

# **РАБОТА С ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫМИ СМЕСЯМИ В УСЛОВИЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗНАЧИТЕЛЬНОГО ОБЪЕМА COLD-BOX СТЕРЖНЕЙ**

Бусби Э.Д. (Ashland Casting Solutions, Киддерминстер, Великобритания)

## **ВВЕДЕНИЕ**

Формовка песчано-глинистых смесей (ПГС) широко распространена на предприятиях, производящих крупногабаритные отливки. ПГС представляет собой смесь кварцевого песка со связующей глиной, водой и технологическими добавками, которая способна получать форму необходимой конфигурации при прессовании, встряхивании, надуве и других воздействиях. После заливки и затвердевания отливок форма подлежит разрушению, материал её подготавливают к последующему повторному использованию. При этом необходимо внести в смесь дополнительную порцию глины и технологических добавок, взамен отработанных, а также удалить некоторую часть смеси. В большинстве случаев потери по смеси составляют около 10% от массы отливки. Химически связанные стержни, также использовавшиеся при изготовлении отливок в песчано-глинистых формах, обычно обладают весьма хорошей выбиваемостью, частицы служившей для изготовления стержневой смеси становятся несвязанными, обладают хорошей сыпучестью и в этом плане ведут себя подобно зёрнам исходного песка.

Во многих случаях количество песка, внесённого в ПГС из стержневой смеси при выбивке, превосходит требуемую добавку в районе 10% от массы отливки и может достигать даже столь высокого уровня, как 100% от этой массы, типичная же ситуация – 30-50%. Эффект в случае такой избыточной добавки очевиден – в оборотной смеси (ОС) нарушается правильная пропорция между песком и глиной, необходимо удаление большего количества песка, соответственно, внесение большего количества глины и технологических добавок в смесь, взамен ушедшего с удалённым песком. С обычно применяемыми технологиями нет возможности изолировать формовочную и стержневую смесь друг от друга. Издержки от засорения ОС могут быть довольно существенны, известны случаи, когда они составляли до 25000 евро в неделю на предприятиях, работающих с ПГС и крупными стержнями, изготовленными по cold-box процессу – средства тратились на свежий песок, глину, технологические добавки и утилизацию отработанного песка.

В настоящей статье рассмотрены последствия засорения ОС, способы полного либо частичного предотвращения засорения, компенсации этих последствий, отрицательные и положительные экономические и технические эффекты от различных мероприятий по решению проблемы.

## **ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОГО СОДЕРЖАНИЯ ПЕСКА ИЗ ОТРАБОТАННОЙ COLD-BOX СМЕСИ НА СВОЙСТВА ПГС**

Известно о нескольких работах, посвящённых вопросу влияния на свойства ПГС присутствия остатков отработанной стержневой смеси [1-4]. В работе [1] исследуется влияние присутствия остатков различных по-bake смесей. В более поздней статье [4] рассмотрено влияние добавки в ПГС фенольно-уретановой по-bake смеси (как отработанной, так и свежей) и высказано предположение, что полученные результаты можно распространить и на случай работы с cold-box смесями. В исследованиях контролю подвергали ряд свойств ПГС, среди которых:

- потребность во введении воды;
- прочность на сжатие в сыром состоянии;
- газопроницаемость в сыром состоянии;
- прочность в высушенном состоянии;

- рН;
- потери при прокаливании;
- содержание активной глины (по метилен голубому);
- содержание глинистой составляющей;
- ситовой анализ песка;
- шаттер-индекс;
- прочность на растяжение в сыром состоянии.

В рамках указанных выше экспериментальных работ добавка стержневой смеси составляла до 50% и указывалось лишь на незначительное влияние на свойства ПГС. В [1] утверждается, что наличие в ПГС отработанной стержневой смеси повлияет на свойства ПГС почти так же, как в случае добавки в исходную ПГС избытка свежего песка. В [4] отмечается снижение уплотняемости, несмотря на повышение влажности смеси на 0,2% в сравнении с исходной ПГС, а также указано на некоторое снижение прочности на растяжение в сыром состоянии. Обнаруженные эффекты проявлялись в большей степени при добавке свежей стержневой смеси, нежели чем при присутствии отработанной.

В обоих случаях производили сравнение свойств засорённой смеси со свежеприготовленной ПГС и существенного влияния на свойства, связанного с добавкой именно по-баке смеси не фиксировали. Это не удивительно и не расходится с опытом автора настоящей статьи – основная проблема при наличии остатков стержневой смеси может быть отождествлена со случаем избытка свежего песка в ОС. Избыток остатков стержневой смеси в ОС приводит к снижению концентрации неактивной глины и потере технологических добавок. В книге [5] дана удачная иллюстрация изменения свойств ПГС по мере увеличения содержания неактивной глины (рис. 1).

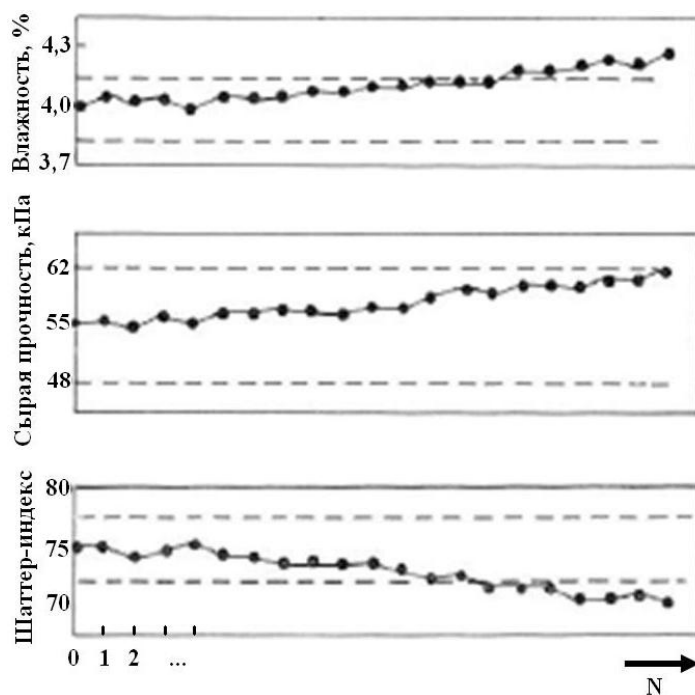


Рис. 1. Влияние увеличения содержания в ПГС неактивной глины по мере прироста количества оборотов смеси  $N$  на потребность в воде, прочность на сжатие в сыром состоянии и шаттер-индекс

Увеличение содержания неактивной глины ведёт к большей потребности в воде, повышению прочности при сжатии в сыром состоянии и снижению шаттер-индекса. Шаттер-индекс косвенно свидетельствует о способности противостоять ударным нагрузкам. Очевидно, что в результате накопления неактивной глины прочность растёт,

а способность противостоять ударным нагрузкам снижается. При внесении значительного количества стержневой смеси в ПГС уровень неактивной глины поддерживается очень низким и происходят обратные вышеописанным явления. В результате, уровень ряда свойств ПГС является неблагоприятным для процесса формовки. Диапазон влажностей смеси снижается, при создании необходимого уровня плотности смеси в условиях прессования под высоким давлением влажность мала, а способность сопротивляться ударным нагрузкам довольно высока. Добавка большего количества глины не является удачным вариантом решения проблемы, поскольку это приведёт к дальнейшему увеличению сопротивляемости ударным нагрузкам, потребует введения большего количества воды, повысит склонность к комкованию смеси и т.д. Наилучшим подходом является поддержание низкого содержания влаги [5], поскольку это обеспечивает высокую сырую прочность и снижает способность смеси противостоять ударному воздействию. С другой стороны, смесь будет излишне сухая, особенно если температура окружающей среды высока, что приведёт к проблемам в управлении плотностью смеси.

