



Дмитриев Э. А., Свиридов А. В.

E. A. Dmitriev, A. V. Sviridov

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ФОРМОВОЧНЫХ СМЕСЕЙ СО СВЯЗУЮЩИМ НА ОСНОВЕ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЛЕЙ

PROPERTY RESEARCH OF MOLDING COMPOUNDS WITH BINDERS BASED ON INORGANIC SALTS

Дмитриев Эдуард Анатольевич – доктор технических наук, профессор, ректор Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: rector@knastu.ru.

Mr. Eduard A. Dmitriev – Doctor of Technical Science, Professor, Rector of Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: rector@knastu.ru.

Свиридов Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение и металлургия» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mim@knastu.ru.

Mr. Andrei V. Sviridov – PhD in Engineering, Associate professor, Mechanical Engineering and Metallurgy Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mim@knastu.ru.

Аннотация. В статье изложены основные направления развития и совершенствования технологических методов изготовления формовочных смесей со связующими на основе неорганических солей. Приводятся результаты исследований физико-механических свойств форм с глубоким анализом возможных причин возникновения дефектов. Описано влияние порообразующих веществ на свойства литейных форм и образование брака на отливках.

Summary. The paper sets out the main directions of development and improvement of technological methods of manufacturing molding compounds with binders based on inorganic salts. The authors present results of studies of physical and mechanical properties of the forms with a deep analysis of the possible causes of defects. The article describes the effect of pore-forming materials on the properties of molds as well as casting defects.

Ключевые слова: неорганические солевые связующие, литейная форма, отливка, порообразующие материалы.

Key words: binders based on inorganic salts, molds, casting, pore-forming materials.

УДК 621.74.045

Анализ литературных данных показывает, что одним из наиболее значимых свойств литейных формовочных смесей (ЛФС) является прочность, управление которой позволяет получать смеси, приближающиеся по своим свойствам к «идеальным» смесям, т.е. обладающим необходимой прочностью на стадии заливки жидким металлом и минимальной прочностью на стадии выбивки отливки. В настоящее время, наряду с постоянно повышающимися требованиями по качеству, не менее важное значение приобретают требования по экологичности и ресурсосбережению.

Анализ используемых в современном литейном производстве исходных формовочных материалов и смесей показал, что в современном литейном производстве широкое распространение получили ЛФС с применением в качестве связующих синтетических смол. Однако в связи с значительным повышением требований к экологии литейного производства интерес к разработке ЛФС с неорганическими связующими вновь повышается. Неорганические связующие характеризуются относительно низкой стоимостью, доступностью сырьевых материалов в промышленном объеме и высокой экологической безопасностью.

Согласно материалам, представленным на последних международных выставках по литейному производству, за рубежом активно ведутся разработки и внедрение в производство неорганических связующих и смесей, способных конкурировать по свойствам с синтетическими связующими. Среди таких материалов группа связующих Cast – Clean (основа – жидкое стекло с добавлением различных добавок, значительно повышающих свойства жидкого стекла), группа солевых связующих Cordis (основа матрицы связующего – комбинация модифицированных фосфатов, силикатов, боратов и др.).

Были выявлены и сформулированы критерии, которым должны отвечать полимеры, вводимые в качестве модифицирующих добавок в состав жидкостекольных смесей (ЖС). К числу основных критериев относятся следующие: низкая стоимость, прочность пленки связующего, термостойкость. В наибольшей степени указанным выше критериям отвечают натрий-карбоксиметилцеллюлоза (Н-КМЦ), поливиниловый спирт (ПВС) и полистирол (ПС). Эти полимеры и были выбраны в качестве объектов исследования. В ходе проведения исследований было выявлено, что к факторам, определяющим конечные свойства ЛФС и форм, изготовленных на их основе, относятся количество и способ введения полимерной добавки (ПД) в ЖС, а также способ отверждения модифицированной полимерными добавками ЖС. В качестве контролируемых конечных свойств ЛФС, определяющих ее прочность и выбиваемость, были выбраны пределы прочности на разрыв отвержденных образцов и образцов, предварительно прогретых до температуры 700 °С. Для проведения комплексного анализа влияния ПД на свойства ЖС их сравнивали с аналогичными свойствами ЖС без ПД.

