

УДК 669:621.1

## АНАЛИЗ СПОСОБОВ РАЗОГРЕВА ФУТЕРОВКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АГРЕГАТОВ

Приведен анализ способов повышения температуры футеровки при ее сушке и разогреве. Рассмотрены три варианта повышения температуры: максимально возможная скорость разогрева вначале и ее дальнейшее снижение, средняя скорость разогрева, а также минимальная скорость разогрева вначале и ее дальнейшее увеличение до максимальной. Показано, что для сохранения возникающих температурных напряжений не выше предела прочности материала более эффективен вариант разогрева с максимально возможной скоростью вначале и ее дальнейшим снижением.

**Ключевые слова:** *сушка и разогрев футеровки, высокотемпературные агрегаты (ВТА), скорость повышения температуры.*

### ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние экономики металлургической отрасли и рост конкуренции на мировом рынке предполагают постоянный поиск путей снижения себестоимости продукции для предприятий. Поэтому на первый план выходят ресурсо- энергосберегающие технологии, позволяющие добиваться сокращения себестоимости продукции при минимальных капитальных вложениях или без них. В области повышения стойкости футеровки высокотемпературных агрегатов к таким технологиям в первую очередь стоит отнести рационализацию режимов сушки и разогрева футеровки. При отсутствии капитальных затрат на реализацию рационализация этих режимов позволяет снижать затраты энергоресурсов (за счет снижения времени нагрева), сокращать расход огнеупорных материалов (за счет увеличения стойкости футеровки) и, возможно, привести к снижению парка оборудования (например, разливочных ковшей).

Повышение скорости разогрева ограничивается возможностями применяемых огнеупорных материалов. При превышении предела прочности материала возникающими температурными напряжениями происходит его разрушение. При сушке в процессе удаления влаги ситуация усугубляется дополнительными на-

пряжениями, связанными с прохождением пара через огнеупорный материал. Для снижения этих воздействий на футеровку в ряде случаев на время удаления влаги снижают интенсивность нагрева — применяют температурную выдержку (полочку).

Для многих предприятий выбор максимальной скорости разогрева определяется заводской инструкцией к материалу и процессу футеровки. В статье [1] рекомендуется разогревать футеровку сталеразливочного ковша, выполненную из штучных огнеупоров, с постоянной скоростью, допустимой для данного типа огнеупора, 30–50 °С/ч до температуры приема металла 1200 °С. При этом не предусматривается выдержка при температуре удаления физической и химически связанной влаги.

В работе [2] исследовали КПД стэнда для разогрева ковшей в зависимости от скорости разогрева. При увеличении скорости разогрева от 30 до 80–150 °С/ч (в зависимости от емкости ковша) наблюдается рост КПД, далее при более высоких скоростях разогрева КПД снижается. При этом скорость разогрева постоянная, рассматривается только эффективность процесса разогрева. Учет возникающих температурных напряжений производится по условиям отсутствия трещинообразования при скорости разогрева алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров до 60–100 °С/ч.

Авторы статьи [3] исследовали зависимость значений температурных напряжений, возникающих в процессе разогрева футеровки, от скорости подъема температуры и плотности швов между отдельными элементами футеровки. Исследования проводятся при различных, но постоянных скоростях нагрева.



Е. В. Приходько  
E-mail: john1380@mail.ru

В статье [4] предложено для разогрева сталеразливочных ковшей использовать линейный рост температуры: на участке от 30 до 650 °С со скоростью 77,5 °С/ч, на участке от 650 до 1100 °С — 56,25 °С/ч при одной выдержке в течение 4 ч на уровне 650 °С.

В ряде работ представлены графики для разогрева футеровки, включающие несколько участков выдержки. В работе [5] для разогрева конвертера предложено применять выдержки: при 100 °С (удаление свободной влаги), 300 °С (спекание раствора) и 700 °С (удаление кристаллизационной влаги). Характер подъема температуры на каждом участке линейный со скоростями от 25 до 50 °С/ч.

Аналогично в работах [6, 7] предложена первая выдержка при температуре около 110 °С (удаление физической влаги) и вторая выдержка (технологическая или удаление химически связанной влаги). Участков выдержки, включая технологические, может быть четыре и более [8].

