

Д. т. н. **А. С. Никифоров**, к. т. н. **Е. В. Приходько** (✉),
к. т. н. **А. К. Кинжибекова**, доктор PhD **А. Е. Карманов**

*Некоммерческое акционерное общество «Торайгыров
университет», г. Павлодар, Республика Казахстан*

УДК 666.762:621.3.036.53

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АГРЕГАТОВ

Представлена комплексная оценка технического состояния теплотехнологических агрегатов on-line с учетом факторов эксплуатации. Получено значение остаточного ресурса футеровки сталеразливочного ковша после 30 плавов. Произведено сравнение расчетных результатов с результатами эксплуатации оборудования. Адаптация комплексной оценки остаточного ресурса для футеровки 25-т сталеразливочных ковшей позволяет говорить о возможности ее применения для оценки остаточного ресурса огнеупорного слоя широкого класса высокотемпературных установок.

Ключевые слова: *остаточный ресурс, огнеупорный слой, футеровка, высокотемпературные агрегаты, условия эксплуатации.*

ВВЕДЕНИЕ

Значение остаточного ресурса является исходной информацией для принятия решений для повышения надежности и безопасности теплотехнологического оборудования за счет обоснованного назначения сроков и режимов эксплуатации, что позволяет оценить длительность эксплуатации, при превышении которой возможно разрушение агрегата. Таким образом, оценка остаточного ресурса позволяет повысить не только технические и эксплуатационные, но и экономические характеристики.

Учет снижения ресурса основного оборудования в оптимизационных расчетах приводит к повышению экономической эффективности до 37 %. При расчете наиболее вероятных капитальных затрат и стоимости топлива экономический эффект составляет от 5 до 15 % [1].

Можно выделить три основных способа оценки остаточного ресурса агрегатов: физическое и математическое моделирование, использование методов статистической обработки результатов обследований оборудования, а также использование технологических параметров, измеряемых on-line.

В первом случае использование физических моделей дает достаточно точные результаты,

которые можно применить для ряда высокотемпературных агрегатов. Данные, полученные авторами публикации [2], предлагается использовать для конвертеров, сталеразливочных ковшей, желобов доменных печей и т. д. Недостатком данного способа прогнозирования износа огнеупоров является сложность учета постоянно изменяющихся факторов эксплуатации теплотехнологического оборудования, которые могут возникнуть в течение рабочей кампании конкретного агрегата.

В работе [3] приводятся результаты расчета локального напряженно-деформированного состояния элементов высокотемпературных агрегатов для оценки термомеханического ресурса. Компьютерное моделирование показывает, что возникающие напряжения и механические деформации, вызванные влиянием неоднородного температурного поля, могут быть значительно выше значений напряжений, вызванных давлением внутри анализируемого компонента. Высокие значения термических напряжений при растяжении возникают в результате резкого охлаждения оборудования при его неустойчивой работе.

Основой математических расчетов являются методики определения текущего состояния футеровки с применением акустико-ультразвукового эхо-сигнала (AU-E), электродвижущей силы (ЭДС), химического анализа, сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионной спектроскопии (SEM-EDS) и дифракции рентгеновских лучей (XRD) для характеристики механизма эрозии и защиты боковой стенки пода [4–6].



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

Использование методов статистической обработки результатов обследований оборудования позволяет, в отличие от планово-предупредительных ремонтов (ППР), постоянно корректировать планы ремонтных работ в зависимости от критичности теплового состояния футеровки и его участия в производственной цепочке, что позволяет повысить эффективность использования в целом не только оборудования, но и энергии, материальных и человеческих ресурсов и др. На данный момент существует ряд методик оценки остаточного ресурса, каждая из них относится к одной из двух моделей — логико-вероятностной или детерминированной [7, 8]. Недостатки, отнесенные к первому способу, также присущи и для использования статистических данных — информация, собранная в течение предыдущих рабочих кампаний высокотемпературных установок, может не отражать реальные условия в данный момент времени.