Количество ПД, вводимой в ЖС, регулировалось ее концентрацией в соответствующем растворе (% по массе) и количеством раствора, вводимого в ЖС (% по массе). Отверждение готовой ЛФС осуществляли по двум технологическим вариантам: отверждением по СО₂-процессу и тепловой сушкой при $T = 200$ °С. Введение ПД в состав ЖС осуществлялось двумя способами: непосредственным введением раствора ПД в сырую ЖС и с помощью предварительно плакированного ПД огнеупорного наполнителя ЖС.

При исследованиях смешивания водного раствора Н-КМЦ с жидкостекольным связующим Н-КМЦ выпадает в осадок, что приводит к образованию суспензии. При этом с увеличением доли 30%-ного раствора Н-КМЦ в жидком стекле вязкость всей смеси падает (см. рис. 1). Падение вязкости при смешивании Н-КМЦ с жидким стеклом вызвано тем, что Н-КМЦ, попадая в жидкое стекло, образует взвесь мелкодисперсных хлопьев, а вода, имевшаяся в растворе Н-КМЦ, переходит в раствор жидкого стекла, тем самым уменьшая его вязкость. Причем средний размер хлопьев Н-КМЦ во многом зависит от концентрации вводимого в жидкое стекло раствора Н-КМЦ при одинаковых условиях приготовления смеси.

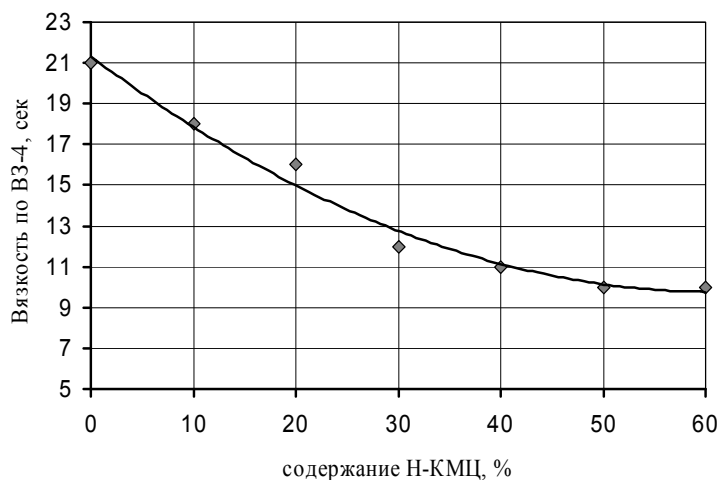


Рис. 1. Зависимость вязкости жидкого стекла (М-2,5) от количества введенного в него 30%-ного водного раствора Н-КМЦ

В результате исследований влияния Н-КМЦ, вводимого в сырую ЖС, были установлены закономерности изменения прочностных свойств ЖС в зависимости от количества и концентрации раствора Н-КМЦ. Наибольшая прочность смеси как при тепловом, так и при CO_2 -процессе достигается при использовании 15-20%-го раствора Н-КМЦ в количестве 3 масс.ч., прочность ЖС при этом возрастает на 85–90 % по сравнению с ЖС без добавления полимера. Увеличение содержания раствора Н-КМЦ более чем 3 масс.ч. в смеси приводит к падению прочности в силу переувлажнения ЖС.

Полученные зависимости прочности жидкостекольной смеси от концентрации Н-КМЦ и количества раствора, используемого для плакирования песка, показали, что максимальная прочность ЖС достигается при плакировании песка низкоконцентрированными растворами Н-КМЦ (5–15 %).

Прочность ЖС с плакированным Н-КМЦ песком во многом зависит и от способа отверждения. Максимальная прочность смеси достигается при тепловом отверждении. Причем следует отметить, что при тепловом отверждении удалось получить высокую прочность при достаточно широком диапазоне концентраций растворов Н-КМЦ от 10 до 25 %.