Уровень температуры для удаления влаги зависит от материала футеровки и может изменяться в широких пределах. В статье [9] удаление физической влаги производили при 200 °С и выше.

Проведенный анализ показывает, что все графики разогрева футеровки высокотемпературных агрегатов имеют линейный или кусочно-линейный характер. Выдержки предусмотрены для удаления влаги либо для технологических процессов, в ряде случаев для релаксации возникающих температурных напряжений. При этом не рассматриваются графики разогрева, имеющие нелинейный характер. Цель настоящей работы — проведение сравнительного анализа нескольких вариантов разогрева футеровки высокотемпературного агрегата. Сравнение проведено по критерию минимальных затрат времени при соблюдении условия сохранения возникающих температурных напряжений не выше предела прочности материала.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рациональный разогрев футеровки предполагает минимальные затраты времени на этот процесс, что подразумевает максимально возможные скорости подъема температуры в процессе разогрева. При этом в процессе разогрева необходимо учитывать затраты времени на процесс сушки для удаления влаги.

Предложено, что в холодном состоянии в футеровке высокотемпературного агрегата нет температурных напряжений вследствие отсутствия разности температур по толщине. В ходе процесса разогрева появляются температурные напряжения за счет неравномерного нагре-

ва футеровки по толщине из-за теплового сопротивления материала. В начальный момент времени растут напряжения сжатия в области более высоких температур, затем по мере разогрева футеровки начинают увеличиваться значения напряжений растяжения.

Для каждого материала (в соответствии с его теплофизическими свойствами) имеется значение скорости подъема температуры, при котором возникающие температурные напряжения будут оставаться на одном уровне. Эту скорость можно считать средней скоростью разогрева без учета зависимости свойств применяемых материалов от температуры и необходимости в выдержке футеровки при постоянной температуре при ведении процесса сушки.

При остановке разогрева (выдержке при заданной температуре), например в процессе сушки, значение напряжений начинает снижаться из-за их релаксации. Данный процесс на графике разогрева отображается в виде горизонтального отрезка и называется полочкой. То есть выдержка при определенной температуре в процессе сушки выполняет функции не только ограничения подъема температуры в процессе интенсивного испарения влаги, но и снижения имеющихся напряжений. На ряде агрегатов выдержка выполняет функцию только релаксации напряжений.

Для анализа вариантов разогрева футеровки высокотемпературных агрегатов использовали программу, разработанную на основе математической модели [10]. Программа рассчитывает распределение температур по сечению футеровки и возникающие температурные напряжения при вводе температуры внутренней поверхности футеровки. Таким образом, зная предел прочности используемого огнеупорного материала, можно построить графики разогрева футеровки с разными скоростями и выбрать способ с минимальными затратами времени.

Рассмотрим первоначальный участок разогрева футеровки — от холодного состояния (20 °С) до первой выдержки (удаление внешней влаги при 110 °С) — на примере футеровки из шамотного материала (ШЦУ) толщиной 230 мм. Повышение температуры можно вести разными способами:

– первый способ — повышение температуры с максимальной скоростью (60 °С/ч [5, 6, 11]) от холодного состояния (20 °С). Ограничение скорости разогрева производили, когда значения возникающих температурных напряжений (сжатия или растяжения) достигали значения предела прочности при сжатии шамота;

– второй способ — нагрев от 20 до 110 °С с постоянной скоростью подъема температуры внутренней поверхности футеровки на протяжении всего времени. Значение средней скорости при

разогреве определяли как среднеарифметическое значение скорости разогрева из первого способа;

– третий способ — первоначальный разогрев с минимальными скоростями и дальнейший разогрев с максимальными скоростями, то есть способ, обратный первому.

Результаты расчетов показаны на рис. 1. Кривая 1 соответствует первому способу разогрева, при котором общее время разогрева футеровки до 110 °С оказалось минимальным. Для принятых начальных условий максимальную скорость разогрева можно держать только первые 50 мин, далее при сохранении максимальной скорости возникающие напряжения сжатия начинают превышать предел прочности при сжатии ШЦУ (30 МПа). Дальнейший нагрев до 110 °С необходимо проводить со средней скоростью около 18,5 °С/ч. Время выхода на заданную температуру 110 °С — 2 ч 30 мин.