Различные методики вносят коррективы в данные расчеты, связанные с уточнением характеристик материалов в зависимости от условий эксплуатации [9, 10]. При этом получение указанных зависимостей производится, как правило, в лабораторных условиях.

Использование технологических параметров, измеряемых on-line, позволяет не только получать необходимые зависимости влияния факторов эксплуатации на состояние огнеупорной футеровки, но и корректировать работу агрегата и оценивать с большей точностью остаточный ресурс, что позволяет говорить об управлении ресурсом [11].

Широкого применения в промышленности этот способ не получил, что объясняется сложностью (а порой и невозможностью) установки измерительных датчиков и отсутствием расчетных алгоритмов.

Влияние факторов эксплуатации на остаточный ресурс элементов огнеупорной футеровки, как правило, рассматривается с позиции оптимизации количественных показателей этих факторов. Так, авторы статьи [12] рассматривают ряд параметров, влияющих на стойкость только рабочего слоя, а не футеровки сталеразливочного ковша в целом, и, соответственно, дают рекомендации по корректировке технологических параметров.

В данной работе рассмотрено влияние факторов эксплуатации на остаточный ресурс огнеупоров футеровки не с позиции оптимизации этих параметров, а с позиции влияния отклонения рассматриваемых факторов от принятых по технологии.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Продолжительность рабочей кампании широкого класса высокотемпературных агрегатов за-

висит от технического состояния футеровки и темпов износа ее рабочего слоя.

Существующие оценки остаточного ресурса высокотемпературных агрегатов предполагают использование для прогнозов только статистических данных по эксплуатации оборудования. Предлагаемая комплексная оценка предполагает использование не только статистических данных, но и режимно-технологических параметров работы, получаемых в режиме on-line.

Комплексная методика оценки остаточного ресурса огнеупорных материалов высокотемпературных агрегатов включает в себя следующие блоки:

- блок 1 — сбор статистических исходных данных и on-line данных;
- блок 2 — математическая модель теплового состояния огнеупорного слоя;
- блок 3 — математическая модель температурных напряжений огнеупорного слоя;
- блок 4 — определение корректирующих коэффициентов отклонения условий эксплуатации;
- блок 5 — определение остаточного ресурса.

Рассмотрим отдельно функционирование каждого блока.

Блок 1 предполагает наличие данных о рабочей толщине огнеупорного слоя и скорости ее износа, режимных параметрах и их изменении при эксплуатации и др. Также составляющей этого блока являются значение остаточной толщины слоя перед очередным циклом работы оборудования и параметры технологического процесса, получаемые в режиме on-line.

Статистические данные являются основой для блоков 3, 4 и 5, а данные параметров технологического процесса, получаемые в режиме on-line, — это начальные и граничные условия для блока 2.

Блок 2 содержит в себе математическую модель теплового состояния огнеупорного слоя. Для большинства футеровок высокотемпературных агрегатов можно выделить следующие общие черты, характеризующие используемую математическую модель:

- как правило, одномерное температурное поле с учетом геометрических размеров агрегатов;
- односторонний нагрев без внутренних источников теплоты;
- циклическая смена периодов нагрева и охлаждения;
- теплопередача через плоскую стенку, при условии больших диаметров цилиндрических агрегатов.

В качестве примера комплексной оценки остаточного ресурса огнеупорной футеровки рассмотрим работу 25-т сталеразливочного ковша.

Данные блока 1 содержат значения температур по сечению футеровки перед разогревом агрегата (начальные условия):

$$T \Big|_{\tau=0} = \text{const}, 0 \leq x \leq \delta,$$

где T — температура, °С, в рассматриваемой точке с координатой x в момент времени $\tau = 0$; δ — толщина футеровки, м.

