

К. т. н. В. В. Словицкий, А. В. Гуляева (✉)

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет», г. Екатеринбург, Россия

УДК 666.762.32-484.2.017:620.178.16

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РАЗОГРЕВА ФУТЕРОВОК ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТОВ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ХРАНЕНИЯ ОГНЕУПОРОВ НА СТОЙКОСТЬ ОГНЕУПОРНОЙ КЛАДКИ

Разработаны мероприятия по повышению стойкости футеровок тепловых агрегатов (конвертеров). Для решения этой задачи проведены исследования механизма разрушения футеровок тепловых агрегатов при разогреве и остывании, изменения теплофизических свойств огнеупоров различного состава, а также огнеупоров пропитанных медно-никелевым штейном. Изучены графики сушки и разогрева футеровки. Разработанные на основании полученных результатов мероприятия при опробовании их в промышленных условиях позволили поднять стойкость футеровок конвертеров на 25–30 % без особых материальных затрат.

Ключевые слова: температурный режим, термические напряжения, термический удар, динамический огнеупор, хромитопериклазовый огнеупор, скалывание.

Износ огнеупорных футеровок в высокотемпературных металлургических агрегатах периодического действия (конвертеры, вельпечи, вращающиеся печи, сталеразливочные ковши и т. д.) при службе происходит в основном путем скалывания вследствие возникающих в футеровке термических напряжений. При пуске конвертеров без предварительного разогрева футеровки размеры скола кладки от первичного термоудара достигают 150 мм.

Традиционная кладка футеровки в высокотемпературных агрегатах периодического действия цветной металлургии с использованием в швах сухих огнеупорных порошков неэффективна, так как не обладает соответствующими механическими свойствами. При эксплуатации сухие порошки всплывают вследствие малой плотности и отсутствия адгезии с футеровкой, в оголенные швы проникают реагенты плавки.

При остывании шлако-штейновый расплав, который заменил сухие порошки при их всплывании, из-за большого температурного коэффициента линейного расширения увеличивается в объеме, вызывая внутренние напряжения в кладке. Такие многократные циклические напряжения приводят к быстрому разрушению футеровки при каждом цикле. Одновременно с заполнением кладочных швов шлако-штейновым расплавом рабочая поверхность футеровки пропитывается расплавом на глубину 30–100 мм, в результате чего в огнеупоре образуются зоны. При нагреве

и остывании кладки на границе этих зон возникают термические напряжения (рис. 1), в ряде случаев превышающие прочность огнеупора, что также приводит к скалыванию пропитанного слоя. Проведенные исследования стойкости футеровки показали огромное влияние термического удара на сопротивление огнеупорных изделий химической агрессии перерабатываемого продукта. Шлакоустойчивость (динамическая) огнеупорных образцов, подверженных предварительному

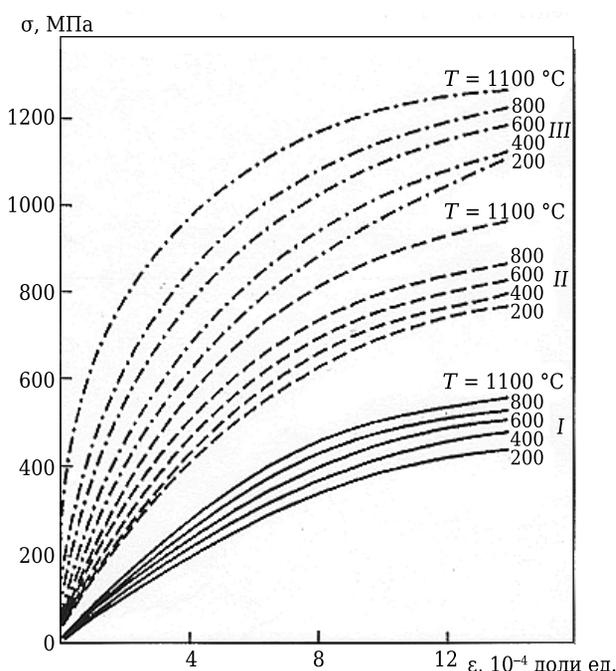


Рис. 1. Зависимость напряжения σ – деформация ε в хромомагнетитовом огнеупоре до и после службы: I — огнеупор до службы; II — наименее измененная зона огнеупора; III — рабочая и переходная зоны огнеупора. На кривых указана температура испытания образцов



А. В. Гуляева

E-mail: a.gulyaewa2012@yandex.ru

воздействию термического удара, в несколько раз меньше, чем у образцов, медленно разогретых до испытания (рис. 2).

