



УДК 666.3/7

Поступила 08.10.2015

## ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩИЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПРИ ЛИТЬЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ INSULATING CERAMIC INSERTS FOR CASTING PRODUCTS FROM ALUMINUM ALLOYS

*А. Т. ВОЛОЧКО, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь*

*A. T. VOLOCHKO, Physical and Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

*В статье рассмотрены вопросы изготовления керамических теплоизолирующих элементов-вставок для многоразового использования при кокильном литье алюминиевых сплавов. Представлены результаты изготовления керамических изделий из синтезированных материалов на основе волластонита, вторичного шамота, алюминиевого шлака и др. Показана перспективность их применения.*

*The paper analyses production of reusable ceramic insulating inserts applied in permanent mold casting of aluminum alloys. It presents results of manufacturing of ceramic products from synthesized materials based on wollastonite, secondary grog, aluminum slag, etc. The paper demonstrates prospects of their applying.*

**Ключевые слова.** *Отливка, кокильное литье, керамический теплоизолирующий элемент-вставка, волластонит, алюминиевый шлак, вторичный шамот, теплопроводность, термостойкость керамики.*

**Keywords.** *Casting, permanent mold casting, ceramic insulating inserts, wollastonite, aluminum slag, secondary grog, thermal conductivity, ceramics thermostability.*

Изготовление изделий методом литья включает заливку расплавленного металла в форму, затвердевание и извлечение отливки из формы. Назначение литниковой системы (в том числе прибылей) заключается в обеспечении спокойного заполнения формы расплавом и в подпитке кристаллизующейся отливки, когда в ней происходят усадка, удаление газов, примесей и шлака. Металл в прибыльной части должен поддерживаться в жидком состоянии более длительное время, чем в отливке. При использовании металлических кокилей (рис. 1) из-за высокого коэффициента теплопроводности прибыльная часть может составлять до 40–50% массы отливки. В последующем этот объем металла идет на переплав, причем около 4–5% его выгорает безвозвратно. Кроме того, при переплаве дополнительно расходуются энергия и трудовые затраты.

В качестве предложений гарантированного удержания тепла и более длительного сохранения расплава в жидком состоянии в прибыльной части отливки предлагается использование экзотермических и теплоизоляционных материалов с низким коэффициентом теплопроводности для изолирования рас-

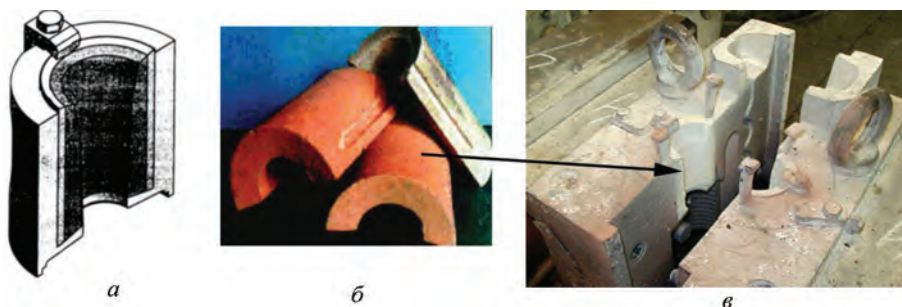


Рис. 1. Схема расположения керамического утеплительного элемента многоразового использования: *а* – биметаллическое исполнение вставки; *б* – моноисполнение вставки; *в* – кокиль для литья с керамической вставкой

плава от контакта с формой. В этом случае необходимый объем прибыльной части снижается до 10–30% объема отливки.

Так, в литейном производстве как черных, так и цветных металлов и сплавов для поддержания тепла и разогрева достаточно широко используются экзотермические материалы. В качестве восстановителя для экзотермических смесей чаще всего используется алюминиевый порошок в количестве 10–30 мас.%, а в качестве окислителей – оксиды металлов ZnO, CuO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, NiO, Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, SnO и др. [1–3]. При использовании таких вставок давление, создаваемое в закрытой прибыли за счет протекания экзотермической реакции, является существенным фактором для обеспечения питания отливки даже в условиях, когда высота отводной прибыли меньше высоты питаемого узла отливки. После окончания экзотермической реакции материал оболочки сохраняет свои теплоизоляционные свойства, продолжая обеспечивать направленное затвердевание в отливке. Одним из ограничивающих факторов широкого использования таких вставок является вероятность загрязнения металла продуктами экзотермических реакций. Кроме того, экзотермические вставки – это одноразовый продукт, что значительно удорожает стоимость отливки.

