

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ,  
ТЕРМИЧЕСКИХ И КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ  
РЕГЕНЕРАЦИИ ФОРМОВОЧНОГО ПЕСКА В ЛИТЕЙНОМ  
ПРОИЗВОДСТВЕ**

**Булышко М.А., магистрант**

**Научный руководитель Хрипович А.А.**

**Белорусский национальный технический университет, Беларусь**

*В статье рассмотрена проблема накопления отработанных формовочных смесей в литейном производстве. Проведён сравнительный анализ механического, термического и комбинированного методов регенерации кварцевого песка. Описаны принципы процессов, их преимущества, недостатки и области применения. Показано, что выбор метода определяется типом связующего и требованиями к качеству регенерата.*

*Ключевые слова: литейное производство, регенерация песка, механическая регенерация, термическая регенерация, комбинированная регенерация, отработанная формовочная смесь, регенерат, холоднотвердеющие смеси.*

Литьё в песчаные формы является одним из наиболее традиционных и широко используемых процессов в металлургии. Процесс включает уплотнение песка вокруг модели для создания формы, заливку расплавленного металла в полость, а затем разрушение формы после затвердевания для извлечения отливки. Благодаря своей простоте и экономичности, этот метод часто применяется в сельском хозяйстве, горнодобывающей промышленности, строительстве и общем машиностроении для крупных сложных деталей, изготавливаемых в малых и средних объемах.

Основной проблемой остаётся высокое потребление ресурсов по причине того, что для каждого цикла литья создаётся новая форма, которая подлежит утилизации после заливки металла. Связующие материалы дезактивируются при воздействии высокой температуры расплавленного металла, образуя на поверхности песчаных зёрен прочно или слабо связанные отложения, из-за чего песок становится непригодным для немедленного повторного использования [1]. Постоянное изъятие нового песка из природной среды ведёт к истощению ресурсов, а его захоронение – к значительным экономическим и экологическим издержкам.

Состав отработанного формовочного песка (ОФС) варьируется в зависимости от технологии. Традиционно он включает кварцевую основу, остатки глины (в случае сырых смесей), продукты пиролиза органических смол (фуран, фенол, уретан) и включения металлов. При захоронении эти компоненты, особенно тяжёлые металлы, могут мигрировать в почву и

грунтовые воды, накапливаться в экосистемах. В связи с этим утилизация ОФС является одной из серьёзных задач современной литейной промышленности [2].

В данной работе проведён сравнительный анализ основных методов регенерации: механического, термического и комбинированного.

*Механическая регенерация* является наиболее распространённым и экономически доступным способом подготовки отработанных формовочных смесей к повторному использованию. Принцип данного метода заключается в дезинтеграции – разрушении адгезионных связей между кварцевым зерном и остаточными плёнками связующего под действием ударных и истирающих нагрузок.

После выбивки отливок из форм отработанная смесь содержит крупные спекшиеся комья, фрагменты стержней и металлические включения (дробь, облой). На начальном этапе смесь подаётся на валковую дробилку, где происходит размалывание комьев до первичного состояния. Затем материал проходит через магнитную сепарацию, которая является обязательным элементом любой системы регенерации. Извлечённый металлический лом возвращается в плавильное производство.

На стадии основной оттирки происходит непосредственное удаление связующего с поверхности зёрен. Наибольшее распространение в современной практике получили пневматические регенераторы и ударно-центробежные установки.

В пневматических регенераторах частицы смеси разгоняются сжатым воздухом в вертикальной трубе и с высокой скоростью ударяются об отражательную плиту. Разрушение связей между кварцевым песком и связующим материалом происходит вследствие удара ускоренных частиц смеси об отбойный элемент, а также за счёт взаимодействия частиц в динамическом слое регенерируемого материала [3].

В ударно-центробежных установках материал подаётся на быстро вращающийся ротор с лопатками, откуда отбрасывается на неподвижную обечайку. При соударении и истирании происходит разрушение непрочных связей. Этот тип оборудования часто применяется для смесей на органических связующих, где требуется более интенсивное воздействие.

После оттирки смесь представляет собой полидисперсную систему, содержащую кондиционные зёрна песка и пылевидную фракцию – разрушенное связующее. В современных установках для сепарации используется противоточный воздушный поток, благодаря которому смесь подаётся снизу, тяжёлые зёрна песка оседают, а лёгкая пыль уносится в циклон или рукавный фильтр [4].

Механический метод регенерации отличается относительной дешевизной оборудования, низким энергопотреблением и отсутствием

необходимости в сушке материала. Данный метод характеризуется отсутствием выбросов продуктов сгорания, как при термическом обжиге, он прост в эксплуатации, и имеется возможность быстрого его включения в существующую технологическую цепочку. Механически регенерированный песок может использоваться для приготовления единой формовочной смеси без существенного снижения её свойств [4]. Однако, механическая обработка не способна полностью удалить прочные органические плёнки от синтетических смол, а также приводит к постепенному истиранию самих песчаных зёрен с накоплением пылевидной фракции. Песок выдерживает ограниченное количество циклов регенерации, после чего требует освежения большими добавками нового материала. Метод малоэффективен для смешанных потоков, содержащих одновременно глину и органику.

*Термический метод регенерации* нацелен на химическое разрушение и удаление органических компонентов связующих. Этот подход считается наиболее эффективным для восстановления песков, используемых в технологиях холоднотвердеемых смесей (ХТС), где остатки смолы могут привести к браку отливок по газовым дефектам.