Структура периклазохромитовых образцов, не подвергавшихся термическому удару, после испытания на шлакоустойчивость на контакте со шлаком плотная; наблюдается четкая граница химического взаимодействия огнеупорных составляющих с реагентами плавки. Периклазохромитовые образцы, подвергавшиеся предварительному воздействию термического удара, имеют пористую структуру, огнеупорные составляющие значительно разобщены, образующееся пространство заполнено силикатами. При этом эрозийные процессы разрушения преобладают над коррозионными, что, соответственно, увеличивает скорость износа огнеупоров. Исследования показали также, что нарушение первоначальной сплошности огнеупоров зависит от геометрических размеров, теплофизических и упругомеханических свойств изделий. Кроме того, влияет интенсивность изменения температурного поля.

В агрегатах периодического действия, в которых наблюдаются быстрые нагрев и охлаждение футеровки, необходимо в зависимости от условий службы элементов кладки применять различные кладочные растворы, защитные обмазки (торкрет-массы и набивные массы), резко снижая тем самым величину термических напряжений [1].

Разогрев футеровки при пуске агрегатов необходимо производить в зависимости от теплофизических свойств огнеупорного материала кладки и ее объема с допустимой скоростью нагрева [2, 3]. Увеличение скорости нагрева плавящихся огнеупоров периклазохромитового состава влияет на повышение модуля упругости при определенных температурах, приводя к разрушению изделий (рис. 3). Поэтому изделия на основе плавящихся материалов наиболее чувствительны к термоударам и футеровки из этих материалов следует разогревать до температуры службы с меньшей

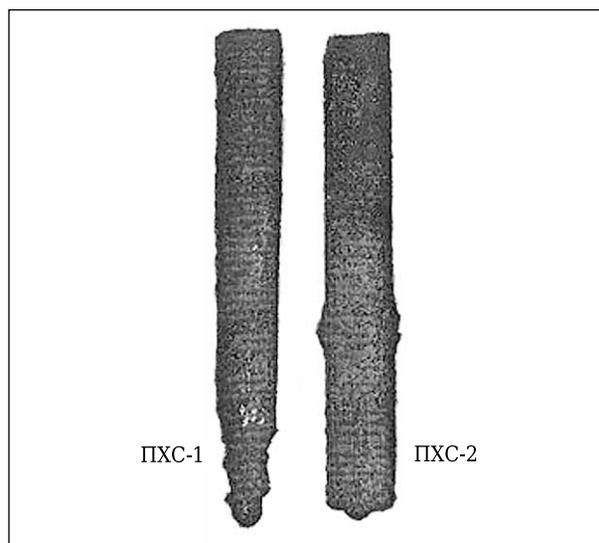


Рис. 2. Периклазохромитовые образцы (ПХС) после 6 ч испытания на шлакоустойчивость: ПХС-1 — образец, предварительно подвергавшийся термоудару; ПХС-2 — образец, медленно нагретый перед испытанием

скоростью, чем из спеченных, или обрабатывать их защитными обмазками, которые резко снижают термические напряжения, возникающие при пуске агрегата (рис. 4).

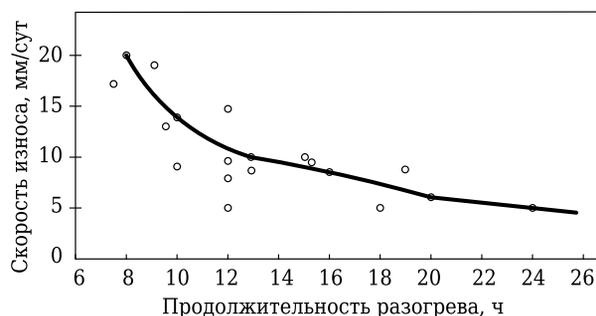


Рис. 3. Зависимость скорости износа футеровки фурменного пояса конвертеров от продолжительности сушки и разогрева