Практические аспекты при работе с ОС при попадании в неё значительного количества отработанной стержневой смеси следующие:

1. «жесткость» смеси может оказаться низкой, что будет способствовать малой размерной стабильности формы после заливки металла;
2. влажность смеси пониженная, что способно привести к тому, что поверхность форм будет сухой и рыхлой;
3. управление плотностью смеси осложнено узким диапазоном возможных влажностей смеси.

Следует отметить, что низкий уровень неактивной глины не всегда является проблемой, что связано со спецификой тех или иных литейных производств.

### **ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ СНИЖЕНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ, СВЯЗАННЫХ С ЗАСОРЕНИЕМ ОС ОТРАБОТАННОЙ СТЕРЖНЕВОЙ СМЕСЬЮ**

Проблема пониженного содержания неактивной глины, связанная с засорением ОС отработанной стержневой смесью, является сложной для разрешения. Возможные варианты компенсации отрицательных последствий этого процесса следующие.

1. Принимать меры для снижения количества отработанной стержневой смеси, попадающей в ОС: работать с облегчёнными стержнями или же пытаться как-либо предотвратить само засорение. Последнее затруднительно, поскольку выбиваемость cold-box стержней весьма хорошая.
2. Добавлять неактивную глину в ПГС. В некоторой степени компенсировать убыль неактивной глины можно путём добавления в смесь частиц, уловленных системой вытяжной вентиляции (обычно, в виде суспензии). Однако, поскольку смесь содержит мало неактивной глины, то и система вытяжной вентиляции способна будет уловить небольшое её количество. В силу этого положительный эффект невелик, но за счёт указанных мероприятий удастся вернуть и некоторое количество активной глины. Возможная проблема здесь состоит в том, что в ПГС могут возвращаться и нежелательные загрязнения, к примеру, азот.
3. Предотвращать разрушение cold-box стержней, так чтобы они, хотя бы частично, задерживались внутри отливки. За счёт этого удастся существенно снизить необходимость ввода глины и технологических добавок в ПГС.
4. Регенерировать излишки ОС и затем использовать регенерат для производства cold-box стержней. Отделённые при регенерации глина и технологические добавки могут быть затем введены в следующие порции ПГС, что позволит снизить затраты на материалы, немного увеличить содержание неактивной глины за счёт её возвращения смесь, в особенности если регенерация позволяет производить эффективное отделение этой глины.

## ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА COLD-BOX СВЯЗУЮЩИХ И ОСОБЕННОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОРМ НА СВОЙСТВА ОС

Несмотря на прозвучавшее выше заявление о том, что влияние на свойства ОС внесения отработанной стержневой cold-box смеси принципиально схоже со случаем ввода избыточного количества свежего песка, можно выделить ряд специфических эффектов, связанных с присутствием остатков смоляного связующего. В целом, эти эффекты часто не несут в себе крайне вредного влияния.

Остатки cold-box связующего содержат фенольно-уретановый полимер и небольшое количество растворителей, удержанных в структуре связующего. Кроме того, присутствуют продукты термодеструкции полимера и растворителей. Структура фенольно-уретанового полимера приведена на рис. 2. Такого вида структура свойственна для всех фенольно-уретановых cold-box смол, хотя положение фенольной компоненты может несколько варьироваться. Уретановое соединение содержит азот, который может высвободиться в условиях термодеструкции. Этот азот способен накапливаться в ОС, что может привести к дефектам отливок, если в ОС попадает значительное количество отработанной стержневой смеси или баланс добавки части 1 и части 2 смолы таков, что происходит выделение избытка диметилфенилдиизоцианата (ДМФДИ). Количество выделившегося ДМФДИ от его содержания в части 2 и уровня добавки смолы. Очевидно, что азот выделяется из фенольно-уретанового соединения при его термодеструкции. Однако существует вероятность выделения азота при наличии избытка ДМФДИ, содержащегося в отверждённой плёнке связующего.

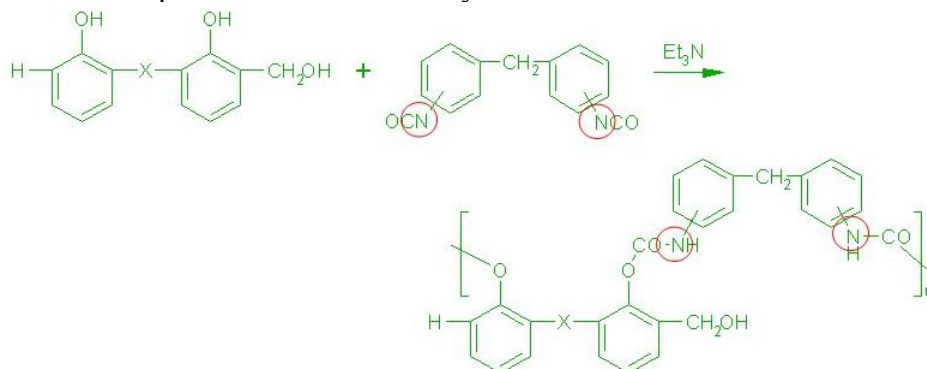


Рис. 2. Механизм отверждения фенольно-уретановой смолы (азот в ДМФДИ и отверждённой структуре помечен красными кружками)

Благоприятным вариантом рецептуры смолы является такая, при которой возможность выделения избыточного непрореагировавшего ДМФДИ из части 2 сведена к минимуму. Это, в свою очередь, снизит риск возникновения дефектов отливок по вине азота, который может выделяться как из cold-box стержней, так и накапливаться в ОС описанным выше образом.