Кривая 2, соответствующая второму способу разогрева, показывает, что даже среднюю скорость (принята 36 °С/ч) не удастся сохранять на протяжении разогрева от 20 до 110 °С. Значение средней скорости удовлетворяет условию по возникающим напряжениям только 1 ч 50 мин (до температуры внутренней поверхности стенки 86 °С), затем средняя скорость падает до 18 °С/ч. Время выхода на заданную температуру 110 °С — 3 ч 10 мин.

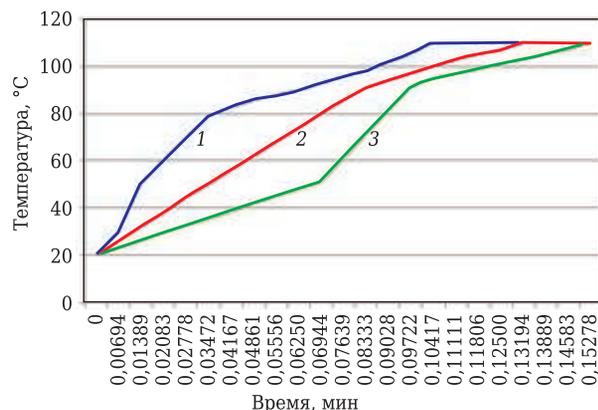


Рис. 1. Разогрев футеровки из шамота ШЦУ по первому (1), второму (2) и третьему способам (3)

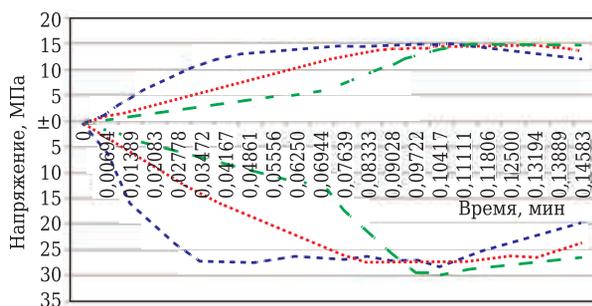


Рис. 2. Возникающие температурные напряжения при разогреве с разными скоростями (напряжения сжатия — со знаком минус)

Разогрев в соответствии с кривой 3 (третий способ разогрева) после повышения температуры со скоростью 18,5 °С/ч в течение 1 ч 40 мин дает возможность вести разогрев с дальнейшей максимальной скоростью (60 °С/ч) всего лишь в течение 40 мин с последующим резким снижением скорости до 14,25 °С/ч. Время выхода на заданную температуру 110 °С — 3 ч 40 мин.

При нагреве в первую очередь происходит рост напряжений сжатия на внутренней поверхности футеровки (рис. 2). Напряжения растяжения растут практически теми же темпами, но со сдвигом по времени. Поэтому при разработке графика разогрева основным фактором являлись значения напряжения сжатия. При этом для недопущения превышения предела прочности при сжатии используемого материала необходимо было снижать скорость разогрева до достижения возникающими напряжениями значений предела прочности при сжатии.

Таким образом, быстрее всего вести процесс разогрева на участке с максимальной возможной скоростью вначале, снижая ее в момент времени, когда возникающие температурные напряжения в зоне сжатия достигнут значений предела прочности при сжатии (первый способ). При разогреве стенки футеровки в первую очередь повышается температура внутренней поверхности стенки. Таким образом, возникающие напряжения в начальной стадии разогрева больше в области сжатия. С учетом того, что предел прочности материала при сжатии в два-три раза выше предела прочности при растяжении, на начальной стадии разогрева можно разогревать на максимальных скоростях. Затем начинают параллельно идти два процесса: накопление напряжений в области сжатия и повышение напряжения в области растяжения (в связи с прогревом кладки вглубь). Накопление напряжений в области сжатия (значения напряжения сжатия в крайней точке доходят до предела прочности при сжатии) через некоторое время приводит к необходимости снижения температуры греющей среды.

Интерес также представляет участок разогрева после окончания процесса сушки. Начальные условия распределения температур и напряжений по толщине футеровки здесь отличаются от распределений в холодном состоянии. На рис. 3 показаны графики распределения температур и напряжений по сечению футеровки после проведения процесса сушки в течение 8 ч.