Граничные условия для рассматриваемой математической модели будут следующие:

– на внутренней поверхности граничные условия 1-го рода (известна температура внутренней поверхности футеровки):

– на внешней поверхности граничные условия 3-го рода (известна закономерность теплообмена поверхности агрегата с окружающей средой).

С учетом процессов тепловой работы тепло-технологических установок будем считать процесс передачи теплоты одномерным ($T = T(x, \tau)$) без внутренних источников теплоты.

Для предлагаемой математической модели применим один из наиболее универсальных численных методов — метод конечных разностей.

Для решения полученного уравнения используем неявную шеститочечную разностную схему, которая является безусловно устойчивой. Система линейных алгебраических уравнений, соответствующих неявной шеститочечной схеме, решается методом прогонки [13].

Блок 3 включает определение температурных напряжений на основании данных о температурных полях, полученных при реализации блока 2.

Расчет температурных напряжений производится on-line при непосредственном определении температур по формуле [14]:

$$\sigma = -\frac{\alpha \cdot E}{1-\nu} \cdot T(x, \tau),$$

где σ — температурное напряжение в футеровке, МПа; α — коэффициент термического расширения, °С⁻¹; E — модуль упругости, кг/см; ν — коэффициент Пуассона; T_i — температура в рассматриваемой точке с координатой x в момент времени τ , °С.

Из анализа условий разрушения футеровки высокотемпературных агрегатов (блок 4) выделим ряд условий, определяющих остаточный ресурс работы их огнеупорного элемента: уровень температурных напряжений, возникающих в футеровке при разогреве и охлаждении, величина кислотности (основности) шлака, температура расплава, плотность огнеупоров.

В предлагаемой комплексной оценке учет условий эксплуатации производится при помощи корректирующих коэффициентов, которые зависят от величины отклонения условия эксплуатации от нормативного значения.

Во-первых, это температурные напряжения, возникающие в футеровке при разогреве и охлаждении, которые являются определяющим условием при оценке остаточного ресурса, так

как уменьшение толщины футеровки именно вследствие действия температурных напряжений является наиболее частой причиной вывода высокотемпературных агрегатов в ремонт. Для их оценки были разработаны соответствующие критерии для определения остаточного ресурса. Эти критерии включают в себя не только сам факт превышения значений возникающих напряжений над допустимыми, но и численное отражение величины и продолжительности этих напряжений.

Величину отклонения корректирующего коэффициента для учета температурных напряжений, возникающих в футеровке при разогреве и охлаждении, находим по формуле:

$$K_{\text{отк}} = \frac{\sum_{i=1}^n \int_0^{\sigma_{\text{доп}}(0)} \sigma(x) dx \left(\int_{\sigma_{\text{доп}}(0)}^{\sigma_{\text{доп}}(0)} \sigma(\tau) d\tau \right)}{\sum_{i=1}^n \sigma_{\text{ср}}^2 \cdot \tau_i \cdot x_i},$$

где σ — температурное напряжение в футеровке, МПа; $\sigma_{\text{доп}}$ — предел прочности применяемого огнеупорного материала, МПа; x — толщина футеровки, м; n — число участков, в которых напряжения превышают допустимые; τ — время разогрева или охлаждения, с; $\sigma_{\text{ср}}$ — среднее значение температурных напряжений в футеровке на данном участке, МПа; x_i — толщина футеровки, на которой температурные напряжения в футеровке превышают предел прочности применяемого огнеупорного материала, м; τ_i — время разогрева или охлаждения участка, на котором температурные напряжения в футеровке превышают предел прочности применяемого огнеупорного материала, с.

Критерий является суммарным показателем напряжений по толщине x и по времени τ для всех моментов времени тепловой работы высокотемпературного агрегата (от $i = 1$ до n) в течение одного цикла, при которых температурные напряжения превышают предел прочности.

Во-вторых, важным условием эксплуатации является величина кислотности (основности) шлака. Подтверждением этого является значительная скорость износа огнеупоров шлакового пояса. Значение данного условия принято постоянным для одного цикла работы сталеразливочного ковша.

