

**Ключевые слова:**

литейное производство, изготовление форм и стержней, жидкие самотвердеющие смеси, CO<sub>2</sub>-процесс, ФОСКОН-процесс, алюмоборфосфатная формовочная смесь

# ВОЗРОЖДЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ В СТАНКОСТРОЕНИИ НА ОСНОВЕ НЕОРГАНИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ

**Станислав ТКАЧЕНКО, Вилен КРИВИЦКИЙ, Юрий МУРАВЬЕВ, Георгий КОЛОДИЙ**

Дана историческая ретроспектива развития технологии изготовления форм и стержней из жидких самотвердеющих смесей и (ЖСС) и холоднотвердеющих смесей (ХСС). Показаны преимущества и перспективы использования ЖСС в станкостроении. Подтверждена перспектива применения ранее разработанного «ФОСКОН-процесса» в целях ресурсосбережения и повышения эффективности литейного производства.

Согласно экспертной оценке ООН, самыми экологически неблагоприятными городами мира считаются металлургические центры СНГ. Металлургическая промышленность в целом и литейное производство в частности оказывают огромное воздействие на окружающую среду и как мощный потребитель ее ресурсов, и как мощный источник ее загрязнения.

Поскольку в странах СНГ на единицу продукции литейного производства потребляется в несколько раз больше сырья, материалов, энергоносителей, воды, чем в других развитых странах, то одним из важных факторов в решении означенной проблемы является улучшение экологической обстановки с целью сохранения качества жизни настоящих и будущих поколений, гарантирующее более полную реализацию человеческого потенциала в процессе увеличения объемов производства и повышения качества производимой продукции.

За последние годы в литейном производстве приоритеты в развитии технологических процессов изменились в сторону их совместимости с окружающей средой, что обусловлено ужесточением требований по выбросам вредных веществ в атмосферу. Это приводит к установке новых или модер-

низации существующих систем очистки газов и воздуха от пыли, золы, диоксида серы, окислов азота, сероводорода, окиси и двуокиси углерода и других вредных веществ, регулируемых Киотским протоколом от 16 февраля 2005 года. Такое нормирование воздействия на окружающую среду подверглось острой критике на конференции ООН по климату, проходившей в 2011 году в Дурбане (ЮАР). Необходимо замена непрозрачной и коррумпированной системы, основанной на практически невыполнимых санитарно-гигиенических нормативах ПДК вредных веществ, на новую систему нормирования, основанную на показателях наилучших действующих технологий для крупных загрязнителей (США, Китай) [1].

Конференция пришла к выводу, что экология и цивилизация – два взаимоисключающих фактора, разрешение которых зависит только от нахождения временного компромисса на уровне освоенных цивилизацией знаний и навыков. Это подтверждается различием нормативов, установленных региональными органами. Например, в России нормативы по выбросам окиси углерода в четыре раза, а по бензолу в 10 раз жестче, чем в странах Евросоюза.

В связи с изложенным, в литейном производстве перспективными являются технологии производ-

ства стержней и форм на основе неорганических связующих систем, имеющих ряд серьезных преимуществ перед системами на базе органических соединений, в том числе:

- гарантированное наличие сырьевых материалов в промышленных объемах;
- разнообразие способов отверждения;
- улучшение санитарно-гигиенических условий труда на рабочих местах;
- отсутствие выделений вредных веществ, высокая термостойкость [2].

Наибольшее распространение в отечественной практике в 60–70-е годы прошлого столетия получили смеси на основе жидкого стекла и прежде всего –  $\text{CO}_2$ -процесс. Смесь песка и связующего после перемешивания уплотняли в стержневом ящике, а затем продували углекислым газом. После продувки в течение нескольких секунд смесь приобретает манипуляторную прочность, достаточную для последующих операций – извлечения из стержневого ящика, окраски, транспортировки, хранения, сборки и заливки формы.