В отличие от экзотермических использование керамических многоразовых утеплительных элементов, отличающихся высокой термостойкостью, позволяет получать не менее 1000 отливок.

В Физико-техническом институте НАН Беларуси для металлургического производства, в первую очередь алюминиевых сплавов, разработан ряд керамических материалов на основе синтетического сырья, вторичных ресурсов, отходов производства [4–6]. В качестве синтезированного сырья применяли искусственный волластонит CaSiO<sub>3</sub>, а в качестве вторичного сырья, отходов производства – бой шамотных и магнезиальных огнеупоров, окалину, алюминиевый шлак и др.

В процессе исследований предложены конструкции разъемных и неразъемных утеплительных вставок в моно- и биметаллическом исполнении (рис. 1) [6,7].

Среди опробованных технологий формования утеплительных вставок различной пористости использовали прессование в жестких пресс-формах и виброуплотнение. Общая схема форм для получения вставок приведена на рис. 2.

При создании керамического материала с использованием вторичного шамота исходили из следующих положений:

1. Шамот в качестве заполнителя составляет жесткий скелет и сохраняет постоянство объема, уменьшает формовочную влажность, усадку и вовлекается в химические процессы только с поверхности частиц. В шихте эта фракция является основной (до 60–70 мас.%) по массе и объему.

2. Высокопрочная глина, бентонит – это сырье, обеспечивающее при оптимальном содержании 10–15 мас.% в силу своих пластифицирующих свойств формуемость шихты. При большем ее содержании происходят объемные изменения при термообработке, что приводит к образованию трещин.

3. Алюминиевый шлак характеризуется постоянством объема при термообработке, поэтому при смешивании с высокопрочной глиной может использоваться как тонкомолотая добавка, повышающая тер-

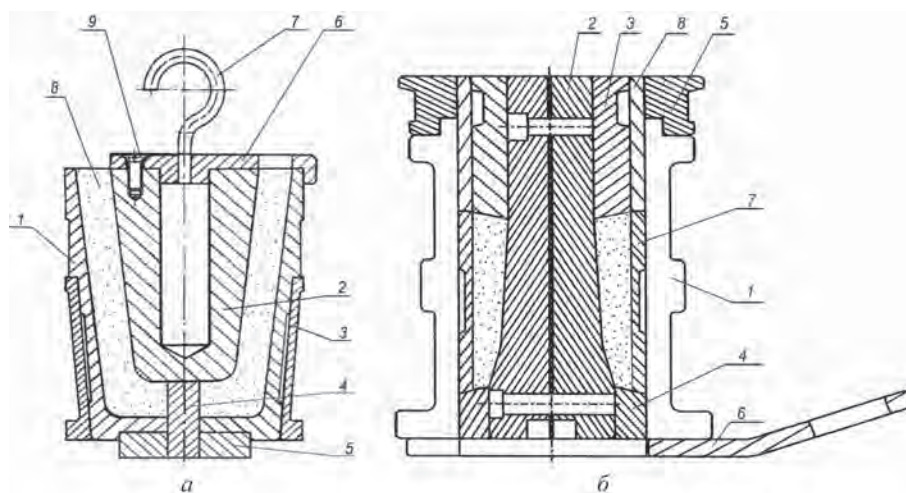


Рис. 2. Форма для получения заготовок из керамического материала: а – 1 – полуматрица; 2 – стержень; 3 – подкладное кольцо; 4 – выталкиватель; 5 – кольцо; 6 – крышка; 7 – крюк; 8 – керамическая вставка; 9 – винты и пресс-форма для прессования утеплительной вставки; б – 1 – матрица; 2 – пуансон; 3 – полувтулка; 4 – полукольцо; 5 – кольцо; 6 – вилка; 7 – вкладыш; 8 – вкладыш верхний

мо- и шлакоустойчивость материала и активно участвующая в физико-химических процессах, протекающих при термообработке.