В-третьих, повышение температуры подогрева футеровки перед сливом очередной плавки выше нормируемой может отрицательно сказаться на их термостойкости. Превышение температуры подогрева футеровки принято постоянным для одного цикла.

В-четвертых, чем выше температура рабочей среды, используемой в агрегате, тем больше вероятность перехода огнеупора в расплав. Для ряда высокотемпературных агрегатов (разливочные и промежуточные ковши) температура за-

ливаемого в ковш расплава определяет наличие и величину термоудара, действие которого сказывается на стойкости подины ковша, где кроме термоудара есть еще и размывающее действие расплава. Оценка этого условия эксплуатации также принята постоянной для одного цикла.

В-пятых, высокая плотность огнеупора является условием эксплуатации, повышающим способность сопротивляться размыванию футеровки. Под влиянием плотности подразумевается изменение этого физического свойства у огнеупоров одной марки в различных партиях или у различных производителей. Плотность огнеупоров принята постоянной для рабочей кампании ковша (время между капитальными ремонтами).

К условиям эксплуатации, влияющим на износ огнеупорного слоя, можно отнести еще ряд воздействий: механические повреждения при эксплуатации, истирающее воздействие металла и др. или специфические условия работы, которые могут дополнить указанные условия эксплуатации.

Значения корректирующих коэффициентов учитываются при превышении значений условий эксплуатации над нормативными: температурные напряжения и температура расплава; а также при снижении фактора плотности огнеупоров. Повышение или снижение значения кислотности (основности) шлака зависит от типа применяемой футеровки. Значение корректирующих коэффициентов условий эксплуатации определяется индивидуально для оборудования на основании опыта его эксплуатации.

Остаточный ресурс n_k (в количестве плавов) в блоке 5 с учетом корректирующего коэффициента условий эксплуатации будет определяться формулой:

$$n_k = \frac{\delta_i - \delta_{кр}}{v \cdot K_{\Sigma}}$$

где δ_i — толщина футеровки в начале i -го цикла, мм; $\delta_{кр}$ — минимально допустимая (критическая) толщина футеровки, мм; v — средняя скорость снижения толщины футеровки высо-

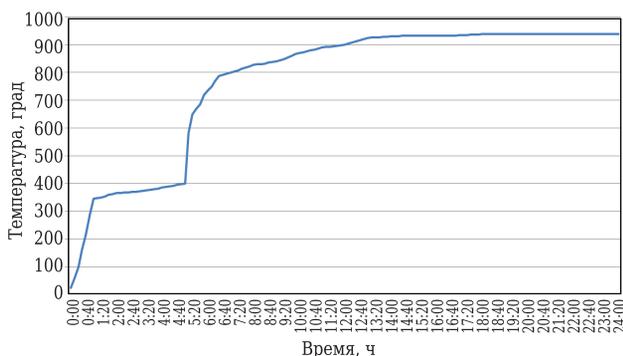


Рис. 1. График разогрева внутренней поверхности футеровки сталеразливочного ковша

котемпературного агрегата, мм/плавку; K_{Σ} — общий корректирующий коэффициент.

Общий корректирующий коэффициент рассчитывается путем умножения корректирующих коэффициентов отдельных условий эксплуатации:

$$K_{\Sigma} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5.$$

Для оценки остаточного ресурса огнеупорного слоя проведены замеры температуры на внутренней поверхности ковша при его разогреве. Таким образом, блок 1 включает следующую информацию:

- средняя продолжительность работы (рабочая кампания) сталеразливочного ковша до капитального ремонта составляет 40 плавов (циклов). При соблюдении режима эксплуатации стойкость футеровки увеличивается и составляет 42–43 плавки;

- начальная толщина рабочего слоя футеровки из периклазовых кирпичей составляет 135 мм, при этом минимально допустимая (критическая) 75 мм;

- среднее значение скорости снижения толщины футеровки высокотемпературного агрегата (без учета условий эксплуатации, влияющих на остаточный ресурс) 1,43 мм/цикл;

- начальные условия — температура по сечению футеровки одинакова и равна 20 °С;

- граничные условия: на внутренней поверхности — граничные условия 1-го рода; на внешней поверхности — граничные условия 3-го рода.