Остаточная прочность образцов, изготовленных из исследуемых смесей и прокаленных при 700°C , так же как и прочность после сушки, мало зависела от способа отверждения и способа приготовления смеси. Однако при этом, сравнивая остаточную прочность ЖС с добавкой раствора Н-КМЦ с остаточной прочностью ЖС без полимерных добавок, можно заключить, что содержание Н-КМЦ оказывает значительное влияние на остаточную прочность. Так, остаточная прочность смеси с 3 масс. ч 20%-ного раствора Н-КМЦ более чем в 3 раза меньше остаточной прочности смеси без ПД, что свидетельствует о том, что любое введение Н-КМЦ в смесь позволяет значительно понизить ее остаточную прочность и тем самым улучшить выбиваемость.

Проведенный комплекс исследований по применению Н-КМЦ в составе ЖС и полученные зависимости показали технологическую целесообразность использования Н-КМЦ для улучшения прочности и выбиваемости жидкостекольных смесей.

ПВС, так же как и Н-КМЦ водорастворимый полимер, но менее термостойкий и с жидкостекольным связующим не смешивается. Анализ изменения прочности ЖС в зависимости от количества вводимого раствора ПВС и его концентрации показал, что прочность смеси, отверждаемой тепловой сушкой, возрастает с увеличением концентрации раствора ПВС. Максимальная прочность наблюдается при введении 3 масс.ч. 30%-ного раствора ПВС. При отверждении ЖС CO_2 газом прочность также возрастает с увеличением концентрации вводимого в смесь раствора ПВС, но при этом максимальная прочность достигается при введении 4 масс.ч. 30%-ного раствора ПВС.

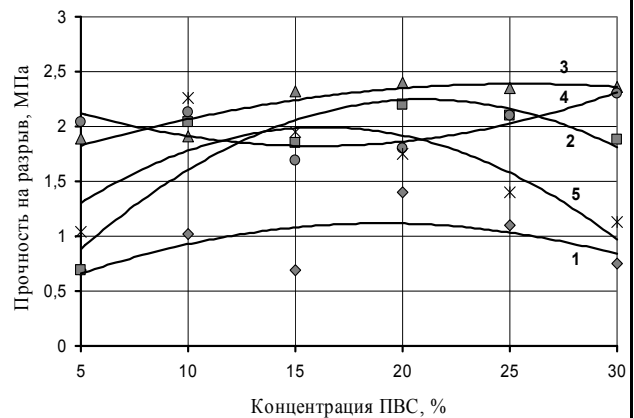
Исследования прочностных свойств ЖС в зависимости от концентрации ПВС в растворе и количества самого раствора, вводимого при плакировании песка, показали (см. рис. 2), что максимальная прочность ЖС при отверждении сушкой достигается в случае плакирования песка 25–30%-ным раствором ПВС в количестве 3–4 масс. ч., а в случае отверждения смеси CO_2 максимальная прочность достигается при плакировании песка 3 масс. ч 15–30%-ным раствором ПВС.

Остаточная прочность ЖС после прокаливания, как и в случае использования Н-КМЦ, во многом зависит от количества ПВС в смеси. Наименьшей остаточной прочностью обладали образцы, изготовленные из плакированного ПВС песка.

Проведенные исследования по применению ПВС в составе ЖС показали целесообразность использования ПВС для улучшения свойств жидкостекольных смесей. Из рассмотренных двух вариантов приготовления смеси наилучшие прочностные свойства показали смеси, приготовленные по технологии предварительного плакирования песка ПВС.

Полистирол в отличие от Н-КМЦ и ПВС не является водорастворимым полимером. Выбор ПС в качестве добавки был обусловлен в большей степени его высокими прочностными свойствами и низкой стоимостью.