В процессе внедрения этой технологии был выявлен ряд недостатков:

- неудовлетворительная выбиваемость;
- гигроскопичность;
- недостаточная прочность и текучесть смесей;
- сложность процесса регенерации.

Хотя технология применяется несколько десятилетий, она постоянно совершенствуется. За многие годы литейщики за счет изучения механизма твердения жидкого стекла, использования различных добавок научились управлять процессом упрочнения и другими технологическими свойствами жидкостекляных смесей. Например, установлено, что наиболее твердые и прочные гели получаются при низких значениях pH, то есть для низкомолекулярных стекол. При высоком модуле увеличивается размер глобул и делается более рыхлой их упаковка. На прочность смеси также влияет усадка геля при высушивании или естественном обезвоживании. При высоком модуле гель является плотным и хрупким и, поэтому, может растрескиваться. Исследования, выполненные в ЦНИИТМАШ, показали, что прочность жидкостекляных смесей при нагреве имеет два максимума – в зонах 200–300 и 500–800 °С. Снижение прочности во втором температурном интервале может быть достигнуто введением

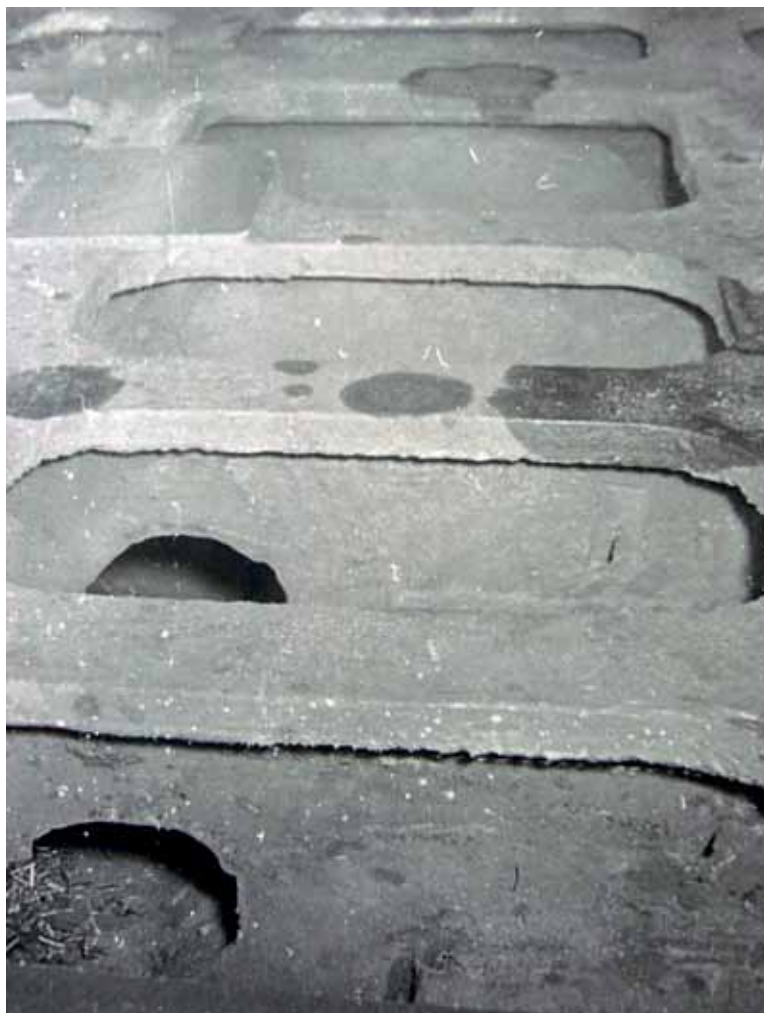


Рис. 1. Фрагмент станины расточного станка модели 2А622, масса 6 500 кг

неорганических экологически безопасных добавок [3]. Это позволяет устранить указанные недостатки и масштабнее вернуться к использованию жидких (ЖСС) и пластичных (ПСС) смесей для изготовления крупных форм и стержней в станкостроении и отказаться от половинчатой технологии, когда формы изготовлены из жидкостекляной смеси, а стержни из ХТС (сыпучих холодно-твердеющих смесей по *alfaset* процессу).