Рис. 3. Отливка из серого чугуна после механической обработки: заметна ситовидная пористость по вине повышенного содержания азота в ОС

На рис. 3 показана отливка из серого чугуна с небольшой ситовидной пористостью на поверхностях, сформированных песчано-глинистой формой, но в зоне по соседству со знаковыми частями cold-box стержня. Дефект возникал в условиях повышенного содержания азота в ОС, на что влиял ряд благоприятствующих этому факторов. Относительно высокий уровень внесения отработанной стержневой смеси в ОС, наряду со вводом захваченной вытяжной системой пылевидной фракции, приводил к росту содержания азота до 0,15%. В материале же cold-box стержней содержание азота обычно составляет 0,04-0,06%. Приведённый пример демонстрирует опасность накопления азота в ОС, когда в неё не только попадает довольно много отработанной стержневой смеси, но ещё и удалённые вместе с пылью загрязнения вновь вводятся в смесь.



Рис. 4. Прибор GF / Simpson Gerosa для измерения прочности на разрыв в зоне конденсации влаги



Рис. 5. Отливка из серого чугуна с газовыми дефектами по вине остаточного содержания в смеси растворителей с высокой точкой кипения

Следует выделить ещё одну возможную проблему, связанную с особенностями химического состава смолы. Некоторые cold-box смолы содержат растворители, содержащие эфирные масла, такие как биодизель (метиловый эфир из рапсового либо других растительных масел). Эти растворители обладают высокой точкой кипения (>350°C) и способны оставаться в фенольно-уретановой связке в гораздо большей степени, нежели более традиционные растворители с точкой кипения от 120-180°C. Снижение способности к удалению растворителей в процессе получения отливки может, в конечном счёте, привести к их накоплению в ОС. Схема накопления этих и других вредных примесей такова же, как в случае с азотом, и связана с избыточным содержанием отработанной стержневой смеси, вводом загрязнённой пылевидной фракции и некоторыми особенностями систем регенерации ПГС, о которых будет

упомянуто ниже. В результате избыточного содержания таких растворителей с высокой точкой кипения проявляются следующие проблемы.

1. Снижается прочность формы в зоне конденсации влаги, что ведёт к риску появления дефектов в отливках, связанных с термическим расширением зёрен основы (ужимины и др.). Механические свойства формы в зоне конденсации могут подвергаться текущему контролю с помощью прибора (рис. 4), позволяющего измерить прочность на разрыв в ослабленном слое формы, формирующемся при быстром нагреве её поверхности.
2. Повышается газовыделение с поверхности песчано-глинистой формы, что приводит к увеличению газовой пористости (рис. 5).

### **ВОЗМОЖНЫЕ СПОСОБЫ УДЕРЖАНИЯ СТЕРЖНЕВОЙ СМЕСИ В ОТЛИВКЕ ПРИ ВЫБИВКЕ**

Большинство стержней, устанавливаемых в песчано-глинистую форму, производят по технологии фенольно-уретанового cold-box-a. Этот способ производства экономически выгоден, поскольку характеризуется оптимальным балансом между стоимостью производства и рабочими характеристиками стержней, техническими особенностями процесса их изготовления, крайне существенными при условии необходимости выпуска больших партий отливок. Одной из особенностей работы с cold-box стержнями является их превосходная выбиваемость и даже разрушение на определённых стадиях процесса формирования отливки, что, в частности, снижает риск возникновения горячих трещин, но ведёт к возникновению описанной выше проблемы с засорением ОС. Возможным способом решения проблемы является использование связующих, стойких при высоких температурах, что позволит избежать облегчённого разрушения стержней, но и придаст им высокую горячую прочность, провоцируя соответствующие дефекты отливки. Прочность стержневой смеси к моменту извлечения отливки из формы не должна быть чересчур высока, иначе выбивка тоже превратится в проблему. В идеальном случае необходима такая прочность стержней, при которой отливка может быть извлечена из формы без существенного разрушения стержней, а полное удаление стержней производят уже на второй стадии выбивки.

Возможной упрочняющей добавкой в стержневую смесь могут выступать фосфаты. Обычно точка плавления этих веществ ниже, чем температуры заливки чугуна, но зачастую им присуща высокая вязкость даже в жидком состоянии. Поэтому данная добавка работает как упрочняющая, но обеспечиваемая при этом прочность стержней умеренная. Производили серию испытаний различных фосфатных смесей, применяемых в качестве добавок. Стержневую смесь готовили, добавляя 1,5% смолы и 1% фосфатной добавки (от массы песка). На лабораторном стержневом автомате изготавливали стандартные образцы для испытаний на растяжение (размер «шейки» 25,4×25,4 мм), а затем помещали их в муфельную печь с температурой 1200°C, после чего температуру в печи плавно снижали до 700°C (общее время выдержки около 2 ч). Затем образцы извлекали и оставляли охлаждаться на воздухе до комнатной температуры. На рис. 6 показаны образцы после охлаждения.

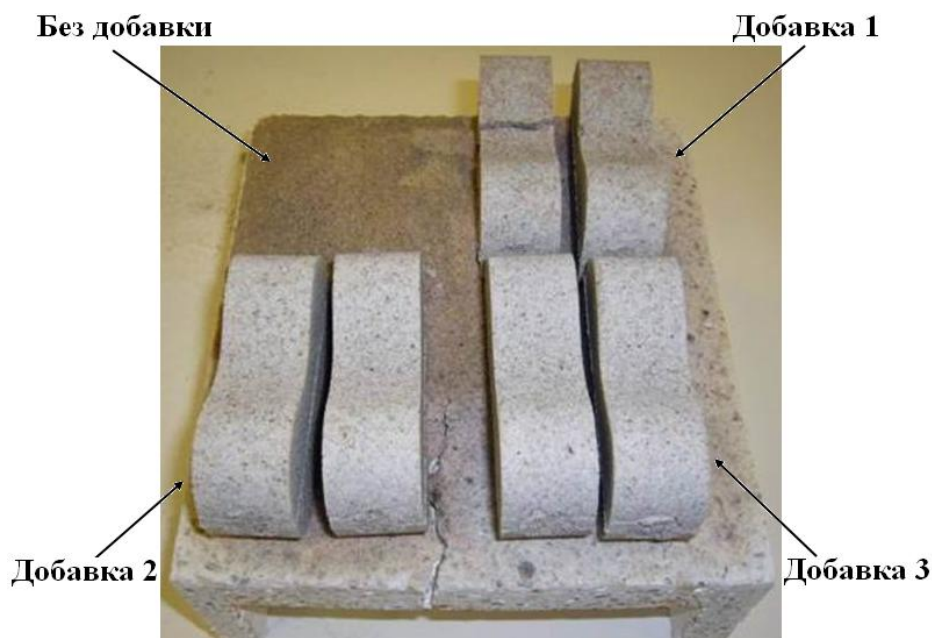


Рис. 6. Тестовые образцы после выдержки в печи и охлаждения

Образцы, изготовленные без фосфатной добавки, самопроизвольно рассыпались, какая-либо связка зёрен песка присутствовала в минимальной степени. Образец с добавкой 1 не рассыпался, но явно не обладал манипуляторной прочностью. Образец с добавкой 2 обладал прочностью, ненамного превосходившей манипуляторную. Прочность образца с добавкой 3 была наивысшей, но всё же его легко можно было сломать рукой. Максимальная нагрузка при разрушении образцов в процессе механических испытаний составляла около 0,3 кг для варианта с добавкой 2 и около 1,0 кг для варианта с добавкой 3.