Рис. 2. Влияние количества и концентрации раствора ПВС при плакировании песка на прочность смеси с жидким стеклом, отвержденной продувкой CO_2 :
 1 – 1 масс.ч. раствора ПВС; 2 – 2 масс.ч. раствора; 3 – 3 масс.ч. раствора;
 4 – 4 масс.ч. раствора; 5 – 5 масс.ч. раствора



В целом анализ полученных зависимостей прочности жидкостекольно-полистироловой смеси показал, что прочность при тепловом и холодном отверждении в основном зависит от концентрации вводимого раствора ПС в толуоле, а количество вводимого раствора не оказывает значительного влияния на прочность. При тепловом отверждении введение в ЖС низкоконцентрированных растворов ПС (10–20 %) приводит к падению прочности, по сравнению с жидкостекольной смесью без ПД, лишь введение высококонцентрированных растворов ПС позволяет повысить прочность почти в 2 раза. В случае отверждения CO_2 газом использование низкоконцентрированных растворов ПС приводит также к разупрочнению смеси в отвержденном состоянии, а введение высококонцентрированных растворов ПС (30–40 %) не дает ощутимого повышения прочности по сравнению с ЖС без полимерных добавок.

Остаточная прочность смеси, как и прочность в отвержденном состоянии, также во многом зависит от концентрации раствора ПС. Так, в случае введения 10–20%-ного раствора ПС остаточная прочность существенно не отличается от остаточной прочности ЖС без ПД.

При использовании раствора ПС для плакирования песка максимальная прочность (2,4 МПа) достигается на песках, плакированных 3–4 масс.ч. раствора ПС, при этом концентрация раствора не оказывает значительного влияния.

Отверждение смеси CO_2 газом позволяет достичь достаточно высокой прочности (2,3–2,4 МПа) при использовании плакированного песка 2–3 масс.ч. раствора ПС, но при этом значительное влияние оказывает и концентрация ПС в растворе, используемом для плакирования.

Проведенные исследования влияния раствора ПС на прочностные свойства ЖС показали, что наибольший эффект повышения прочности ЖС достигается в случае использования ПС в качестве плакирующего компонента, при этом также достигается минимальная остаточная прочность смеси после прокаливания.

Сравнительные гистограммы прочностных свойств ЖС с полимерными добавками представлены на рис. 4. Из представленных данных видно, что введение в состав исследованных полимерных добавок значительно повышает прочность смеси как при введении жидкостекольного связующего сразу после перемешивания наполнителя с полимером, так и в случае предварительного плакирования наполнителя полимером.

В целом прочность исследуемых смесей во многом зависит от количества вводимого полимера, способа ввода полимера и способа отверждения смеси. При использовании водорастворимых полимеров (Н-КМЦ, ПВС) максимальная прочность достигается при введении в смесь 3–4 масс.ч. 20–25%-ного водного раствора. Максимальная прочность при добавлении в смесь ПС достигается при введении в смесь 3–4 масс.ч. 30%-ного раствора ПС в толуоле.

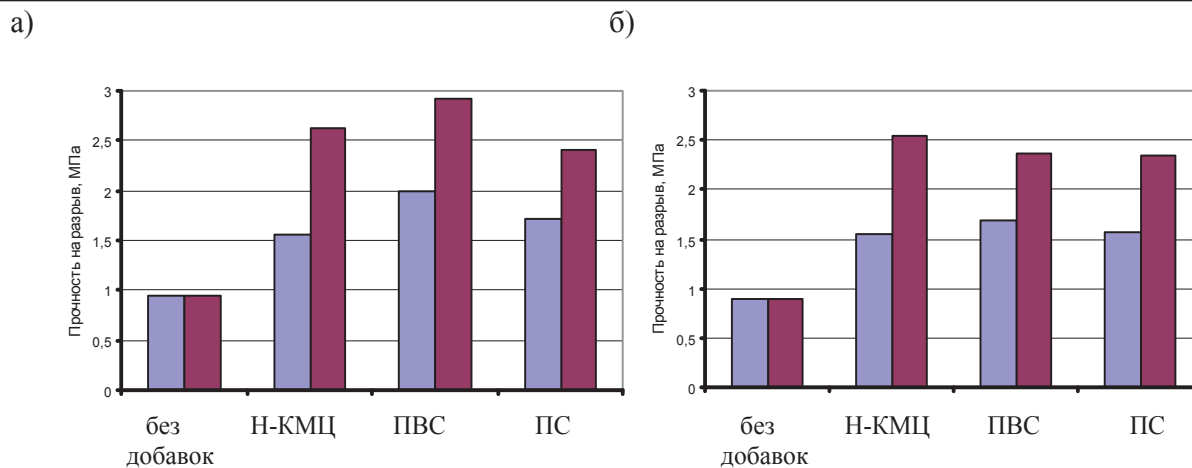


Рис. 4. Гистограммы максимальных прочностей жидкостекольных смесей с полимерными добавками:
а – отверждение смеси при температуре 200 °С; б – отверждение смеси CO₂ газом