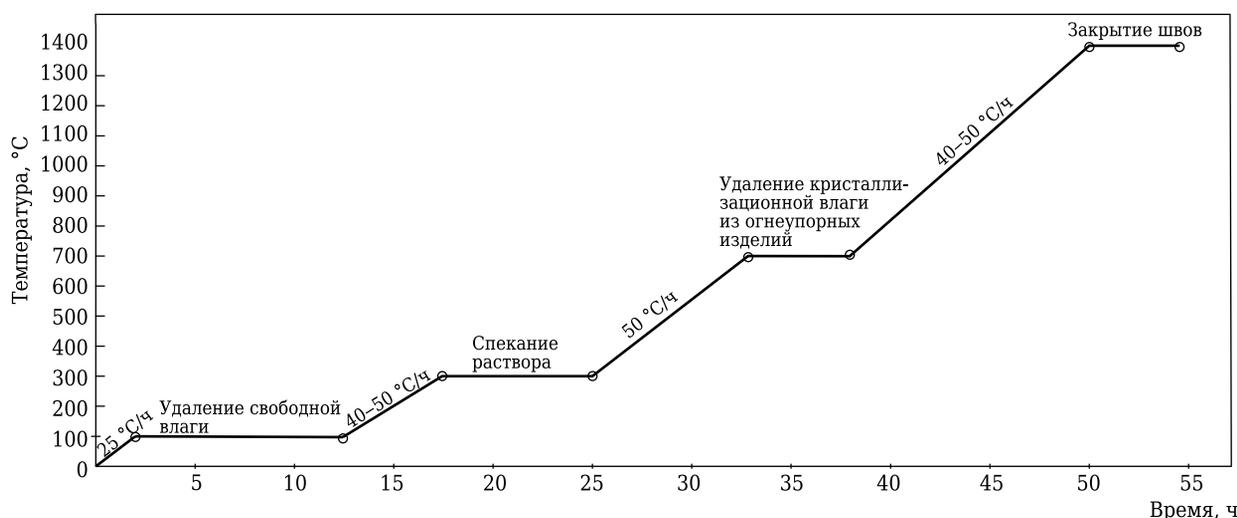


Рис. 4. График сушки и разогрева футеровки горизонтальных конвертеров

Анализ службы футеровок показал, что при быстром нагреве футеровки поверхностные слои кладки, обращенные в рабочее пространство конвертера, испытывают напряжения сжатия. При быстром охлаждении поверхностные слои находятся под воздействием растягивающих напряжений. При прочих равных условиях для огнеупорной футеровки более опасно быстрое охлаждение, чем быстрый нагрев, вследствие плохой сопротивляемости огнеупоров растяжению и хорошей — сжатию. В практике часто встречаются случаи разрушения футеровки в результате недостаточного предварительного разогрева кладки или отсутствия его.

В связи с этим был проведен расчет напряжений, возникающих в непропитанных и пропитанных медным или никелевым штейном огнеупорах, при условии полного отсутствия компенсации относительного удлинения кладки. Модуль упругости медного штейна $E = 25,3$ МПа, средний температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) $\alpha_{ср} = 29,1 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, напряжение $\sigma = 514,95 \cdot 10^3$ МПа. Показатели никелевого штейна: $E = 12 \cdot 10^3$ МПа, $\alpha_{ср} = 25,4 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, $\sigma = 212,8 \cdot 10^3$ МПа. При расчетах за верхнюю граничную температуру была выбрана величина 700 °С (табл. 1, 2) [4].

Для уменьшения влияния напряжений, возникающих при затрудненном расширении кладки, нами были предложены и испытаны в надфурменной зоне горизонтальных конвертеров никелевого производства (Уфалейский никелевый комбинат, г. Нижний Уфалей, и ООО «Комбинат «Южуралникель», г. Орск) компенсационные прокладки в виде картона или толя из расчета 6 мм температурных швов на 1 пог. м кладки. В результате продолжительность кампании кон-

вертеров, определяемая в основном стойкостью фурменного пояса и надфурменной зоны, увеличилась на 12–20 %.

Кроме того, наличие разных по свойствам участков в огнеупоре при службе указывает на необходимость принудительного подогрева футеровки конвертеров во время вынужденных простоев до температур не ниже 800–900 °С. Необходимо также разогреть футеровку конвертеров после текущего или капитального ремонта. Соблюдение этих условий позволит повысить стойкость футеровки на 25–30 %.