Область применения жидкостекляных смесей постоянно расширялась: если в первый период освоения применялся в основном  $\text{CO}_2$ -процесс для отливок массой до 1 т и габаритами до 1 м, то в дальнейшем, начиная со второй половины 60-х годов и до распада Советского Союза, на всех станкостроительных заводах для изготовления тяжелых отливок применялись жидкие самотвердеющие смеси (ЖСС) для форм и стержней (рис. 1). При этом, значительно повысилась

геометрическая точность крупных отливок, а цикл формообразования сократился по времени в 3–4 раза.

Если вопросы упрочнения и структурообразования жидкостекольных смесей широко обсуждались в отечественной и зарубежной литературе, то ряд технологических приемов из заводского опыта в таких обсуждениях не присутствовал, а они могут быть полезными в сложившейся ситуации. В связи с проектированием автоматизированных линий для изготовления сравнительно мелких стержней из жидкостекольных смесей по  $\text{CO}_2$ -процессу, на Ленинградском станкозаводе им. Я.М. Свердлова проводились исследования технологических свойств смесей в автоматизированном режиме. Стандартные испытания формовочных смесей на прочность, влажность и газопроницаемость не могли служить критерием для решения задачи. Проводилось комплексное исследование технологических свойств смесей: прилипаемости, живучести, текучести, выбиваемости, осыпаемости, гигроскопичности, прочности в сыром и упрочненном состоянии. Исследовались жидкостекольные смеси с добавками асбеста (7 сорта), шамота, боксита, битума и торфяной золы. Наилучшим комплексом технологических свойств в условиях автоматической линии обладали смеси с 4,5% жидкого стекла модуля 2,5 с добавками 3% торфяной золы, 5% асбестовой крошки. Они отличались хорошей выбиваемостью при повышенных температурах (по методике ЦНИИТМАШ добавки работали как надрезы в затвердевшем геле кремниевой кислоты), а смеси – повышенной текучестью (торфяная зола) и уплотняемостью (асбест). Режимы продувки  $\text{CO}_2$  для крупных стержней отработывались на экспериментальной установке, позволяющей изменять в определенных пределах и контролировать следующие параметры:

- давление углекислого газа, сжатого воздуха и газозвушной смеси;
- расход углекислого газа и сжатого воздуха;
- время продувки стержней;
- способ подвода газа к стержню – сверху или снизу;
- концентрацию газа в газозвушной смеси.

Исследованиями установлено, что формирование прочности стержней при продувке углекислым газом обусловлено двумя факторами: скоростью затвердевания (или перемещения границы упрочнения) и скоростью нарастания прочности. Оба этих фактора зависят от вида добавки, времени продувки и величины давления газа (увеличение двух последних параметров целесообразно лишь до определенной оптимальной величины). Изучение процесса упрочнения стержня на экспериментальной установке показало:

- с целью лучшей герметизации стержневого ящика и равномерного формирования фронта продувки по сечению стержня целесообразно применение перфорированной резиновой диафрагмы толщиной 3 мм с шагом между отверстиями 50 мм и диаметром отверстий 2 мм;
- продувка стержней смесью углекислого газа и сжатого воздуха принципиально возможна: для получения необходимой прочности стержней оптимальной концентрацией газа следует считать 60%; при поточном производстве снижается производительность установки и экономия углекислого газа незначительна;
- оптимальными параметрами работы установки в поточном производстве являются: давление газа над стержнем 0,3–0,4 атм. при подводе газа сверху; время продувки 20–120 с для стержней высотой 200–1200 мм соответственно.