Для материала, выполненного на основе вторичного шамота измельченного до размера менее 500 мкм, в качестве добавок размером до 100–300 мкм использовали огнеупорные глины, полые микросферы на основе алюмосиликатов до 5 мас.%, алюминиевый шлак до 10–15 мас.%

В качестве связующего, позволяющего производить термообработку полученных изделий при невысоких температурах 560–590 °С, наиболее эффективными оказались шлакофосфатные связки и другие фосфоросодержащие компоненты (ортофосфорная кислота, триполифосфат натрия). Кроме того, фосфоросодержащие компоненты обеспечивают в структуре такой керамики за счет образования фосфатов металлов очень высокую термо- и шлакоустойчивость [8]. Причем использование фосфоросодержащих компонентов должно определяться таким количеством, чтобы обеспечить в материале содержание  $P_2O_5$  в пределах 5–7 %. Влажность шихты для технологичности при различных методах формования обеспечивается корректировкой воды. Смесь должна характеризоваться подвижностью не более  $2 \cdot 10^{-2}$  м по осадке конуса в соответствии с ГОСТ 10181.1–81. Алюмофосфатные растворы получали при соотношении  $P_2O_5/Al_2O_3 = 3:4$ .

Свойства утеплительной керамики также определяются пористостью, выбором процесса формования. Так, при увеличении пористости снижаются конструкционная прочность, шлакоустойчивость, уменьшается коэффициент теплопроводности. В связи с этим при выборе технологии формования необходимо определиться с конструкцией вставки и требованиями к свойствам материала.

Как показала практика, наиболее перспективным для получения утеплительных элементов в моно- и биметаллическом исполнении из вторичных ресурсов и синтетического сырья является прессование в жестких пресс-формах, позволяющее в широких пределах менять пористость и конечные свойства материала.

Для определения давления прессования и его влияния на прочность керамики экспериментально установлена зависимость остаточной пористости  $P$  от давления при различной концентрации связующего (рис. 3). Увеличение концентрации связующего несколько снижает давление прессования. Так, для получения пористости заготовок менее 10% необходимо давление более 60–70 МПа.

Попытка получения изделий пластическим методом формования при содержании связующего более 20% не дало положительных результатов по причине разогрева образца, его вспучивания и растрескивания. Кроме того, при хранении на образцах выявлен белый кристаллический налет, идентифицированный как гидроксид алюминия  $Al(OH)_3$ .

Для повышения механической прочности образцов после прессования, необходимой при их транспортировке и последующей термообработке, в состав керамики вводили добавки, среди которых опробованы аглопоритовая и керамзитовая пыль, бентонит, высокопрочная глина. Наиболее эффективными и доступными являются огнеупорная глина, бентонит. Вместе с тем, отмечено [9], что увеличение их содержания приводит к снижению огнеупорности при температуре более 1600–1700 °С. Однако при литье алюминиевых сплавов ( $T < 1000$  °С) и для обеспечения коэффициента теплопроводности 0,3–0,5 Вт/(м·К) эти добавки наиболее приемлемые.

Использование в качестве добавок частиц алюминиевого шлака повышает механическую прочность, термо- и шлакоустойчивость (рис. 4). Однако его количество в керамике ограничивается 25–30%. В процессе термообработки образцов также происходит их вспучивание и растрескивание, нарушается сплошность материала.

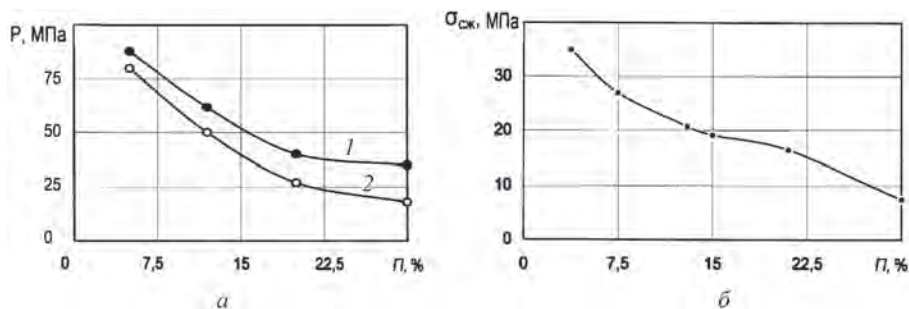


Рис. 3. Прессуемость керамических вставок, изготовленных из шихты на основе шамота с добавками 10% алюминиевого шлака и 10% бентонита при содержании связующего ортофосфорной кислоты 10% (1) и 20% (2) (а) и зависимость прочности керамики при добавлении 10% ортофосфорной кислоты от ее пористости (б)