Термическая регенерация основана на высокотемпературном окислении органических плёнок, покрывающих кварцевые зёрна. Процесс проводят в окислительной атмосфере с избытком кислорода воздуха при температурах 700-900 °С. Наиболее эффективным и распространённым оборудованием для термической регенерации являются печи с псевдооживленным слоем.

Перед подачей в печь песок должен быть очищен от металлических включений магнитной сепарацией и крупных комьев дроблением. Некоторые системы включают начальную механическую оттирку для удаления основной массы бентонита (в случае смешанных потоков), чтобы снизить нагрузку на термическую стадию. Песок подаётся в реактор с кипящим слоем, где он разогревается до рабочей температуры за счёт сжигания природного газа в воздушном потоке, проходящем через слой. Во время пребывания материала в зоне высоких температур происходит полное выгорание органики. Раскалённый песок должен быть быстро охлаждён до температуры, пригодной для смешеприготовления. После охлаждения песок может содержать разрушенные мелкие частицы, которые удаляют с помощью воздушной сепарации.

Термическая регенерация характеризуется наивысшим качеством регенерата. Термически регенерированный песок по свойствам близок к свежему кварцевому песку и может выдерживать десятки циклов регенерации без существенной деградации, поскольку термическая обработка восстанавливает зерно до исходного состояния. Данный метод одинаково

эффективен для фурановых, фенольных, уретановых и любых других органических связующих.

Основные барьеры для широкого внедрения термической регенерации связаны с высокими капитальными затратами на оборудование и значительный расход топлива. Однако современные установки с рекуперацией тепла позволяют снизить энергопотребление. При перегреве или неравномерном нагреве на поверхности зёрен может образоваться легкоплавкий силикатный расплав, который при охлаждении образует из частиц крупные спекшиеся комья, которые необходимо дополнительно просеивать. После просеивания необходимо классифицировать и отделять мелкие фракции зерен. Для песчано-глинистых систем термический метод рекомендуется только в комбинации с предварительной механической оттиркой (удалением большей части глины).

*Комбинированная регенерация* является оптимальным решением для сложных смешанных потоков, образующихся на большинстве современных литейных заводов, где одновременно используются и песчано-глинистые формы, и стержни из ХТС

Комбинированная регенерация основана на последовательном применении механических и термических воздействий в определённом порядке. Наиболее эффективной для смешанных органическо-бентонитовых песков является трёхстадийная схема: механическая очистка – термическая обработка – механическая очистка [4].

В технологическом процессе термической регенерации отработанная смесь, содержащая глинистую составляющую и органические остатки от стержней, поступает на механическую обработку. В процессе данного метода происходит удаление основной массы глинистой составляющей и снижение влажности материала для подготовки к высокотемпературной обработке. Предварительно очищенный песок направляется в печь с псевдооживленным слоем для нагревания. На этом этапе происходит полное выгорание органических остатков от стержневых смесей и дополнительное растрескивание остаточных глинистых корок, которые не были удалены механически. После термической обработки песок охлаждается и поступает на заключительный этап механического воздействия, где происходит окончательное удаление хрупких спекшихся глинистых остатков, выполняется интенсивное обеспыливание и контроль качества регенерата.

Термомеханический метод регенерации обеспечивает максимальную степень очистки песка, недостижимую для каждого из методов по отдельности, и позволяет возвращать в производство практически весь объём переработанного материала. Он универсален для любых типов смесей, а песок выдерживает многократные циклы использования без заметной деградации свойств. Однако метод требует высоких капитальных затрат на оборудование,

отличается повышенным энергопотреблением и значительными потерями песка на истирание. Его эксплуатация сложна и требует высокой квалификации персонала, а экономическая целесообразность достигается только при достаточно больших объёмах переработки.

Вывод. Выбор метода регенерации определяется типом используемого связующего и экономической целесообразностью. Для предприятий, работающих на песчано-глинистых смесях, экономически оправдано применение механической регенерации с развитой системой обеспыливания. Для производств, использующих сложные стержневые смеси на органических смолах, необходима термическая или комбинированная регенерация для обеспечения высокого качества регенерата. Внедрение регенерации позволяет сократить закупку свежего песка на 90-95% и минимизировать экологический ущерб от захоронения отходов.

### **Литература:**

1. Khan M.M., Mahajani S.M., Jadhav G.N., Vishwakarma R., Malgaonkar V., Mandre S. Mechanical and thermal methods for reclamation of waste foundry sand // *Journal of Environmental Management*. – 2021. – Vol. 279. – Article number 111628. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030147972031553X> (дата обращения: 14.04.2026).

2. Дубровин В.К., Кулаков Б.А., Карпинский А.В., Дубровина А.В. Влияние оборотной формовочной смеси на качество отливок // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия»*. – 2014. – Т. 14, № 2. – С. 35–40.

3. Кукуй Д.М., Одиночко В.Ф., Кирилов И.В., Бусел А.В., Воробьёв В.В., Коренюк Г.С. Исследование возможности регенерации формовочных песков из отвалных смесей литейного производства и использования отходов регенерации // *Литьё и металлургия*. – 2009. – № 3 (52). – С. 34–36.

4. Łucarz M. Thermal Regeneration of Spent Sand with Furfuryl Binder from an Ecological and Economic Point of View // *Materials*. – 2023. – Vol. 16, No. 22. – Article number 7102. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/22/7102> (дата обращения: 14.04.2026).