■ – введение полимерной добавки в сырую смесь;
■ – при плакировании полимерной добавкой песка

Кристаллогидраты сульфата магния ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) при нагревании до температуры 82 °С плавятся, при этом из расплава испаряется кристаллизационная вода, что приводит к кристаллизации обезвоженного сульфата магния. Обезвоженный сульфат магния при дальнейшем нагревании не претерпевает никаких изменений до температуры разложения, равной 1100–1200 °С.

В ходе исследований связующих свойств $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ было выявлено, что основными управляющими факторами, влияющими на прочность, являются влажность смеси кварцевого песка с $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ и температура сушки смеси. В результате обработки экспериментальных данных была получена зависимость прочности смеси песка с сульфатом магния (5 масс.ч.) от температуры сушки и исходной влажности смеси. Анализ зависимости позволил установить интервал оптимальных температур сушки смеси, равный 135–150 °С, и интервал оптимального соотношения $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ и воды, равный 1 : 0,8–0,9. В этом случае прочность смеси достигает максимально возможных значений (0,67 МПа).

Экспериментально полученная зависимость прочности смеси от температуры ее нагрева показала (см. рис. 5), что нагревание смеси до температур свыше 150 °С приводит к разупрочнению смеси, при этом падение прочности происходит до температур 250–300 °С, после чего прочностные свойства смеси стабилизируются. Падение прочности смеси в диапазоне температур от 150 до 300 °С в среднем составляет 35–45 %.

Сопоставление полученной зависимости прочности смеси песка с сульфатом магния от температуры сушки с данными термоанализа сульфата магния позволило установить, что максимальной прочностью обладает смесь песка с моногидратом сульфата магния ($MgSO_4 \cdot H_2O$). Дальнейшее обезвоживание моногидрата сульфата магния в смеси приводит к падению прочности смеси.

Газотворность отвержденного при температуре 150 °С связующего сульфата магния в среднем составила 75 см³/г. Причем основной пик газовыделения наблюдался при температуре 240–250 °С, что соответствует температуре полного обезвоживания сульфата магния. При температурах выше 300 °С газотворность сульфата магния близка к нулю.

Результаты исследования связующих свойств сульфата магния показали возможность его использования в качестве связующего в формовочных и стержневых смесях, к тому же способность сульфата магния восстанавливать содержание воды в кристаллизационной решетке позволяет легко регенерировать отработанные смеси.

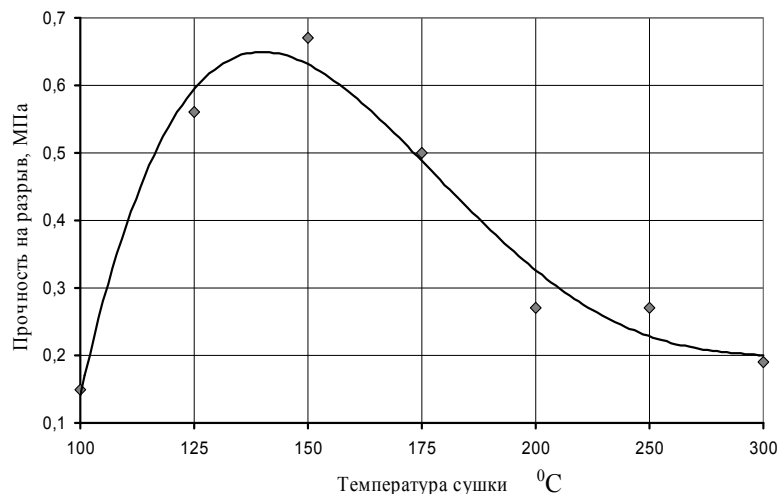


Рис. 5. Зависимость прочности смеси со связующим сульфатом магния от температуры сушки

Дальнейшие исследования проводились в направлении улучшения связующих свойств сульфата магния путем введения в его состав других неорганических солей. В ходе исследований было обнаружено, что соли натрия, вводимые в состав сульфата магния, способствуют повышению прочности смеси. Наилучшие результаты были получены при добавлении к $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ сульфата натрия (Na_2SO_4). При этом чистый Na_2SO_4 не обладает связующими свойствами.