На основании начальных данных о значениях температур и напряжений в момент времени после проведения сушки были построены графики разогрева футеровки для следующих 2 ч процесса. Графики строили по вышеука-

занным вариантам: первый вариант — максимальная скорость вначале, второй — средняя скорость во время всего процесса разогрева и третий — обратный первому (рис. 4).

В первом варианте процесс разогрева с максимальной скоростью 60 °С/ч удается вести только первые 30 мин, затем скорость уменьшается до 24 °С/ч в течение 10 мин. Далее устанавливается скорость разогрева 12 °С/ч. Во втором варианте средняя скорость 36 °С/ч может поддерживаться первые 50 мин, далее устанавливается скорость разогрева 12 °С/ч. Реализация третьего варианта предполагает разогрев при скорости 12 °С/ч первые 50 мин, далее максимальная скорость 60 °С/ч может поддерживаться только 20 мин. Затем после 10-мин разогрева со скоростью 24 °С/ч кривая выходит на прямолинейный участок со скоростью 12 °С/ч.

Спустя 2 ч разогрева после проведения процесса сушки температура для первого варианта процесса разогрева составляет 160 °С, для второго 154 °С и для третьего 152 °С. При этом к моменту времени 1 ч 30 мин после сушки скорость повышения температуры одинакова по всем трем вариантам (12 °С/ч).

Как для начального участка разогрева (с холодной футеровкой), так и для участка разогрева после проведения процесса сушки (с начальным распределением температур и напряжений, отличающимся от распределения в холодном состоянии) разогрев быстрее всего вести по принципу — максимально возможная скорость вначале и ее снижение из условия сохранения возникающих температурных напряжений не выше предела прочности материала при сжатии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для рассматриваемых высокотемпературных агрегатов достаточно зависимости предела проч-

### Библиографический список

1. Герасименко, В. Г. Особенности введения в эксплуатацию футеровки сталеразливочных ковшей / В. Г. Герасименко, Е. В. Синегин, Л. С. Молчанов [и др.] // Металл и литье Украины. — 2018. — № 5/6. — С. 46–51.
2. Запольская, Е. М. Исследование влияния температурных режимов на параметры тепловой работы стенок разогрева футеровок сталеразливочных ковшей / Е. М. Запольская, М. В. Темлянцев, А. В. Григорьев // Вестник СибГИУ. — 2019. — № 2. — С. 7–10.
3. Ramanenka, D. Influence of heating and cooling rate on the stress state of the brick lining in a rotary kiln using finite element simulations / D. Ramanenka, G. Gustafsson, P. Jonsén // Engineering Failure Analysis. — 2019. — Vol. 105. — P. 98–109.
4. Бейцун, С. В. Исследование на компьютерной модели разогрева сталеразливочных ковшей / С. В. Бейцун, Н. В. Михайловский, В. Ю. Мурдый // Вісник

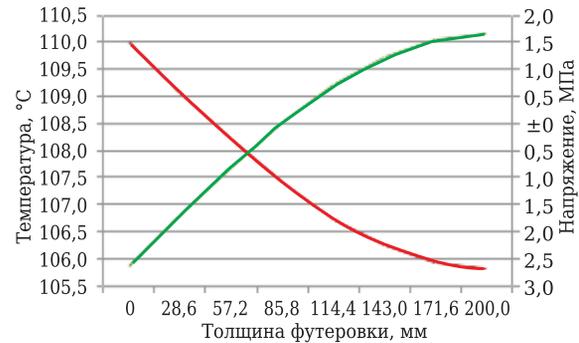


Рис. 3. Начальные условия для разогрева после выдержки при 110 °С

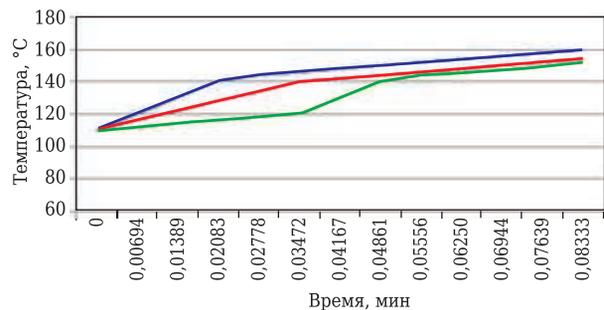


Рис. 4. Разогрева футеровки после выдержки при 110 °С

ности при сжатии от температуры. Это объясняется тем, что предел прочности при растяжении, отвечающий за область растяжения в сечении футеровки, где возникающие температурные напряжения в 2–3 раза ниже, чем напряжения сжатия. Кроме того, возникающие напряжения сжатия достигают предельных значений раньше, относительно напряжений растяжения, что предполагает снижение темпов нагрева.