Сушку и разогрев печей проводят по определенным графикам подъема температуры, указывающим, на сколько градусов в час следует поднимать температуру. Задаваемая скорость сушки и разогрева зависит от многих факторов: объема и толщины печной кладки; вида материала; от того, когда построена печь; подвергалась ли она предварительно (естественной) воздушной просушке и др. При составлении графиков учитывают, что при 100 °С происходит переход влаги в парообразное состояние, и принимают меры, чтобы не сделать его очень бурным и не нарушить структуру огнеупора.

Обычно в огнеупорах, легко поддающихся термическому растрескиванию при резком нагреве, скалываются углы, отслаиваются слои параллельно поверхности нагрева; при резком охлаждении образуются трещины в направлении, перпендикулярном поверхности нагрева, но образование трещин не сопровождается отслаиванием.

Если поверхность огнеупора взаимодействует со шлаком, свойства огнеупора изменяются, и он легко поддается термическому растрескиванию. Недостаточно обожженные огнеупоры при длительном использовании в печах подвергаются спеканию, что приводит к увеличению содержания стекловидных веществ, способствующих термическому растрескиванию.

Следовательно, механическое растрескивание огнеупора происходит вследствие недостаточного количества температурных швов в огнеупорной конструкции; в арочных конструкциях — вследствие одностороннего нагрева внутренней поверхности свода. В обоих случаях происходит локальная концентрация напряжений, приводящая к разрушению огнеупора.

Таблица 1. Напряжения в исходных и пропитанных штейном огнеупорах магнезиального состава при 700 °С*

Огнеупор	Штейн	$E, 10^3$ МПа	$\alpha_{ср}, 10^{-6}$ град ⁻¹	$\sigma, 10^3$ МПа
МПМ	Без пропитки (исходный)	36,5	12,1	309,2
	Медный	67,9	12,4	589,7
	Никелевый	48,0	12,1	406,1
ПХС	Без пропитки	9,9	9,5	65,7
	Никелевый	49,3	12,4	427,9
ХМ	Без пропитки	15,3	6,9	73,8
	Медный	50,2	10,1	354,9
	Никелевый	35,8	12,2	305,4
ХПТ	Без пропитки	11,5	9,2	74,1
	Медный	39,1	10,5	287,1
	Никелевый	36,1	11,7	295,7
ПХППП	Без пропитки	9,0	10,0	63,0
	Медный	38,5	9,9	265,1
	Никелевый	42,1	12,5	368,6

* E — модуль упругости; $\alpha_{ср}$ — средний температурный коэффициент линейного расширения; σ — напряжение.

Таблица 2. Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ магнезиальных огнеупоров

Огнеупор	$\sigma_{сж}$ исходного огнеупора, 10^3 МПа	$\sigma_{сж}$ огнеупора, пропитанного штейном		
		Ni	Cu	Cu-Ni
ХПТ	48,7	91,8	79,7	129,7
ПХС	37,5	57,9	58,6	75,7
ХМ	31,9	80,5	69,6	86,1
ПХППП	54,7	58,8	78,1	74,2
МПМ	66,7	82,2	54,5	103,1
М	69,8	71,3	53,9	—

Структурное растрескивание в большинстве случаев является основной причиной разрушения футеровки при применении в высокотемпературных печах шамотных, высокоглиноземистых и основных огнеупоров.

При составлении графика повышения температуры нужно обратить внимание на следующее: скорость повышения температуры примерно до 600 °С должна быть меньшей, чем при более высокой температуре, так как влага в набивке при нагреве превращается в пар. При резком повышении температуры поверхностный слой перегревается; пар, внезапно расширяясь, заполняет пространство между зернами набивки, но, не имея возможности выйти, разрывает поверхностный слой и испаряется.

Температуру на уровне 600 °С необходимо поддерживать в течение 4–6 ч. Причина этого заключается в том, что кристаллически связанная вода испаряется при 400–450 °С, а для полного обезвоживания нужна выдержка при 600 °С, т. е. при температуре примерно на 100 °С выше. После окончания выдержки испарение влаги уменьшается, поэтому целесообразно скорость повышения температуры увеличить до 100 °С/ч.