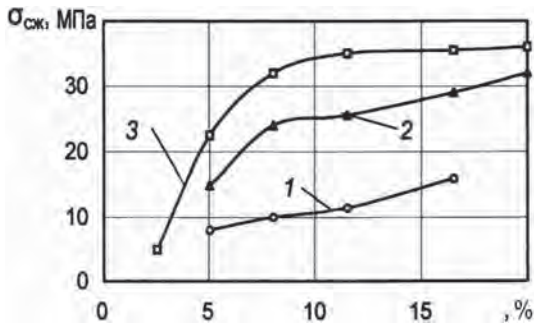


Рис. 4. Влияние количества связующего (ортофосфорная кислота) и пластифицирующей добавки – бентонита на прочность КОМ на основе шамота с 30% алюмошлака: 1 – влияние ортофосфорной кислоты; 2 – влияние бентонита; 3 – совместное влияние ортофосфорной кислоты и бентонита

Наряду с керамическими материалами из вторичного шамота, алюминиевого шлака особый интерес при изготовлении вставок представляют частицы из волластонита  $\text{CaSiO}_3$ , относящегося к цепочным силикатам и имеющего волокнистую форму (рис. 5). Этот интерес связан с ухудшающейся в мире экологической обстановкой и сегодня он широко используется в качестве заменителя, вредного для здоровья из-за своего канцерогенного эффекта, асбеста. Причем, как показывает мировая практика, в объеме производства изделий из волластонита предпочтение отдается синтезированному волластониту, который также может быть получен из отходов производства [11, 12]. Он нашел широкое применение в качестве добавок-наполнителей в цветной металлургии, производстве огнеупоров, технологии производства цементов и др.

Особенность волластонита – инертность к химическому взаимодействию с расплавом алюминия, что позволяет использовать его в металлургии алюминия и его сплавов. Важными параметрами, определяющими свойства изделий из волластонита, являются дисперсность порошков, соотношение длины и диаметра частиц.

Для получения керамических вставок использовали синтезированный  $\beta$ -волластонит (соотношение длины и диаметра не более (10–15):1) размером до 40 мкм.

Образцы керамики готовили следующим образом. Смешивали волластонит с компонентами (глина, цемент) при различном массовом соотношении. Содержание волластонита изменяли в пределах 50–100 мас.%, в качестве добавок использовали высокоогнеупорную глину Веселовского месторождения, портландцемент М500, диспергированный шамот фракции менее 500 мкм. Кроме того, использовали добавки алюминиевого шлака дисперсностью менее 315 мкм. В состав добавки входили: шлак – 30–35 мас.%, шамот – 30–35, глина – 30–35% на основе алюминий-бор-фосфатной связки. Затем полученную смесь формовали полусухим прессованием при давлении 30 МПа. Опытные образцы сушили при 120 °С и обжигали при температуре до 1100 °С. Затем определяли физико-химические свойства по стандартным методикам.

Как показали исследования, наименьшей прочностью на изгиб (2–5 МПа) обладает материал, полученный на основе цементного связующего.

Как следует из рис. 6, достаточной прочностью при минимальной пористости обладают образцы, полученные на основе системы волластонит-глина. При этом с увеличением доли глинистой составляющей

Использование сферолизированных частиц керамики (полых микросфер), заполненных двуокисью азота, существенно снижает коэффициент теплопроводности материала до значений  $\lambda = 0,2–0,3 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , способствует более длительному удержанию тепла вставкой [10].

Таким образом, эффективность введения алюминиевого шлака в состав шихты для получения вставок обеспечивается в комплексном сочетании гранулометрического состава с содержанием других составляющих (связующее 7–12%; пластифицирующие добавки 10–30%).

При увеличении пористости вставок от 5–8 до 20–25% снижается предел прочности при сжатии почти в 2 раза (с 30–35 до 14–18 МПа), что может привести к уменьшению количества заливок от использования одной керамической вставки.



Рис. 5. Структура волластонита, характеризующаяся повторяющимися, переплетенными тройными четырехгранниками кварца, имеет волокнистую структуру (а) и кристаллы искусственного волластонита (б). б –  $\times 1700$

щей повышается прочность и снижается пористость. Керамические изделия, полученные на основе синтетического волластонита и добавок огнеупорной глины, в зависимости от содержания 30–50 мас.% имеют прочность на изгиб 8–16 МПа и прочность на сжатие 20–50 МПа, что вполне приемлемо для вставок утеплителей прибыли.

Кроме того, ассортимент таких изделий имеет более широкую область применения, и, в первую очередь, для металлургии алюминия и его сплавов. Это изделие в виде тепловых насадок, подводящих лотков, дозаторов литейных форм и др.