В результате обобщения полученных данных построены графики продувки для стержней различных весовых категорий на поточных линиях. Режим работы установки должен выбираться из условий получения заданной прочности (в нашем примере – 1,5 кг/см<sup>2</sup> при испытании на растяжение или 2,17 кг/см<sup>2</sup> при испытании на изгиб). Установлено, что фронт заданной прочности продвигается при продувке углекислым газом пропорционально квадратному корню от времени:  $H = 100/t$ , где  $H$  – глубина заданной прочности, мм, а  $t$  – продолжительность продувки, с.

При использовании установки производительность одного рабочего увеличивается в 13 раз. Расход углекислого газа сокращается в 3,5 раза [4].

Из приведенных данных следует, что жидкостекольные процессы формообразования незначительно забыты, особенно если учесть, что в ряду экологически безопасных процессов им нет равных.

Рождение технологии изготовления отливок из разных сплавов со стержнями из неорганических металлофосфатных смесей явилось альтернативой интенсивно развивающимся в начале 80-х годов 20-го столетия процессам изготовления отливок с использованием синтетических смол, которые наряду с достоинствами имеют ряд недостатков – прежде всего по экологическим показателям, в связи с выделением газов и парообразных продуктов термодеструкции связующих.

При нагреве синтетических органических связующих до 400 °С в основном преобладают процессы испарения высоколетучих компонентов (водяной пар, органические растворители); при нагреве в интервале 400–800 °С выделяются продукты термического разложения органических связующих (ароматические углеводороды, фур-

фурол, фурфуроловый спирт, фенол, бензол, толуол, крезол, формальдегид, изоцианиты, амины, аммиак); при нагреве в интервале 800–1200 °С имеют место процессы с образованием CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub> [5].

В исследованиях С.С. Жуковского было показано, что фосфатные связующие представляют собой гетерогенную систему, состоящую из двух компонентов – порошка, обладающего основными свойствами, и кислоты [5]. Химическое взаимодействие между ними приводит к самозатвердеванию композиции на воздухе. Продукты реакции – гидраты ортофосфорной кислоты – обладают определенными связующими свойствами, то есть собственной прочностью и адгезией к наполнителю, и в затвердевшем состоянии представляют собой неорганические полимеры [5, 6]. Необходимую скорость затвердевания на воздухе (1–5 мин) обеспечивают окислы, содержащие катион с ионным потенциалом (отношением заряда иона к его радиусу), имеющим значения 2,5–4,5. Это такие окислы, как FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiO, MgO, CuO и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

По технологическим и экономическим соображениям, а также в связи с нестабильностью системы окислов железа и низкой (1150 °С) температурой плавления феррофосфатной композиции, наиболее распространенные получили ХТС на основе фосфатов магния [5].

Физико-химические исследования продуктов твердения магний-фосфатных композиций показали, что при взаимодействии ортофосфорной кислоты с магниевыми материалами образуются соединения, представляющие собой в основном двухзамещенный трехводный фосфат магния [5]. Скорость затвердевания и прочность ХТС обусловлены свойствами исходных материалов – магнийсодержащего порошка и ортофосфорной кислоты. Реакционная способность порошка зависит от температуры обжига материала, содержания окиси магния и удельной поверхности порошка. Установлено, что уплотняемость, текучесть и формуемость фосфатных смесей связаны с внутренним трением и силами сцепления их составляющих и зависит от давления прессования и внешнего трения.

Процессы изменения прочностных и деформационных свойств фосфатных смесей при нагреве и охлаждении являются следствием фазовых превращений фосфатов при высоких температурах. При 20–330 °С происходит дегидратация фосфатов с удалением 95–98% воды, в результате чего нарушается плотность структуры и снижается прочность композиции. В зоне 330–700 °С удаляется оставшаяся химически связанная вода, образуются полифосфатные соединения и кристаллическая структура

переходит в аморфное состояние [5], сопровождающееся заметным уплотнением структуры и повышением прочности. При температуре выше 700 °С протекает вторичная кристаллизация полифосфатов, которая является причиной снижения прочности. При температурах около 1000 °С композиция, полностью потеряв прочность вследствие плавления, приобретает большую пластическую деформацию.