Результаты, показанные с добавкой 3, позволяют предположить, что стержни, изготовленные с её применением, будут хорошо удерживаться в теле отливки на первой стадии выбивки. Однако в реальности использование фосфатных добавок позволяет обеспечить удовлетворительную прочность стержней лишь в участках, где не осталось органического связующего. Поэтому эффективность применения этих добавок весьма ограничена.

Существуют и другие добавки к смеси, регулирующие выбиваемость стержней, но ни одна из исследованных нами не позволила достаточно надёжно решать задачу по удерживанию стержней в отливке. Так, существует возможность создавать углеродистые связи в результате взаимодействия углерода и оксида железа, но режим протекания соответствующей реакции зачастую обеспечиваются не в полной мере при обычных условиях литья. Автор наблюдал cold-box стержни, которые были хорошо сцементированы за счёт использования добавки оксида железа, но эффективность применения добавки была не абсолютной, эффект упрочнения стержней достигался не на всех отливках, а в случае положительного действия добавки необходимое её содержание в смеси было различным для каждой из отливок.

Вероятно, существуют или будут предложены в будущем и другие способы повышения остаточной прочности cold-box стержней, но, по мнению автора, полноценного и эффективного для любых условий решения задачи достичь невозможно.

После применения тех или иных мер для удерживания стержней в отливке на начальной стадии выбивки следует их удаление и обработка отработанной смеси для производства новых стержней. Использование многих механизмов упрочнения приводит к сокращению объёма регенерированного песка, который может быть вновь использован для производства стержней, ведь наиболее эффективные методы упрочнения

подразумевают формирование устойчивых к высоким температурам соединений и базируются на протекании реакций неорганических и органических веществ.

Другим возможным способом удержания стержневой смеси до определённого момента является извлечение отливки из формы без применения выбивки, при этом выбивка самих стержней становится отдельной операцией. В этом случае на отливке остаётся заметное количество налипшей ПГС, которая не возвращается в ОС.

### **РЕГЕНЕРАЦИЯ ОС ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ СТЕРЖНЕЙ**

В условиях наличия излишков ОС в связи с её засорением отработанной стержневой смесью можно предложить не отправлять их в отвалы, а производить регенерацию и использовать для изготовления тех же стержней по cold-box процессу. Регенерация этих излишков может быть весьма выгодной, особенно если высока стоимость свежего песка и утилизации отработанной смеси. При регенерации возможно восстановить и некоторое количество глины и технологических добавок.

Рассмотрим три метода обработки отработанной ПГС для последующего использования в изготовлении стержней:

1. механическая обработка, заключающаяся в сухом трении частиц смеси;
2. термообработка;
3. мокрая регенерация.

Каждый из перечисленных методов находит практическое применение и обладает своими достоинствами и недостатками.

#### **Механическая регенерация**

Процедура механической регенерации ПГС требует предварительной сушки смеси, затем частицы смеси подвергается интенсивному истиранию для удаления остатков глины и технологических добавок. Большинство применяемых установок [6] – мельничного типа (рис. 7).

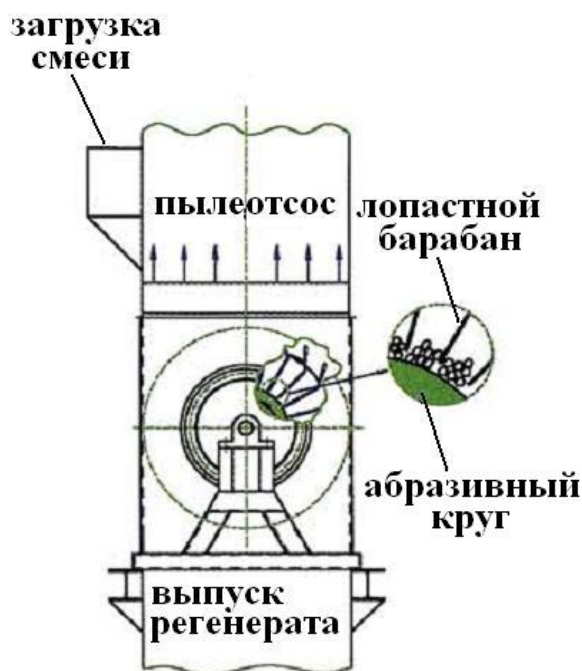


Рис. 7. Схема установки регенерации мельничного типа



Другие способы механической регенерации включают ударное воздействие на смесь в определённых точках, а также воздействие на частицы смеси трением при регулируемом уровне давления. Задача всех установок одна и та же – произвести в достаточной степени эффективное удаление глины и технологических добавок с поверхности зёрен песка, чтобы его можно было использовать далее при производстве стержней по cold-box процессу. Полученный регенерат не используют как 100% зерновой основы стержневой смеси. С учётом довольно высоких потерь при регенерации возврат песка в стержневой смеси составляет 70-75%, остальное – свежий песок.

Даже при использовании небольшого количества такого регенерата в стержневой смеси возрастает потребность во вводе смолы для достижения требуемого уровня механических свойств. Увеличение добавки смолы может возрастать до 50% сверх дозы, потребной в случае работы на 100% свежего песка (рис. 8).