Гарантированное удержание тепла при использовании керамических вставок определяется не только низким коэффициентом теплопроводности материала (не более 0,3–0,5 Вт/(м·К)), но и толщиной используемой вставки. Так, на примере кокильного литья поршней дизельных двигателей массой ~ 4,5 кг выполнен расчет и получены экспериментальные данные, показывающие возможность нахождения металла в расплавленном состоянии в прибыльной части до 10 мин, что позволяет получить отливку без погрешностей кристаллизации и уменьшить прибыльную часть до 10 % массы отливки.

Утеплительные вставки прибыльной части, изготовленные из разработанной керамики, позволяют изменять их теплофизические свойства и, тем самым, регулировать процесс питания получаемой отливки. Необходимость учета изменения коэффициента теплопроводности иллюстрируется на примере расчета скорости кристаллизации  $d\zeta/dt$  алюминиевого сплава, залитого в утеплительную вставку, изготовленную из керамики.

Величина коэффициента теплопроводности алюминиевых сплавов обычно составляет примерно 70–150 Вт/(м·К).

Сравнение этих данных с коэффициентом теплопроводности материала утеплительной вставки свидетельствует о том, что процесс теплообмена между закристаллизовавшейся коркой металла у стенки вставки и самой стенкой будет характеризоваться критерием  $Bi_1 \ll 1$  [13, 14]. Тогда для оценки скорости роста твердой корки металла в результате его охлаждения в объеме утеплительной вставки можно использовать следующую формулу:

$$U = \frac{Q_1}{\frac{LX_1}{Bi_1} \zeta} \quad (1)$$

Здесь

$$L = \frac{\rho_1}{c_1(t_s - t_c)}; \quad Bi_1 = \frac{\alpha_1 X_1}{\lambda_1}, \quad (2)$$

где  $Q_1$  – коэффициент температуропроводности отливки;  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи поверхности отливки;  $\rho_1$  – удельная теплота кристаллизации металла отливки;  $c_1$  – удельная теплоемкость отливки;  $\zeta$  – толщина затвердевшей корки отливки;  $t_s$  – температура солидуса сплава;  $t_c$  – температура среды.

Как следует из (1), минимальная скорость затвердевания имеет место в начале процесса, когда толщина затвердевшей корки отливки  $\zeta = 0$ . Далее по мере увеличения  $\zeta$  скорость затвердевания возрастает и максимальная линейная скорость затвердевания имеет место на оси цилиндрической отливки в конце процесса затвердевания.

В формулу (1) толщина стенки утеплительной вставки явным образом не входит. Но при выборе температуры среды  $t_c$  оказывается, что она зависит от толщины стенки утеплительной вставки  $X_2$ . Согласно формулам (2), эту зависимость приблизительно можно представить так:

$$t_c \sim \frac{t_s + t_o f(X_2)}{1 + f(X_2)}, \quad (3)$$

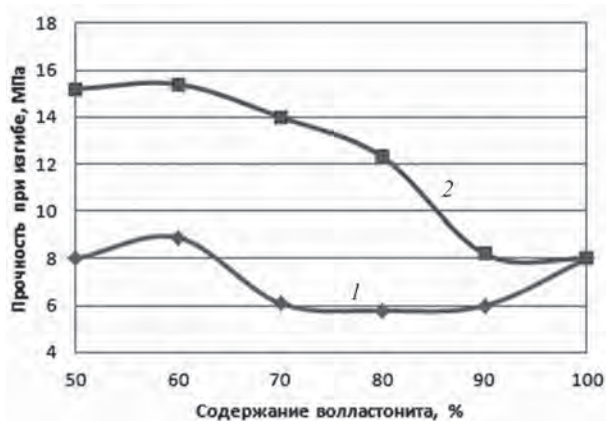


Рис. 6. Изменение прочности различных систем керамических изделий при изгибе в зависимости от содержания волластонита: 1 – волластонит (шлак-шамот-глина); 2 – волластонит-глина

$$f(X_2) = \frac{\lambda_2 n_2}{\alpha_1 X_2},$$

где  $\lambda_2$  – коэффициент теплопроводности материала утеплительной вставки;  $n_2$  – показатель параболы температурного поля в утеплительной вставке;  $t_0$  – температура окружающей среды.