Увеличение прочности при температурах прогрева свыше 1000 °С связано с цементированием зерен наполнителя при охлаждении расплавленной композиции. При этих температурах возможен также процесс химического взаимодействия жидкой фазы с наполнителем, в частности с кремнеземом, с образованием новых продуктов, упрочняющих смесь в прилегающих к отливке слоях [7].

В прошлом ОАО «ВПТИлитпром» и «ЛенАЛ» более 10 лет занимались изучением и внедрением смесей на алюмоборфосфатном связующем («ФОСКОН-процесс»). Применялся алюмоборфосфатный концентрат (АБФК) и магнийсодержащий порошковый отвердитель фосфатной композиции (ПОФК) огнеупорностью 1900–2000 °С. Было установлено, что ХТС на этом связующем обладают высокими физико-механическими свойствами и термостойкостью, а их компоненты и продукты твердения не содержат токсичных веществ. При нагреве и последующем охлаждении такие смеси легко разупрочняются и обеспечивают хорошую выбиваемость [7].

В ряде статей по литейному производству отмечаются некоторые проблемы при внедрении фосфатных смесей: дефицит связующих, домол магнетитового порошка до удельной поверхности 3600–5400 см<sup>2</sup>/г, повышенный расход ортофосфорной кислоты и др. [8]. Опыт широкого внедрения «ФОСКОН-процесса» на 40 заводах страны и ближнего зарубежья показал, что все указанные проблемы в настоящее время решены. Расширено производство АБФК на Буйском АО «ФК» (Костромская обл.) и ЗАО «Воскресенский завод химических реактивов».

Подтверждены ранее приводимые данные по эффективному применению процесса для единичного и мелкосерийного производства средних и крупных отливок из чугуна и стали. Достигнуты следующие результаты:

- снижение трудоемкости изготовления стержней на 10–15%;
- уменьшение объема выбивных и очистных работ в 2–3 раза;
- повышение размерной точности отливок.

Опробовано смесеприготовительное оборудование фирмы «Родонит» с дозаторами для



Рис. 2. Конвейер для крупных форм

мелкодисперсных компонентов, что позволило решить проблему нестабильности ХТС, обусловленную спецификой дозирования и равномерного распределения порошка ПОФК на зернах наполнителя. Совместные работы «Родонит» и «ЛенАл» по модернизации оборудования, улучшению свойств и стабилизации качества исходных материалов позволили в 2005 году успешно внедрить и усовершенствовать на Новочеркасском электровозостроительном заводе (НЭВЗ) «ФОСКОН-процесс» для изготовления стальных отливок ответственного назначения (рис. 2).

Важным этапом расширения применения «ФОСКОН-процесса» явился процесс изготовления стержней и форм в горячих ящиках, что значительно сокращает продолжительность их изготовления и число отделочных операций, повышает производительность труда и улучшает экологию цеха. Как показали эксперименты, для отверждения АБФК возможна замена чистой окиси магния отходами производства Буйского и Ижорского заводов с содержанием окиси магния в пределах 65–76% (табл. 1).

Таблица 1. Рациональный состав алюмоборфосфатной формовочной смеси

Состав, масс. %		Свойства	
Песок кварцевый	100	Прочность на разрыв, кгс/см <sup>2</sup>	15–16
Связующее АБФК	3,5–4,0	Осыпаемость, %	1,5–2,0
Отвердитель ПОФК	1,2	Газотворность, м <sup>3</sup> /г	6,0



Рис. 3. Формовочная автоматическая линия

Производственное опробование стержней и форм на основе АБФК производилось на стальном литье в нагреваемой оснастке заводов «Армалит» (Санкт-Петербург), ОАО «ГАЗ» (Нижний Новгород) и др. и подтвердило высокие технологические и рабочие свойства смеси. Опытные отливки имели качественную поверхность, смесь легко высыпалась из отливки на выливной решетке. Корректировка состава заключалась в нивелировании физико-механических свойств (прочности, живучести, скорости твердения) в зависимости от качества песка, температуры окружающей среды, параметров отливок и форм.