Полученные результаты можно применить и для других участков начального повышения температуры графиков разогрева: разогрев после удаления химически связанной влаги, технологических выдержек и др.

Приазовського державного технічного університету. — 2015. — Т. 1, № 30. — С. 105–111.

5. Slovikovskii, V. V. Effect of heating unit lining warm-up regimes and refractory storage duration on refractory lining life / V. V. Slovikovskii, A. V. Gulyaeva // Refract. Ind. Ceram. — 2015. — Vol. 56, № 3. — P. 225–229. <https://doi.org/10.1007/s11148-015-9820-6>.

Словиковский, В. В. Влияние режимов разогрева футеровок тепловых агрегатов и продолжительности хранения огнеупоров на стойкость огнеупорной кладки / В. В. Словиковский, А. В. Гуляева // Новые огнеупоры. — 2015. — № 6. — С. 9–13.

6. Тимошенко, Д. А. Сушка футеровки тепловых агрегатов / Д. А. Тимошенко, Е. Е. Коломыцев // Новые огнеупоры. — 2013. — № 12. — С. 12–14.

7. Volkova, Olena. Modelling of temperature distribution in refractory ladle lining for steelmaking / Olena Volkova, Dieter Janke // Isij International — ISIJ INT. — 2003. — Vol. 43, № 8. — P. 1185–1190.

8. **Baboo, Prem.** Secondary reformer refractory dry out operation / *Prem Baboo* // Int. J. Eng. Res. Technol. (IJERT). — 2019. — Vol. 8, № 5. — P. 536–545.

9. **Zabolotskii, A. V.** Mathematical modeling of the movement of moisture in refractory concrete and gunni bodies during drying / *A. V. Zabolotskii, L. M. Aksel'rod, R. A. Donich* [et al.] // *Refract. Ind. Ceram.* — 2017. — Vol. 57, № 6. — P. 578–584. <https://doi.org/10.1007/s11148-017-0026-y>.

**Заболотский, А. В.** Математическое моделирование движения влаги в огнеупорных бетонах и торкрет-массах во время сушки / *А. В. Заболотский, Л. М. Аксельрод, Р. А. Донич* [и др.] // *Новые огнеупоры.* — 2016. — № 12. — С. 6–12.

10. **Nikiforov, A. S.** Thermal stresses generated in the lining of a steel ladle / *A. S. Nikiforov, E. V. Prikhod'ko* // *Refract. Ind. Ceram.* — 2005. — Vol. 46, № 5. — P. 360–363. <https://doi.org/10.1007/s11148-006-0012-2>.

**Никифоров, А. С.** Исследование термических напряжений в футеровке сталеразливочного ковша / *А. С. Никифоров, Е. В. Приходько* // *Новые огнеупоры.* — 2005. — № 10. — С. 84–87.

11. **Троянкин, Ю. В.** Оптимизация графика разогрева печей / *Ю. В. Троянкин* // *Сталь.* — 1997. — № 12. — С. 70–72. ■

Получено 18.03.21  
© Е. В. Приходько, 2021 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

## IV международная научно-практическая конференция «ГРАФЕН И РОДСТВЕННЫЕ СТРУКТУРЫ: СИНТЕЗ, ПРОИЗВОДСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ»

6–8 октября 2021 г.  
г. Тамбов, Россия

### ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

- углеродные нанотрубки и нановолокна
- графен, нанографит
- наноматериалы функционального и конструкционного назначения
- метрология, стандартизация и контроль продуктов углеродной nanoиндустрии

Конференция пройдет в Тамбовском государственном техническом университете. Рабочие языки конференции — русский и английский. Форма участия в конференции — очная, заочная, дистанционная. Типы сообщений — пленарные, секционные и стендовые доклады.

[www.graphene-tambov.ru](http://www.graphene-tambov.ru)