Изменения прочностных свойств смеси в зависимости от количества Na_2SO_4 , вводимого в состав связующего $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, показывают, что увеличение содержания Na_2SO_4 в $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ повышает прочностные свойства смеси кварцевого песка с смесью солей ($MgSO_4 - Na_2SO_4$). Причем при содержании в $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ до 30 % Na_2SO_4 прочность смеси увеличивается практически в 2,2 раза по сравнению с такой же смесью, но приготовленной на чистом сульфате магния (см. рис. 6). Увеличение содержания Na_2SO_4 в $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ более чем на 30 % приводит к резкому падению прочности за счет выпадения в отверждаемом $MgSO_4$ отдельных кристаллов Na_2SO_4 .

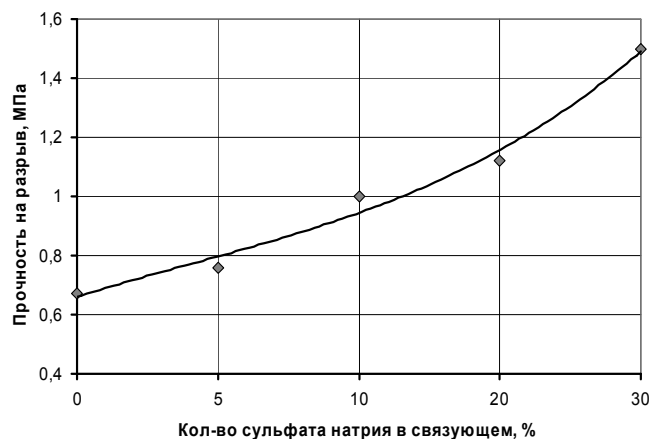


Рис. 6. Влияние количества Na_2SO_4 в $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ на прочность смеси

Термический анализ смеси солей $MgSO_4 - Na_2SO_4$ с различным содержанием Na_2SO_4 показал, что взаимодействие между компонентами не происходит, но при этом заметно некоторое снижение температуры плавления. Так, температура плавления смеси солей $MgSO_4 - Na_2SO_4$ с содержанием 10 масс.ч. Na_2SO_4 составляет $820^\circ C$, а при содержании Na_2SO_4 30 масс.ч. температура плавления снижается до $780^\circ C$, что несколько ограничивает область использования связующего.

Прочность отвержденной смеси, содержащей в качестве связующего смесь солей $MgSO_4 - Na_2SO_4$, так же как и при использовании в качестве связующего $MgSO_4$ в чистом виде, во многом зависит от температуры сушки. Максимальная прочность ЛФС (1,5 МПа), содержащая 5 масс.ч связующего в виде смеси солей $MgSO_4 - Na_2SO_4$, достигается при температуре сушки $150\text{ }^\circ\text{C}$ с повышением температуры, прочность смеси снижается до 0,7–0,65 МПа, что так же как и при использовании чистого сульфата магния обусловлено полным обезвоживанием связующего.

Использование Na_2SO_4 в составе связующего на основе сульфата магния позволяет повысить прочность смеси в отвержденном состоянии, но при этом связующее $MgSO_4 - Na_2SO_4$, как и связующее на основе чистого сульфата магния, значительно теряет прочность в интервале температур от 150 до $300\text{ }^\circ\text{C}$.

С целью получения более стабильных прочностных свойств в диапазоне температур $150\text{--}350\text{ }^\circ\text{C}$ связующего на основе $MgSO_4$ была исследована возможность его комбинирования с фосфатами различных металлов. С помощью термоанализа было выявлено, что при введении в состав сульфата магния смеси фосфатов магния (СФМ) происходит повышение температур, характеризующих полное обезвоживание (см. рис. 7). Исходя из данных термоанализа, было сделано предположение, что введение в состав сульфата магния СФМ позволит стабилизировать прочностные свойства связующего за счет смещения температур, характеризующих полное обезвоживание связующего, в сторону более высоких температур.