Важным этапом явилось изготовление форм и стержней для стальных отливок массой более 2,5 т на ПК «НЭВЗ» и судомеханическом заводе в г. Цимлянске. Главным достижением стало освоение регенерации смеси на АБФК, которая заключалась в магнитной сепарации, перетирании, классификации и охлаждении. Удалось получить качественный регенерат, который до 100% используется при изготовлении форм. В случае необходимости для облицовки форм используется свежий песок.

В 2014 году на НЭВЗ впервые была внедрена формовочная автоматическая линия по «ФОСКОН-процессу» (рис. 3) [9].

В целом, суммируя приведенные материалы, можно сделать вывод о том, что отсутствие токсичных выделений при изготовлении форм и стержней на АБФК, возможность механической регенерации огнеупорных материалов с возвратом до 90% регенерата в производство, высокое качество отливок позволяют «ФОСКОН-процессу» реализовать отличные перспективы ресурсосбережения и повышения эффективности литейного производства.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Кальнер В.Д.** Киотский протокол в тупике // Экология и производство. 2012. № 1.
2. **Жуковский С.С.** Изготовление стержней из жидкостекольных смесей в массовом производстве отливок // Труды 9-й международной научно-практической конференции «Литейное производство сегодня и завтра». — СПб, 2012.
3. **Иванова Л.А., Чернышов Е.А., Кузнецов С.А.** Влияние комплексного модификатора на остаточную прочность жидкостекольных смесей // Литейное производство. 2016. № 11.
4. **Кривицкий В.С., Гуляев Б.Б., Фомченко С.И., Евстафьев И.Н.** Изготовление стержней и форм на автоматизированных линиях // Технологические основы автоматизации литейных процессов. — М.: Наука, 1967.
5. **Илларионов И.Е., Гамов Е.С., Васин Ю.П., Чернышев Е.Г.** Металлофосфатные связующие и смеси. — Чебоксары, 1995.
6. **Жуковский С.С., Юнович Ю.М., Невская О.Е.** Фосфатные ХТС для производства стальных и чугуновых отливок // Литейное производство. 1987. № 4.
7. **Ткаченко С.С., Кривицкий В.С.** Перспективы внедрения ХТС на неорганических связующих // Труды 8-го съезда литейщиков России. — Р. н/Д., 2007.
8. **Королев Г.П., Куданкин Л.И., Смоляков А.Г.** Проблемы применения фосфатных ХТС // Литейное производство. 1989. № 5.
9. **Муравьев Ю.Н., Вэбб Ф.В., Ткаченко С.С., Сарыев С.Д., Котова Л.А.** Опыт применения «ФОСКОН-процесса» для производства стальных отливок на ПК «НЭВЗ» // Труды 10-й международной научно-практической конференции «Литейное производство сегодня и завтра». — СПб, 2014.

---

**ТКАЧЕНКО Станислав Степанович** –  
доктор технических наук, профессор, президент  
Ассоциации литейщиков Санкт-Петербурга и Ленин-  
градской области (ЛенАл)

**КРИВИЦКИЙ Вилен Семенович** –  
кандидат технических наук, вице-президент ассоциа-  
ции (ЛенАл)

**МУРАВЬЕВ Юрий Николаевич** –  
кандидат технических наук, генеральный директор  
ООО «РОДОНИТ»

**КОЛОДИЙ Георгий Арсеньевич** –  
ведущий специалист ООО «РОДОНИТ»