Информация блока 1 по данным об изменении температуры в процессе разогрева показана на рис. 1 в виде зависимости температуры внутренней поверхности футеровки от времени. В процессе разогрева был произведен замер температуры в зоне футеровки с наибольшей температурой (зона ядра факела при разогреве).

На основании данных об изменении температуры внутренней поверхности футеровки с помощью блока 2 производится расчет температурных полей футеровки в процессе разогрева (см. таблицу). Данные о полях температур являются исходными для блока 3 при определении температурных напряжений, возникающих при разогреве (рис. 2). Значения напряжений, полученные в блоке 3, являются исходными данными для расчета величины отклонения корректирующего коэффициента для учета температурных напряжений. Сам блок 3 содержит в себе значения корректирующих коэффициентов, зависящих от условий эксплуатации. Для учета условий эксплуатации сталеразливочных ковшей была составлена таблица на основе опыта эксплуатации при изменении условий эксплуатации в указанных диапазонах.

Для оценки остаточного ресурса огнеупорного слоя проведены замеры температуры на ее

Значение корректирующего коэффициента при величине отклонения условий эксплуатации от нормативного значения

Условия эксплуатации	Значение корректирующего коэффициента при отклонении условия эксплуатации					
	от 1,5 до 2 раза	от 2 до 2,5 раза	от 2,5 до 3 раза	от 3 до 3,5 раза	от 3,5 до 4 раз	от 4 раз и выше
Температурные напряжения при разогреве (повышение)	1,015	1,020	1,030	1,050	1,080	1,100
Условия эксплуатации	Значение корректирующего коэффициента при отклонении условия эксплуатации					
	от 0 до 2 %	от 2 до 4 %	от 4 до 6 %	от 6 до 8 %	от 8 до 10 %	от 10 до 12 %
Кислотность (основность) шлака (повышение/снижение)	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,08
Температура подогрева футеровки (снижение)	1,00	1,00	1,00	1,0025	1,005	1,0075
Температура расплава (повышение)	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06
Плотность огнеупоров (снижение)	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06

внутренней поверхности в процессе разогрева с учетом того, что процессы разогрева сталеразливочных ковшей перед сливом каждой плавки идентичны.

По найденным значениям критерия для оценки остаточного ресурса и допустимого значения критерия для оценки остаточного ресурса получаем значение отклонения условий эксплуатации по температурным напряжениям 3,6, что в соответствии с таблицей дает значение корректирующего коэффициента $K_1 = 1,08$.

Согласно данным эксплуатации, при работе сталеразливочного ковша в течение 30 циклов не зафиксировано повышение избытка основных или кислотных оксидов. Поэтому значение данного коэффициента принято равным $K_2 = 1$.

Превышение температуры подогрева ковшей зафиксировано не было ($K_3 = 1$).

Температура расплава была зафиксирована на уровне порядка 1650 °С (повышение температуры металла в установке печь-ковш) в 15 циклах. Для расчетов корректирующий коэффициент по температуре расплава принят $K_4 = 1,01$.

Изменение плотности применяемых огнеупоров было зафиксировано с отклонением до 2 %. Корректирующий коэффициент по плотности огнеупоров принят равным $K_5 = 1,01$.