Лучше других огнеупорных материалов изменение температуры переносят шамотные изделия. Динасовые изделия обладают низкой температурной устойчивостью и имеют несколько критических температурных точек, °С: 235, 575; 875. При этих температурах происходят кристаллические превращения кремнезема, сопровождающиеся резким увеличением объема. При разогреве магнетитовых и хромомagnesитовых изделий следует помнить, что эти материалы при температуре выше 1600 °С дают значительную усадку.

Служба огнеупоров в конвертерах начинается с момента сушки и разогрева футеровки, их режимы в значительной мере определяют скорость износа огнеупоров в начальный период кампании. Сушка и разогрев футеровки конвертеров после капитального и текущего ремонтов имеет также важное значение для последующей службы огнеупоров. Особое значение сушка и разогрев футеровки конвертеров имеют при применении огнеупоров в увлажненном и замороженном состоянии.

Наиболее оптимальным режимом сушки и разогрева конвертеров после капитального ремонта, по нашему мнению, является график сушки и разогрева, применяемый на Алмалыкском горно-металлургическом комбинате (г. Алмалык). Время сушки и разогрева 48 ч (20 ч сушка и 28 ч разогрев). Скорость подъема температуры до 300 °С — 15 °С/ч в течение 18 ч, от 800 до 1200 °С — 40 °С/ч в течение 10 ч.

Сушка и разогрев футеровки конвертеров ведутся мазутными горелками, вставленными

в фурменные трубы. Изучение влияния продолжительности сушки и разогрева футеровки конвертеров на скорость износа огнеупоров показало, что с увеличением затрат времени на эти процессы скорость износа огнеупоров уменьшается (см. рис. 4).

На основании анализа результатов исследований для устранения влияния продолжительности сушки и разогрева основной футеровки конвертеров, а также большой влажности огнеупоров, поступающих на футеровку конвертеров, на скорость износа огнеупоров предлагаются следующие графики сушки и разогрева футеровки конвертеров после капитального и текущего ремонтов (рис. 5). Из приведенной зависимости видно, что сушку и разогрев футеровки конвертеров после текущего ремонта необходимо вести в течение 24 ч, а после капитального — в течение 48 ч.

Условия службы огнеупоров в различных элементах футеровки конвертеров неодинаковы, что и определяет характер и скорость их износа. Продолжительность кампании конвертеров 40–75 сут. Фактическая стойкость фурменного пояса (до максимального износа по центру) конвертера 34–68 сут. Интенсивный износ идет в начале кампании в течение первых 10 сут до пуска в работу, затем скорость износа к середине кампании снижается и возрастает в конце кампании (рис. 6).

Стойкость футеровки горизонтальных конвертеров зависит также от продолжительности хранения огнеупоров и связанного с ней ухудшения показателей их свойств в результате воздействия влаги воздуха. Скорость износа огнеупоров в конвертерах при этом увеличивается (рис. 7). Из приведенной зависимости видно, что оптимальное время хранения огнеупоров в данных условиях 130 сут. Скорость износа огнеупоров в конвертерах будет находиться в пределах 6 мм/сут.

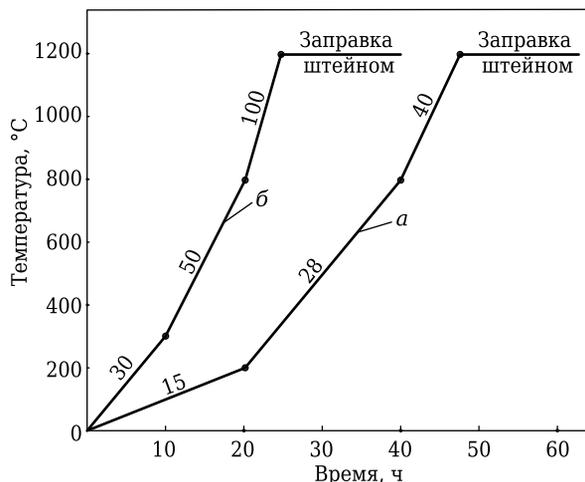


Рис. 5. График сушки и разогрева футеровки конвертеров: а — после капитального ремонта; б — после текущего ремонта (цифры на кривых — скорость нагрева, °С/ч)