Экспериментальные исследования изменения прочности смеси кварцевого песка со связующим сульфат магния – СФМ (12 %) от температуры сушки подтвердили сделанные по результатам термоанализа предположения. Падение прочности смеси при повышении температуры сушки до $250\text{ }^\circ\text{C}$ составило около 10 % от максимальной прочности.

Таким образом, были определены два компонента, позволяющие управлять наиболее важными свойствами связующего на основе $MgSO_4 \cdot 7H_2O$.

В ходе последующих экспериментальных исследований была получена зависимость прочности смеси от содержания в $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, смеси фосфатов магния и Na_2SO_4 . Полученная зависимость позволила определить оптимальное содержание в $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, СФМ (16–18 %) и Na_2SO_4 (20–24 %).

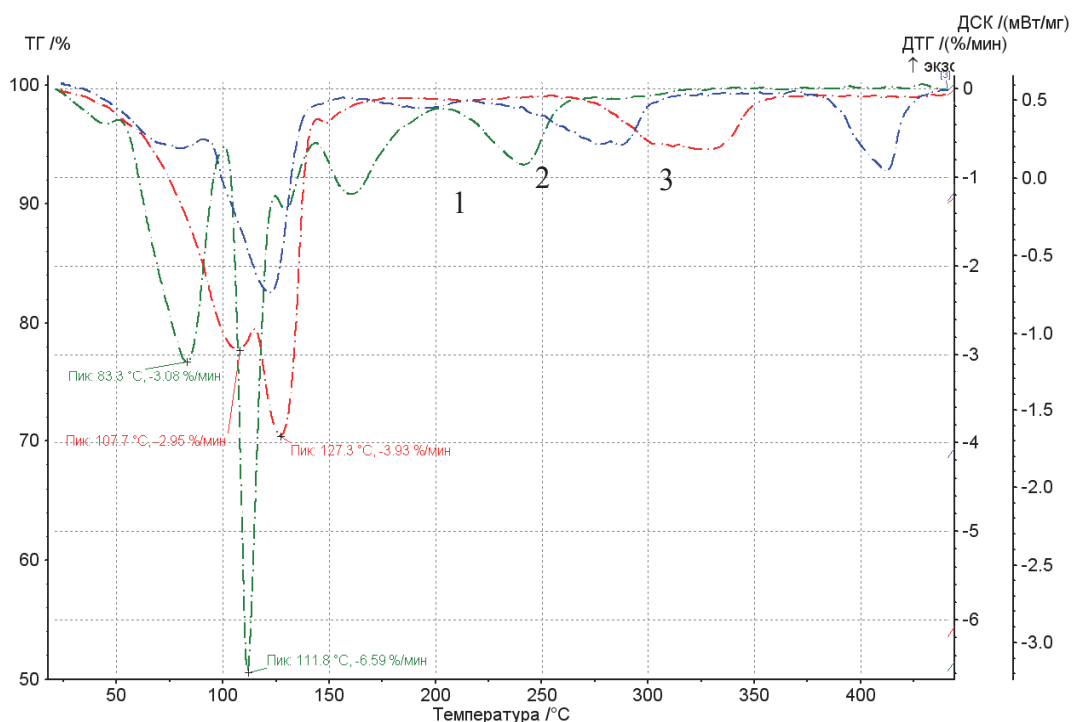


Рис. 7. Дифференциальные термогравиметрические (ДТГ) кривые:
1 – $MgSO_4 \cdot 7H_2O$; 2 – СФМ; 3 – $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ с добавлением СФМ (12 %)