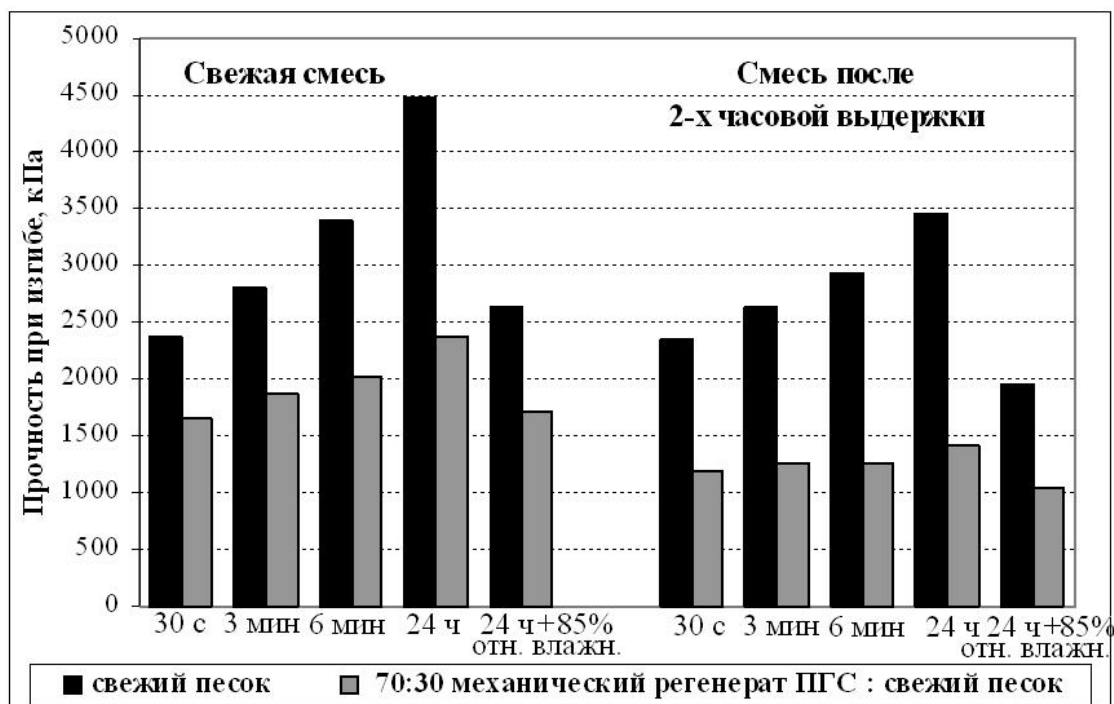


Рис. 8. Прочность при изгибе, полученная на cold-box образцах, изготовленных на основе свежего песка и механически регенерированного из ПГС; добавка смолы в обоих случаях 1,2%, часть 1: часть 2 - 50:50

Прочность смеси, содержащей 70% регенерата, особенно снижается при повышенной влажности. Показали также снижение живучести смеси. Увеличение ввода смолы позволяет частично компенсировать потерю прочности, однако такая мера приводит к повышению финансовых затрат на связующие и усугублению склонности к формированию газовых дефектов отливок. Очевидны и выгодные стороны использования регенерата рассматриваемого типа при производстве cold-box стержней. Экономия от снижения необходимости в утилизации и покупке свежего песка во многих случаях превосходит затраты, связанные с увеличением потребления смолы. Кроме того, наличие остатков ПГС в стержнях, таких как неактивная глина и технологические добавки, снижает склонность к формированию просечек (рис. 9).

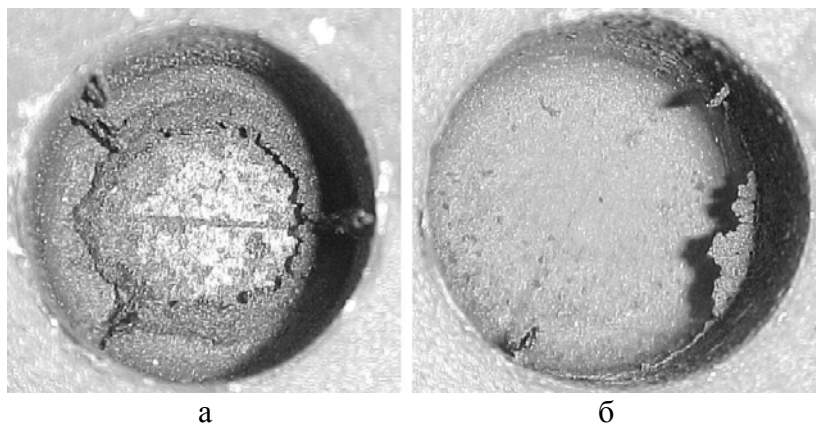


Рис. 9. Тестовые отливки для исследования формирования просечек, изготовленные с применением:  
 а – стержня из свежего песка; б – 70:30 – механический регенерат ПГС: свежий песок (очевидно существенное улучшение в последнем случае; покрытия не применялись)

### Термическая регенерация

Одним из вариантов регенерации является развитие механического способа при использовании термообработки. Целью такой комплексной обработки является полное удаление технологических добавок и разрушение активной глины за счёт устранения связанной влаги. Процесс включает три следующие стадии.

1. Механическая обработка для удаления большей части активной глины и технологических добавок. Мероприятия, производимые на этом этапе, таковы же, как в случае работы лишь с механической регенерацией смеси, но эффективность механической обработки важна не в столь большой степени.
2. Термическая обработка в установке регенерации с кипящим слоем при температуре около 700°C. Это позволяет в полной мере удалить добавки и связанную воду в остатках активной глины.
3. Дополнительная механическая обработка для удаления остатков неактивной глины из смеси.

Благодаря такому способу регенерации удаётся получить весьма чистый песок с минимальным уровнем загрязнений. Механические свойства стержней, изготовленных на основе этого песка, высоки (рис. 10). Значения прочности смеси на основе термического регенерата гораздо выше, чем в случае с механическим регенератом, и близки к полученным на свежем песке. Несколько неожиданно, что прочность образцов на основе термического регенерата после их пребывания в камере с контролируемым уровнем влажности выше, чем показали на таких же образцах на основе свежего песка. Причины этого эффекта не очевидны, но безусловную роль здесь сыграло изменение химического состава поверхности зёрен песка в результате регенерации. Подобные явления отмечались в работе [7], в рамках которой исследовали различные способы воздействий на пески, причём последствия, связанные с изменениями химического состава поверхности зёрен, устойчиво проявлялись даже после многократного отмывания песков в воде.