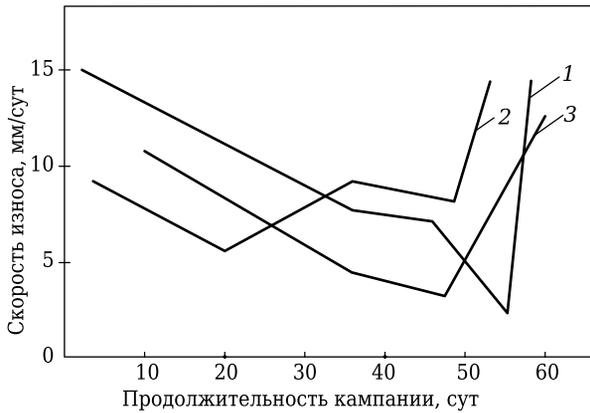


Рис. 6. Скорость износа футеровки фурменного пояса в течение кампаний 1–3

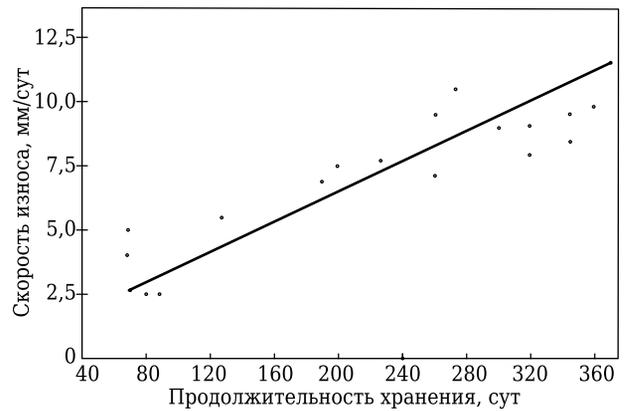


Рис. 7. Зависимость скорости износа огнеупоров в конвертерах от продолжительности хранения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Традиционная кладка швов футеровки с использованием сухих огнеупорных порошков неэффективна и уменьшает срок ее службы. При футеровке агрегатов периодического действия необходимо применять кладочные растворы, защитные обмазки, торкрет-массы для резкого снижения термических напряжений в кладке.

Предложены также и испытаны в надфурменной зоне горизонтальных конвертеров Уфалейского никелевого комбината и комбината «Южуралникель» компенсационные прокладки в виде картона или толя из расчета 6 мм температурных швов на 1 пог. м кладки.

Разогрев футеровки при пуске конвертера необходимо производить в зависимости от теплофизических, химических свойств огнеупоров

кладки и ее объема с допустимой скоростью нагрева. Изделия на основе плавящихся материалов следует разогревать до температуры службы с меньшей скоростью, чем спеченные.

Для огнеупорных футеровок быстрое охлаждение более опасно, чем быстрый нагрев, вследствие плохой сопротивляемости огнеупоров при растяжении и хорошей при сжатии. Разработаны графики сушки и разогрева для футеровки конвертеров. Установлена зависимость стойкости кладки от продолжительности хранения огнеупоров.

Соблюдение разработанных мероприятий позволило повысить стойкость кладки конвертеров на Уфалейском никелевом комбинате и комбинате «Южуралникель» на 25–30 % при минимальных материальных издержках.

Библиографический список

1. **Словиковский, В. В.** Влияние термоударов на коррозионные и эрозионные свойства футеровок / В. В. Словиковский, В. А. Рожноян / // Огнеупоры и техническая керамика. — 1997. — № 8. — С. 36–39.
2. **Словиковский, В. В.** Физико-механические процессы, вызывающие термонапряжения в футеровках фурменного пояса, и способы их снижения в конвертерах цветной металлургии / В. В. Словиковский // Цветные металлы. — 2011. — № 12. — С. 32–34.
3. **Словиковский, В. В.** Влияние режимов разогрева футеровок тепловых агрегатов на стойкость огнеупорной кладки / В. В. Словиковский, В. В. Коржавин,

С. В. Куровская / Конструирование и технология изготовления машин : сб. тр. — Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2000. — С. 55, 56.

4. **Словиковский, В. В.** Исследование упруго-механических и физико-химических свойств огнеупорных изделий с целью прогнозирования долговечности футеровок агрегатов цветной металлургии / В. В. Словиковский // Новые огнеупоры. — 2011. — № 10. — С. 17–21. ■

Получено 24.11.14

© В. В. Словиковский, А. В. Гуляева, 2015 г.