Исследования изменения прочности связующего в диапазоне температур сушки от 150 до 250 °С показали, что прочность смеси достигает до 2,2 МПа при содержании связующего ($MgSO_4-Na_2SO_4$ (20 %) – СФМ (16 %)) в смеси 5 масс.ч. Дальнейшее увеличение температуры сушки приводит к снижению прочности до 1,7–1,8 МПа. При этом прочность смеси остается на достаточно высоком уровне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Евстигнеев, А. И. Решение проблем формообразования в литье по выплавляемым моделям / А. И. Евстигнеев, И. Г. Сапченко // Литейное производство. – 2012. – № 9. – С. 40-43.
2. Специальные технологии литейного производства: учеб. пособие. Ч. 2 /под общ. ред. А. И. Евстигнеева, Е. А. Чернышова. – М.: Машиностроение, 2012. – 436 с.
3. Свиридов, А. В. Изготовление оболочковых литейных форм с использованием электрофореза / А. В. Свиридов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № 1. – С. 61-66.
4. Литье по выплавляемым моделям / под ред. Я. И. Шкленника и В. А. Озерова. – М.: Машиностроение, 1984. – 408 с.
5. Дошкарж, И. Точное литье в керамические формы / И. Дошкарж [и др.]; пер. с чеш. – М.: Машгиз, 1962. 243 с.
6. Эванс, А. Г. Конструкционная керамика / А. Г. Эванс, Т. Г. Лэнгдоп; пер. с англ. – М.: Metallургия, 1980. – 255 с.
7. Финкель, В. М. Физические основы торможения разрушения / В. М. Финкель. – М.: Metallургия, 1977. 360 с.
8. Стрелов, К. К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов / К. К. Стрелов. – М.: Metallургия, 1985. – 480 с.
9. Шипулин, Н. В. Упрочнение оболочковых форм в производстве литья по выплавляемым моделям / Н. В. Шипулин // Прогрессивная технология литейного производства: сб. науч. тр. – Горький: ВВКИ, 1962. – С. 512-516.
10. Пат. 2481917 Российская Федерация, МПК В22С 1/02. Суспензия для изготовления форм точного литья методом электрофореза / Дмитриев Э. А., Свиридов А. В.; заявитель и патентообладатель ГОУВПО “КНАГТУ”. – № 2011142658/02; заявл. 19.12.2011; опубл. 20.05.2013, Бюл. № 15. – 2 с.
11. Пат. 2488458 Российская Федерация, МПК В22С 1/02. Способ изготовления выплавляемых моделей для получения оболочковых форм методом электрофореза / Дмитриев Э. А., Свиридов А. В.; заявитель и патентообладатель ГОУВПО “КНАГТУ”. – № 2011142658/02; заявл. 19.12.2011; опубл. 20.05.2013, Бюл. № 13. – 3 с.
12. Пат. 115260 Российская Федерация, МПК В22С 1/02. Устройство для изготовления форм точного литья методом электрофореза / Дмитриев Э. А., Свиридов А. В.; заявитель и патентообладатель ГОУВПО “КНАГТУ”. – № 2011142759/02; заявл. 19.12.2011; опубл. 20.05.2013, Бюл. № 10. – 3 с.
13. Совершенствование технологии формообразования электрофоретических оболочек / А. И. Евстигнеев, А. В. Свиридов, Э. А. Дмитриев, В. В. Петров // Литейное производство. – 2014. – № 9. – С. 32-34.
14. Определение механических характеристик оболочковых форм с учетом их слоистости / А. И. Евстигнеев, И. Г. Сапченко, В. Н. Тышкевич, В. В. Васин, В. И. Куренков // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 1991. – № 2. – С. 51-53.
15. Влияние пористости на прочность оболочковых форм по выплавляемым моделям / А. И. Евстигнеев, И. Г. Сапченко, В. Н. Тышкевич, В. В. Васин // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 1991. – № 8. – С. 51-53.
16. Определение механических характеристик слоистых оболочковых форм / А. И. Евстигнеев, И. Г. Сапченко, В. Н. Тышкевич, Г. И. Тимофеев // Литейное производство. – 1992. – № 8. – С. 25.
17. Тышкевич, В. Н. Влияние пористости на прочность слоистых оболочковых форм по выплавляемым моделям / В. Н. Тышкевич, А. И. Евстигнеев, К. В. Худяков // Современные наукоемкие технологии. – 2011. – № 4. – С. 58-60.