Итоговый корректирующий коэффициент равен 1,1. Остаточный ресурс n_k (в количестве плавков) с учетом корректирующего коэффициента условий эксплуатации определяется формулой

$$n_k = \frac{92-75}{1,43 \cdot 1,1} = 10,8.$$

Полученный результат подтверждается реальной эксплуатацией сталеразливочных ковшей. Результаты эксплуатации ковша до капитального ремонта показали, что итоговое количество циклов работы ковша составило 41

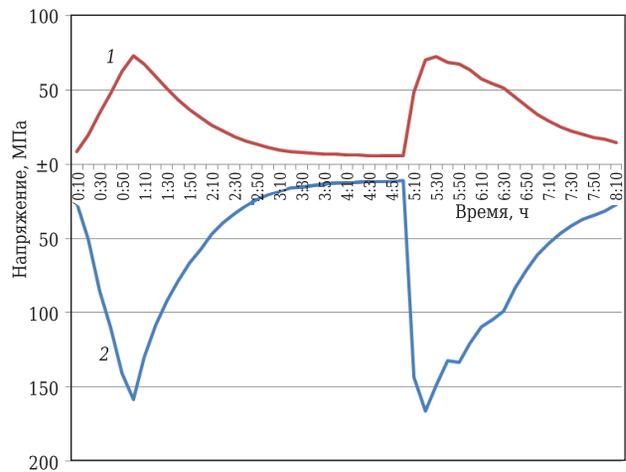


Рис. 2. Напряжения, возникающие в футеровке при разогреве: 1 — напряжения растяжения на внешней поверхности; 2 — напряжения сжатия на внутренней поверхности рабочего слоя футеровки

плавку. Рекомендательное количество после 30 плавков было равным 10.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая комплексная оценка остаточного ресурса футеровки высокотемпературных агрегатов позволяет прогнозировать выведение оборудования в ремонт по значению остаточного ресурса работы огнеупорных материалов. Комплексная оценка опирается на статистические данные о работе высокотемпературных агрегатов и данные технологических замеров параметров в процессе эксплуатации.

Адаптация подобной оценки остаточного ресурса для футеровки 25-т сталеразливочных ковшей позволяет говорить о возможности ее применения для определения остаточного ресурса огнеупорной защиты достаточно широкого класса теплотехнологических установок.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP09561854).

Библиографический список

1. **Aminov, R. Z.** Optimization of the operating conditions of gas-turbine power stations considering the effect of equipment deterioration / R. Z. Aminov, A. I. Kozhevnikov // Therm. Eng. — 2017. — Vol. 64. — P. 715–722. <https://doi.org/10.1134/S0040601517100019>.
2. **Smirnov, A. N.** Rotary furnace for comparative evaluation of heating unit refractory object erosion resistance / A. N. Smirnov, G. G. Nemsadze, K. N. Sharandin [et al.] // Refract. Ind. Ceram. — 2018. — Vol. 59, № 2. — P. 227–230. doi: 10.1007/s11148-018-0211-7.
Смирнов, А. Н. Роторная печь для сравнительной оценки эрозионной стойкости огнеупорных изделий тепловых агрегатов / А. Н. Смирнов, Г. Г. Немсадзе, К. Н. Шарандин [и др.] // Новые огнеупоры. — 2018. — № 4. — С. 145–148. doi: 10.17073/1683-4518-2018-4-145-148.
3. **Okrajni, J.** Thermo-mechanical fatigue conditions of power plant components / J. Okrajni // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. — 2009. — Vol. 33, № 1. — P. 53–61.
4. **Gordon, Y.** Diagnostics of blast-furnace linings / Y. Gordon, A. Sadri, K. Mironov, N. Spirin // Steel in Translation. — 2017. — Vol. 47. — P. 517–522. doi: 10.3103/S0967091217080058.
5. **Ge, Y.** A novel approach for measuring the thickness of refractory of metallurgical vessels / Y. Ge, Y. Li, H. Wei, H. Nie, W. Ding, Y. Cao, Y. Yu // Materials. — 2020. — Vol. 13. — Article № 5645. doi: 10.3390/ma13245645.
6. **Jiao, K.** Analysis of blast furnace hearth sidewall erosion and protective layer formation / K. Jiao, J. Zhang, Z. Liu, C. Chen, Y. Liu // ISIJ International. — 2016. — Vol. 56. — P. 1956–1963. doi: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-168.
7. **Volkov, M.** Existing models residual life assessment of structures and their comparative analysis / M. Volkov, A. Kibkalo, A. Vodolagina, V. Murgul // Procedia Engineering. — 2016. — Vol. 165. — P. 1801–1805. doi: 10.1016/j.proeng.2016.11.925.
8. **Данюшевский, И. А.** Об оценке прочности и ресурса энергооборудования с позиций современных воз-

