, получается слишком слабым, чтобы стимулировать образование водородных связей и деформацию двойного электрического слоя.

Как известно [9, 10 и др.], упрочненное состояние смеси сохраняется и после снятия внешнего электрического поля, следовательно, объяснить упрочнение только деформацией д.э.с. неправильно. Необходимо считать, что процесс упрочнения смеси является многофакторным, и, следовательно, нужно учитывать и другие виды связи, образующиеся под действием электрических сил.

Полагаю, что с одним из таких механизмов может быть образование водородных связей, т.е. объединение разных ионов ионами водорода. Прямым доказательством этого может служить изменение удельного сопротивления (ρ) и водородного показателя (pH) суспензии формовочной смеси и ее осветленной части при предварительном сухом перемешивании песка в бегунах (см. табл. 1).

Из табл. 1 видно, что при переходе от режима перемешивания А к режиму Г удельное сопротивление осветленной части возрастает в 2,6 раза, а концентрация водородных ионов уменьшается в 2,7 раза. Такое изменение ρ и pH возможно лишь тогда, когда электропроводность обусловлена, в основном, ионами водорода, обладающими наибольшей подвижностью. В этом случае

$$\rho = \frac{1}{n \cdot e \cdot k},$$

где n – концентрация водородных ионов; k – их подвижность; e – элементарный заряд.

Эксперименты показали, что в результате электрообработки происходит обеднение ионами водорода жидкой части суспензии и связывание этих ионов в д.э.с. минеральных частиц.

Можно предположить, что усиление и стабилизация д.э.с. частиц формовочной смеси во всех случаях происходит за счет образования водородных связей. Причем образование этих связей должно происходить не на всей поверхности частицы, а в основном в приконтактной зоне д.э.с. Так, в наших опытах за промежуток времени, равный постоянной разряда $\tau = R \cdot c = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ с}$, где R – сопротивление образца; c – емкость конденсатора при средней напряженности электрического поля в образце $E \approx 7 \cdot 10^4 \text{ В/м}$ и подвижности (k) водородных ионов $k = 3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, ионы водорода могли сместиться на расстояние $l = k \cdot E \cdot \tau = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$. За 30 разрядов, необходимых для максимального упрочнения образца, ионы водорода могут сместиться на величину уплотнения, тем самым образуя в местах контакта между частицами водородные связи.

Аналогичные изменения водородного показателя, суспензионного эффекта (ΔpH) и электросопротивления суспензий формовочных смесей обнаружены в случае применения воды и глинистой суспензии, прошедших предварительную магнитную обработку [9].

Уменьшение концентрации водородных ионов подтверждается также уменьшением интенсивности и сужением полос поглощения инфракрасных спектров воды и глинистой суспензии плотностью $1,25 \text{ г/см}^3$, прошедших магнитную обработку [9].

Таким образом, вполне очевидно, что упрочнение формовочных и стержневых смесей на водосодержащих связующих материалах и различных видах электрообработки происходит за счет образования водородных связей в двойном электрическом слое минеральных частиц.

Библиографический список

1. Берг П.П. Формовочные материалы. М.: Машгиз, 1963. 408 с.
2. Использование трибо- и пьезоэлектрического эффектов в приготовлении смесей / Васин Ю.П., Бортников М.М., Илларионов И.Е. и др. // Литейное пр-во. 1979. № 8. С. 25–26.
3. Пархоменко Э.И. Электрические свойства горных пород. М.: Наука, 1965.
4. Гудков А.С. и др. Основы поисков и разведки месторождений пьезооптических минералов. М.: Гостехиздат, 1960.
5. Волярович М.П., Соболев Г.А. Пьезоэлектрический метод геодезической разведки кварцевых и пегматитовых жил. М.: Наука, 1960.
6. Пархоменко Э.И. Явления электризации в горных породах. М.: Наука, 1968.
7. Олофинский Н.Ф. О применении электрических и других, связанных с ними, сухих методов обогащения в районах с ограниченными водными ресурсами // Теория и практика сепарации в электрическом и магнитном полях. М.: Наука, 1968. С. 20–45.
8. Машин А.Р. Электронно-струйная технология бетона и сборных железобетонных изделий. Саратов: Приволж. кн. изд-во, 1968. 288 с.
9. Илларионов И.Е. Исследование уплотняемости и текучести песчано-глинистых формовочных смесей при высоком давлении прессования: Дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 1973. 273 с.
10. К вопросу о влиянии постоянного тока на физико-механические свойства формовочных смесей / Васин Ю.П., Пашнин М.И., Илларионов И.Е. и др. // Прогрессивные технологические процессы в литейном производстве. Хабаровск, 1972. С. 44–46.
11. Толстой Н.А. и др. Жесткий электрический дипольный момент коллоидных частиц // Исследования в области поверхностных сил. М.: Наука, 1967. С. 56–78.
12. Дерягин Б.В., Кротова Н.А. Адгезия. М.; Л.: Изд-во. АН СССР, 1949. 244 с.

УДК 621.74:669.13.25.046(043)

В. М. Колокольников, Е. В. Петроченко, Б. В. Воронков

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ БЕЛЫХ ЧУГУНОВ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

Перспективными инструментальными и конструкционными материалами, в которых сочетаются повышенные прочность, пластичность, износостойкость, жаропрочность, жаростойкость и др., являются литые композиции из мягкой матрицы и упрочняющей фазы. Значительную группу литых композитов составляют комплексно-легированные белые чугуны с инвертированной структурой и высокотвердыми карбидами, вызывающими композиционное и дисперсионное упрочнение сплава. Свойства комплексно-легированных чугунов зависят от характера карбидной фазы и металлической основы (матрицы). Требования к структуре чугуна определяются условиями эксплуатации конкретных изделий. Металлическая матрица должна обладать достаточной прочностью, чтобы не разрушаться при приложении нагрузок при нормальных и повышенных температурах, и вязкостью, чтобы препятствовать выкрашиванию карбидов. Эвтектическая структура должна иметь композиционный характер.

Были разработаны белые чугуны, легированные комплексами V–Cu–Ti–B, V–Cr, V–Cr–Mo, Cr–Mn–Ni–Ti, Cr–Mn–Ni–Al, Cr–Mn–Ni–Nb, с ин-

вертированной микроструктурой и значительным композиционным упрочнением. Исследована структура и свойства этих чугунов в зависимости от химического состава и кинетических условий кристаллизации.

Структуру, фазовый состав чугунов и оксидных слоев исследовали с помощью металлографического, рентгенографического и электронографического методов.

Количественный металлографический анализ, автоматизированную обработку результатов измерения микротвердости проводили на анализаторе изображений Thixomet.

Межфазное распределение легирующих элементов определяли с помощью сканирующего электронного микроскопа с рентгеновским микроанализатором LEO 430 pi.

Химический состав оксидных и подоксидных слоев исследовали на спектрометре тлеющего разряда.

Окалиностойкость образца оценивали весовым методом по увеличению массы образца (г/м^2). Ростоустойчивость оценивали по изменению длины (%).