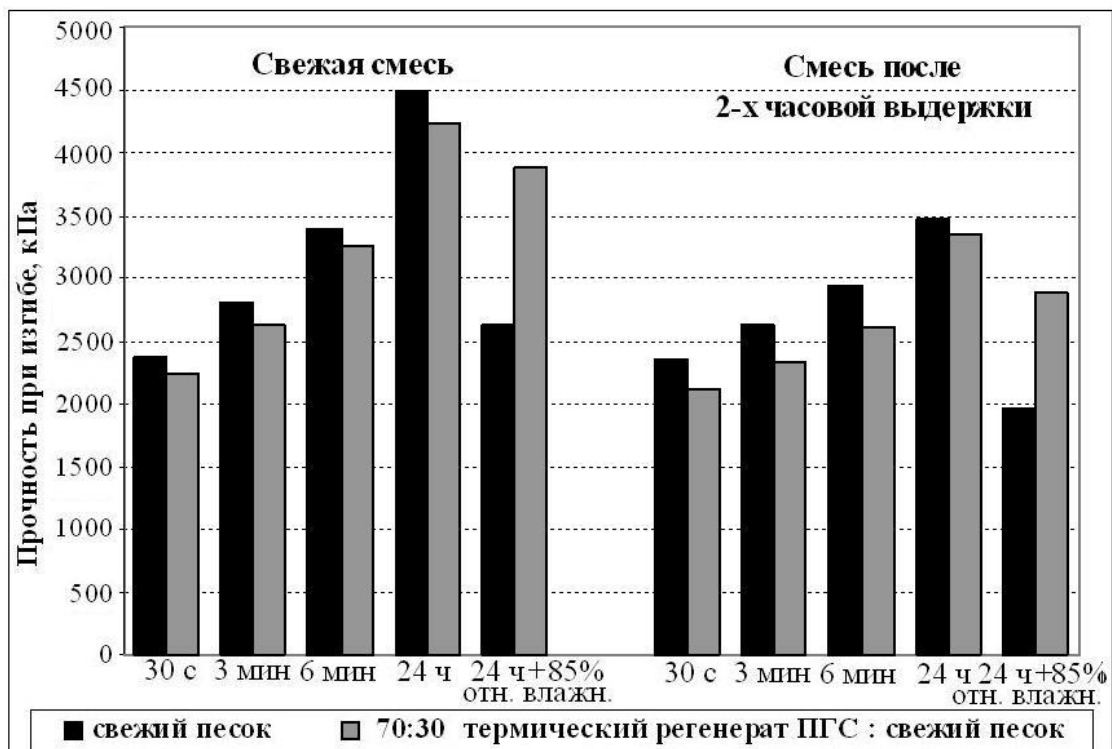


Рис. 10. Прочность при изгибе, полученная на cold-box образцах, изготовленных на основе свежего песка и термически регенерированного из ПГС; добавка смолы в обоих случаях 1,2%, часть 1: часть 2 - 50:50

Отрицательные стороны термической регенерации:

1. высокая стоимость установки регенерации, значительные затраты на её эксплуатацию;
2. при использовании термического регенерата исчезает возможность снижения склонности к формированию просечек, как в случае с механически регенерированным песком.

Слабое или полное отсутствие влияния на улучшение ситуации по просечкам в случае работы с термическим регенератом, очевидно, связано с двумя причинами. Во-первых, термически регенерированный песок не содержит остатков органических веществ, остаточное содержание неактивной глины весьма мало, в то время как именно органические технологические добавки, работая подобно тому, как ведёт себя рекомендуемая для ликвидации просечек добавка угольной пыли [8], помогают предотвращать просечки.

Вторая причина менее очевидна. Некоторая часть кварцевых зёрен, подвергавшаяся после заливки металла нагреву свыше 900°C претерпела превращение до метастабильной структуры – β-тридимита. Охлаждение β-тридимита до 120°C ведёт к быстрому необратимому превращению в α-тридимит. Метастабильный α-тридимит формируется при охлаждении более быстром, чем требуется для получения β-кварца, следующего за α-кварцем. Степень присутствия тридимита может быть косвенно определена путём измерения плотности песка. В среднем, кварцевый песок с 97% SiO<sub>2</sub> со скруглённой формой зёрен и удовлетворительной их сферичностью в условиях естественного уплотнения в засыпке имеет плотность около 1700 кг/м<sup>3</sup>, тогда как для такой же засыпки зёрен α-тридимита характерна будет плотность около 1400 кг/м<sup>3</sup>. Разница в плотностях заметная, что позволяет производить оценку наличия тридимита в песке. Из подобного рода оценочных измерений стало ясно, что термически регенерированный песок либо не содержит тридимита, либо присутствие его минимальное, поскольку плотности свежего и регенерированного песков весьма близки.

Неудивительно, что в термически регенерированном песке нет прироста содержания тридимита, ведь температуры термообработки 650-750°, что ниже, чем требуются для перехода  $\beta$ -кварца в  $\beta$ -тридимит, но выше, чем необходимо для превращения  $\beta$ -тридимита в  $\alpha$ -тридимит. Термообработка ведёт к превращению  $\alpha$ -тридимита в  $\beta$ -тридимит, а затем  $\beta$ -тридимит переходит в  $\beta$ -кварц. При охлаждении  $\beta$ -кварц переходит в  $\alpha$ -кварц.

Автором предпринимались попытки проверить теорию о том, что присутствие тридимита способно снизить склонность к формированию просечек при работе с cold-box стержнями. Была показана довольно слабая эффективность данной меры. При проведении испытаний свежий кварцевый песок нагревали до температуры 1450°C в течение 4 ч, далее следовало быстрое охлаждение. За счёт указанных мероприятий достигали почти полного превращения кварца в тридимит, что подтверждалось соответствующим изменениям плотности.

Для установления эффективных путей борьбы с просечками с использованием превращения кварца в тридимит требуются дополнительные исследования. Если будет подтверждено отсутствие серьёзного влияния на просечки, то сомнению может быть подвергнуто и само общепринятое толкование механизма формирования дефекта, связанное с быстрым обратимым превращением  $\alpha$ -кварца в  $\beta$ -кварц при температуре 573°C.

### **Мокрая регенерация**

Третий способ регенерации ПГС для получения песка, который может быть использован при производстве cold-box стержней, заключается в отмывании частиц смеси водой. Указанный способ регенерации обладает несколькими преимуществами в сравнении с ранее рассмотренными:

1. стоимость проведения процедуры регенерации ниже, чем в случае с механической и термической обработкой;
2. устройство для регенерации требует меньше остановок на ремонт, абразивное воздействие частиц песка компенсируется установкой на неё футерованных резиной деталей;
3. присутствует возможность вносить специальные добавки в промывочную воду, что позволяет, при необходимости, модифицировать химический состав поверхности зёрен песка.

Как и прочие способы регенерации, мокрая регенерация находит промышленное применение. Однако, согласно наблюдениям автора, этот способ регенерации не практикуют на самих литейных предприятиях, а обращаются в соответствующие сторонние организации, которые принимают отработанную смесь, а затем возвращают заказчику отмытый и высушенный песок, готовый к дальнейшему использованию в литейном производстве. Причиной такому порядку работы является дорогостоящая для литейного предприятия очистка сточных вод. Предприятию необходимо делать выбор того, что выгоднее – оплачивать услуги по перевозке отработанной смеси и регенерированного песка или тратить средства на очистку сточных вод.