можностей / И. А. Данюшевский, Е. В. Георгиевская, С. Н. Гаврилов, Л. Д. Власова // Надежность и безопасность энергетики. — 2017. — № 10 (3). — С. 237–242. doi: 10.24223/1999-5555-2017-10-3-237-242.

9. **Pérez, I.** Post-mortem study of magnesia-chromite refractory used in a submerged arc furnace in the copper-making process / I. Pérez, I. Moreno-Ventas, R. Parra, G. Ríos // JOM. — 2018. — Vol. 70. — P. 2435–2442. doi: 10.1007/s11837-018-3090-y.

10. **Nikiforov, A. S.** Investigation of the dependence of refractory thermal conductivity on impregnation with a corrosive medium / A. S. Nikiforov, E. V. Prikhod'ko, A. K. Kinzhibekova, A. E. Karmanov // Refract. Ind. Ceram. — 2020. — Vol. 60. — P. 463–467. doi: 10.1007/s11148-020-00386-3.

Никифоров, А. С. Исследование зависимости теплопроводности огнеупоров от их пропитки агрессивной средой / А. С. Никифоров, Е. В. Приходько, А. К. Кинжибекова, А. Е. Карманов // Новые огнеупоры. — 2019. — № 9. — С. 50–54. doi: 10.17073/1683-4518-2019-9-50-54.

11. **Горюнов, О. В.** Расчетно-экспериментальное обоснование вибропрочности трубопроводов АЭС на основе квазистатического подхода / О. В. Горюнов, С. В. Словоцов // Надежность и безопасность энергетики. — 2017. — № 10 (4). — С. 304–309. doi: 10.24223/1999-5555-2017-10-4-304-309.

12. **Kondrukevich, A. A.** Effect of operational factors on steel-teeming ladle lining working layer life / A. A. Kondrukevich, D. V. Ryabyi // Refract Ind Ceram. — 2018. — Vol. 58, № 3. — P. 469–474. doi: 10.1007/s11148-018-0129-0.

Кондрюкевич, А. А. Влияние эксплуатационных факторов на стойкость рабочего слоя футеровки сталеразливочных ковшей / А. А. Кондрюкевич, Д. В. Рыбий // Новые огнеупоры. — 2017. — № 9. — С. 3–9. doi: 10.17073/1683-4518-2017-9-3-9.

13. **Арутюнов, В. А.** Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей / В. А. Арутюнов, В. В. Бухмиров, С. А. Крупенников. — М.: Металлургия, 1990. — 239 с.

14. **Griffith, A. A.** The phenomenon of rupture and flocin solids / A. A. Griffith // Phil. Trans. Roy. Soc. — 1920. — Vol. A221, № 4. — P. 163–198. ■

Получено 07.06.21

© А. С. Никифоров, Е. В. Приходько, А. К. Кинжибекова, А. Е. Карманов, 2022 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



Metal + Metallurgy China (M+M China) 2022 — международная выставка металлургического, литейного и металлообрабатывающего оборудования

METAL + METALLURGY CHINA

18–21 мая 2022 г.
Китай, Шанхай, Shanghai New International Expo Centre (SNIEC)

www.mm-china.com/en/