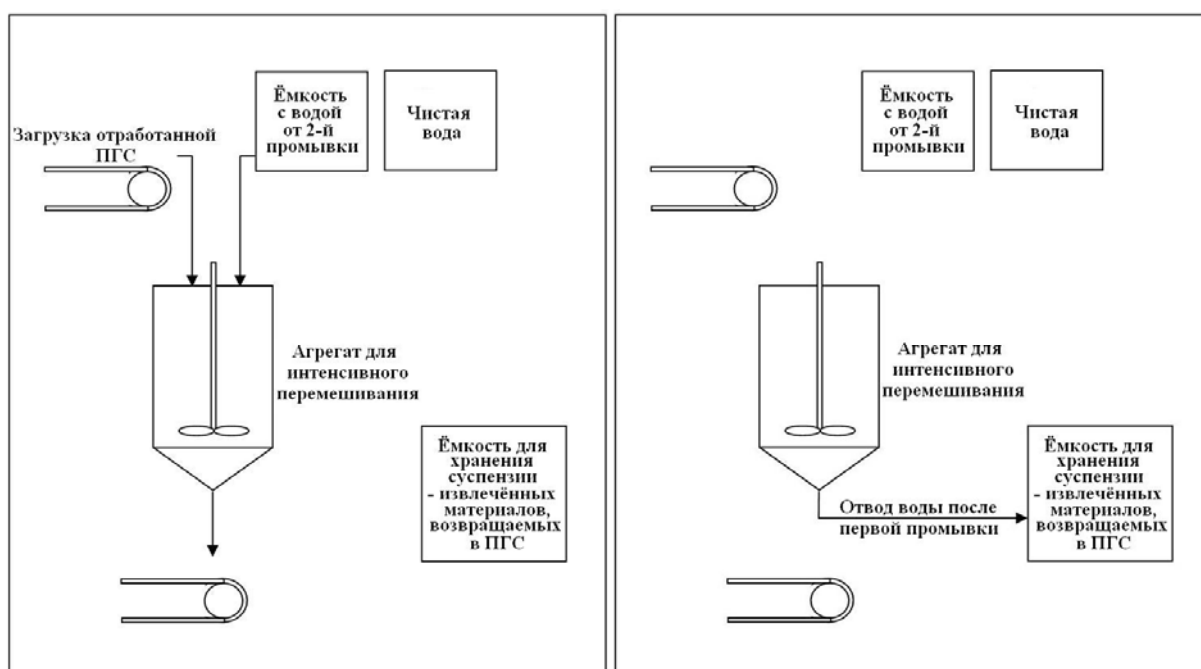
Рассмотрение автором проблемы мокрой регенерации привело к предложению использовать комплекс следующих процедур.

1. В отработанную ПГС добавляется равное количество (по массе) воды, производится тщательное перемешивание. Вещества, влияющие на физико-химические свойства зёрен песка, не добавляются, за исключением лишь небольшого ввода поверхностно-активных веществ, улучшающих смачиваемость.
2. Использованная вода отводится от смеси. Эта вода содержит высокую концентрацию глины и технологических добавок, которые должны повторно использоваться при приготовлении ПГС, наряду с небольшими добавками свежей глины и органического материала. Это возможно в связи с тем, что в получаемом концентрате выдерживается

приемлемое соотношение воды/глины/технологических добавок, следовательно удаётся избежать повышенного ввода воды над уровнем, необходимым для приготовления ПГС.

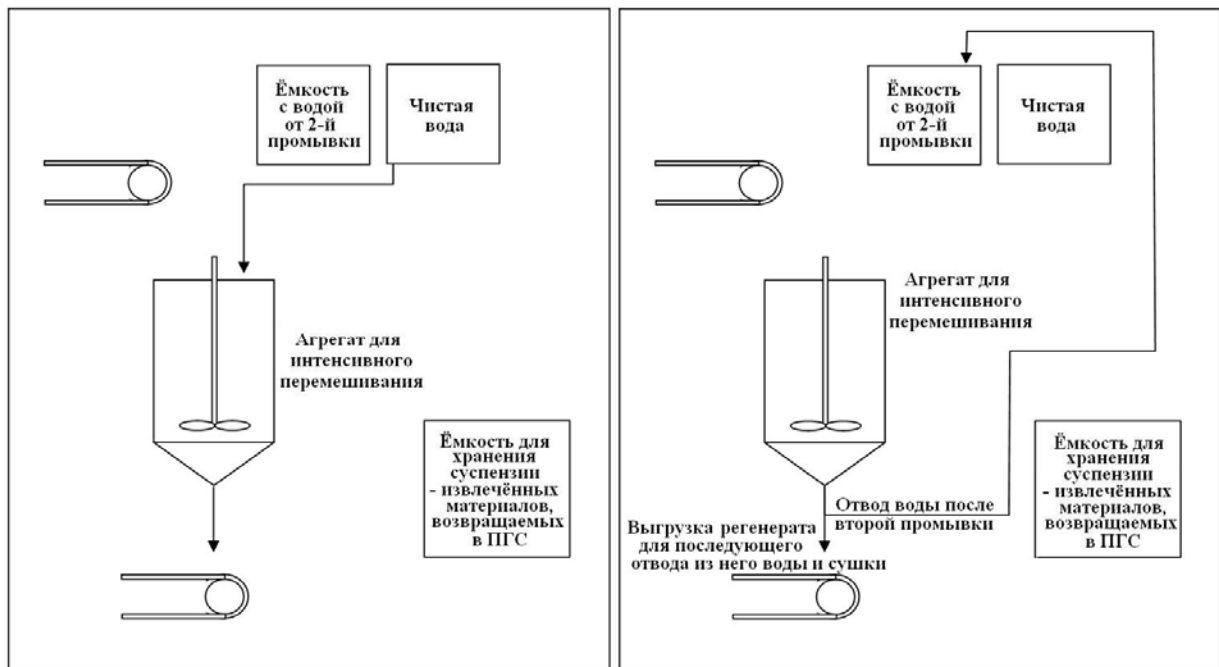
3. Очередная промывка смеси следует за сушкой после первой промывки. На втором этапе используется то же количество воды, что и на первом. Это позволяет получить довольно чистый регенерат для использования при изготовлении cold-box стержней в соотношении 70% регенерированный песок и 30% – свежий песок.
4. Вода после второй промывки используется при первичной промывке следующей порции отработанной ПГС. За счёт этого достигается повышение концентрации глины и технологических добавок в воде после первой промывки. Концентрация указанных материалов достаточно высока, извлечённые вещества выступают в качестве частичной добавки в бегуны при приготовлении ПГС. Возврат возможен в значительной мере, что выгодно, поскольку в противном случае необходимо было бы использовать свежие материалы.
5. Из отмытой смеси затем отводится вода, регенерат сушится, желательно, с использованием установок с кипящим слоем, работающих на газе.

Схематически процесс представлен на рис. 11.



а

б



В

Г

Рис. 11. Схема процесса мокрой регенерации ПГС:

а – первый этап (промывка смеси водой, отведённой после регенерации предыдущей порции); б – второй этап (отвод воды после первой промывки в специальную ёмкость для хранения отделённого возвратного материала); в – третий этап (промывка чистой водой); г – четвёртый этап (отвод воды для последующего использования при первой промывке следующей порции смеси и выгрузка регенерата)

Эффективность удаления с поверхности зёрен песка глины и технологических добавок при мокрой регенерации примерно такова же, как при механической регенерации, но потери песка гораздо ниже и пыли образуется намного меньше.

Для регенерированного путём отмывания песка характерно небольшое повышение потребности в кислоте и снижение живучести песчано-смоляной смеси для cold-box. Добавка кислоты при промывке невозможна, ведь извлечённые материалы будут вновь использоваться при приготовлении ПГС, к тому же на практике подобные мероприятия несущественно повышали живучесть песчано-смоляной смеси, несмотря на небольшое снижение потребности в кислоте. В качестве более действенной меры производили изменения в рецептуре самой фенольно-уретановой смолы, что позволило заметно повысить живучесть смесей на основе такого регенерата, а также повысить устойчивость стержней к воздействию влаги. Альтернативные рецептуры смол позволяют получить высокую моментальную прочность, но при этом живучесть смеси и устойчивость стержней к воздействию влаги низкие. После мокрой регенерации становится возможным при изготовлении стержней повторно использовать 60-75% песка. Эффект снижения склонности к формированию просечек присутствует, как и в случае использования механически регенерированного песка.

Капиталовложения при работе с мокрой регенерацией в наибольшей степени зависят от потребности в утилизации воды и необходимости сушки песка. Установки для мокрой регенерации, контейнеры и трубопроводы – всё это простые объекты и большинство мероприятий по их установке может быть произведено без привлечения специалистов извне, под руководством самих инженеров-литейщиков. Очевидно, что капиталовложения будут гораздо меньшими, чем в случае использования комбинированной механической/термической/механической обработки и близки (либо чуть выше) к тем, что требуются при работе с механической регенерацией. Среди выгодных сторон мокрой регенерации – довольно лёгкое извлечение глины и технологических добавок в форме суспензии, подходящей для непосредственного

внесения в ПГС без ввода излишка воды, что снижает трудоёмкость и стоимость операций по приготовлению смеси.

## ВЫВОДЫ

Высокий уровень засорения отработанной cold-box стержневой смесью способен привести к снижению свойств ОС и проблемам в управлении ими. Подобное засорение смеси можно отождествить с избыточным вводом свежего песка в ОС, что снижает относительное содержание неактивной глины и технологических добавок. В результате ухудшается формуемость смеси, возможен ввод меньшего количества воды, интервал варьирования содержания влаги сужается. Сушка формы влечёт за собой разрыхление структуры смеси, что отражается на чистоте поверхности отливок. Недостаток неактивной глины снижает прочность смеси, причём сопротивляемость ударным нагрузкам высока, а прочность на сжатие низкая, если только добавка воды не будет очень небольшой. В конечном счете, всё это приводит к осложнению управления свойствами ОС и поддержания их стабильности.

Другие возможные явление, связанные с рассмотренным засорением ОС – повышение содержания азота в смеси и накопление в ней веществ с высокой точкой кипения. Проблема с накоплением азота проявляется лишь в случае, когда для компенсации последствий засорения в ОС производят добавку пылевидных фракций, уловленных вытяжной вентиляцией. С одной стороны, эта мера улучшает формуемость, позволяет снизить ввод глины и технологических добавок. Опасность же представляет то, что на поверхности этих частиц, присутствовавших в смеси на протяжении большого числа циклов и вновь уловленных вытяжной вентиляцией, накапливается значительная концентрация азота, в связи с чем возможно появление соответствующих дефектов отливок. Содержание азота в ОС должно непрерывно контролироваться, если практикуется добавление пылевидных фракций. Проблема накопления веществ с высокой точкой кипения решается проще – необходимо минимизировать использование связующих систем, содержащих соответствующие растворители. Развитие связанных с этим вредных последствий можно контролировать, регулярно производя испытания ПГС на прочность влажной зоны. Это позволит отследить появление дефектов, связанных с разрушением формы в этой ослабленной зоне, расположенной за поверхностью формы. Склонность к формированию газовых дефектов также может быть отслежена посредством лабораторного контроля при помощи теста на газотворность.

Один из вариантов уменьшения количества отработанной стержневой смеси, попадающей в ОС – понижать выбиваемость фенольно-уретановых cold-box стержней. В некоторых случаях крупные стержни могут выбиваться из отливок уже после того, как отливки извлечены из формы. В случае, когда это невозможно, можно повышать остаточную прочность стержней с помощью специальных добавок. Однако ни одна из известных на сегодняшний день соответствующих добавок не работает достаточно эффективно.

Мероприятием, компенсирующим последствия засорения ОС, является регенерация излишков смеси с целью получения зерновой основы, пригодной для использования при изготовлении cold-box стержней (обычно около 70%, остальное – свежий песок). Если метод регенерации позволяет восстановить некоторое количество глины и технологических добавок, то удаётся в ещё большей мере компенсировать отрицательные стороны засорения. Очевидно, что механическая и мокрая регенерация позволяют получить максимальный экономический эффект, в то время как комбинация механической, термической и завершающей механической обработки смеси хоть и ведёт к получению зерновой основы высокого качества, но снижает потенциал повторного использования добавок в ПГС. Многие свойства стержней, изготовленных на основе песка после комбинированной регенерации и из свежего песка, сходны. Установка в форму тех и других стержней не оказывает положительного эффекта в условиях

формирования дефектов отливок, связанных с термическим расширением зёрен песка, таких как просечки и др.

Безусловно, существует один вариант кардинального решения проблемы – вовсе не использовать ПГС, производя формы из химически твердеющих смесей [9]. В некоторых случаях и сами формы можно изготавливать по cold-box процессу. Имеются многочисленные примеры литейных производств, на которых такой способ производства форм показал высокую экономическую эффективность.

### Литература

1. Naro R., Plummer J., Zeh T.J. Influence of no-bake core sand contamination on the properties of green moulding sands. //Transactions of the American Foundryman's Society, 1979, vol. 87, p. 39-46
2. Boenish D. The effects of cold-box, hot-box and Croning cores on the properties of bentonite-bonded moulding sands. //Giesserei, 1977, 13th October, vol. 64, no. 21, p. 549-554
3. Brümmer E., Lautzus W. Effect of coresands on bentonite-bonded system sand. //Giesserei, 1977, 10th November, vol. 64, no.23, p. 612-616
4. Rickards P. J. Effect of phenolic urethane core residues in greensand mixtures. //BCIRA Journal, 1983, March, BCIRA Report no. 1515.
5. Parkes W.B. Clay bonded foundry sands. Applied Science Ltd, 1971.
6. Gielissen H. //Greensand reclamation – a decade of experience. //Foundry Trade Journal, 2002, February 2002, p. 7-11
7. Simmons R.E., Sturdy S.E., Ball M.C. The surface chemistry of silica sand and it's influence on the strength development of foundry resin-bonded sands. //Foundry Trade Journal, 1995, March, p. 122-125
8. Бусби Э.Д. Предотвращение просечек при изготовлении отливок из черных металлов с применением фенольно-уретановых cold-box стержней. //Литейщик России, 2009, № 3, с. 19-24; №4, с. 45-47; №5, с. 41-45
9. Бусби Э.Д., Арчибальд Дж.Дж. Получение отливок повышенной точности в формах, изготовленных с использованием технологии cold-box. //Литейщик России, 2008, № 10, с. 13-18

Перевод – Бройтман О.А.  
(Российское представительство Ashland Casting Solutions)