Для конкретных размеров отливки и утеплительной вставки проведен анализ величины скорости кристаллизации отливки согласно формулам (1)–(3). Имеем  $\lambda_1 = 120$  Вт/(м·К),  $\lambda_2 = 0,5$  Вт/(м·К);  $C_1 = 900$  Дж/(кг·К);  $t_s = 600$  °С;  $t_0 = 20$  °С;  $\rho_1 = 3,8 \cdot 10^5$  Дж/кг;  $Q_1 = 5 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с;  $n_1 = 1,25$ ;  $n_2 = 0,5$ ;  $X_1 = 20$  мм;  $X_2 = 20$  мм. Так как жидкий металл в утеплительной вставке является прибылью, то толщина ее затвердевшей корки  $\zeta$  должна быть как можно меньше, чтобы прибыль могла выполнять свою непосредственную функцию источника жидкого металла. Примем, что  $\zeta = 4$  мм, тогда скорость кристаллизации составляет примерно 0,05 мм/с. При этом утеплительная вставка прогреется на всю толщину и температура ее внешней поверхности повышается на 10–50 град. Из этого можно сделать вывод, что вставку с толщиной стенки 20 мм в тепловом отношении можно рассматривать как бесконечное тело.

Если принять, что  $\zeta = 4$  мм и уменьшать толщину стенки вставки  $X_2$ , то, согласно формуле (1) и результатам расчета, скорость кристаллизации начинает существенно зависеть от  $X_2$ , лишь когда  $X_2$  становится меньше 7 мм. Например, при  $\zeta = 4$  мм и  $X_2 = 5$  мм,  $U_2 = 0,04$  мм/с. Однако утеплительная вставка толщиной стенки  $X_2 = 5$  мм не обладает достаточной механической прочностью, чтобы служить в качестве утеплительной вставки прибыльной части отливки.

Таким образом, при выборе толщины стенки утеплительной вставки, ее конструкции с учетом свойств материала необходимо исходить, прежде всего, из условий обеспечения: технологичности изготовления на всех этапах производства; конструктивной прочности материала на уровне  $\sigma_{сж} > 10$ –25 МПа;  $\sigma_{сж} > 8$ –10 МПа и невысокого (менее 0,3–0,5 Вт/(м·К)) коэффициента теплопроводности; термостойкости, обеспечивающей многократное использование (не менее 800–1000 заливок).

### Литература

1. Смирнов В. Н., Ярополов И. И. Патент RU № 2017575. Состав экзотеплоизоляционной смеси для обогрева прибылей, 1994.
2. Ласковнев А. П., Овчинников В. В., Волочко А. Т., Макарова Ж. Е., Чурко Н. А. Патент РБ № 1577. Утеплительная вставка для алюминиевых сплавов, 2004.
3. [http:// www.rantal-impex.ru](http://www.rantal-impex.ru)
4. Волочко А. Т., Ласковнев А. П., Овчинников В. В., Жданович О. Е. Патент РБ № 1075. Утеплительная вставка для литья алюминиевых сплавов, 2003.
5. Волочко А. Т., Подболотов К. Б., Дятлова Е. М. Огнеупорные и тугоплавкие керамические материалы. Минск: Беларуская навука, 2013. 385 с.
6. Волочко А. Т. Переработка и использование алюминиевых отходов в производстве порошков, паст, композиционных и керамических материалов. Минск: Беларуская навука, 2006. 302 с.
7. Ласковнев А. П., Овчинников В. В., Жданович О. Е. Производство алюминиевых поршней для высокофорсированных двигателей внутреннего сгорания. Минск: Экоперспектива, 2004. 190 с.
8. Волочко А. Т. Синтез огнеупорной керамики на основе фосфатного связующего и многокомпонентных систем оксидов // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2013. № 2. С. 33–40.
9. Розанова В. С., Довбыш А. В. Пути улучшения стойкости огнеупорных материалов, применяемых в производстве алюминия // Технологии легких сплавов. 1981. № 9. С. 20–22.
10. Пат. РБ № 9508. Огнеупорная керамическая масса. 2007.
11. Керамика из природного волластонита для литейных установок алюминиевой промышленности / Л. Н. Русанова [и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. 2008. № 5. С. 39–44.
12. О применении волластонита в производстве композиционных строительных материалов и изделий на основе цемента / В. И. Эйрих [и др.] // Строительные материалы. 2002. № 1. С. 14.
13. Вейник А. И. Теория затвердевания отливки. М.: Машиностроение, 1960. 435 с.
14. Вейник А. И. Расчет отливки. М.: Машиностроение, 1964. 403 с.

### References

1. Smirnov V. N., Yaropolov I. I. *Sostav ekzoteploizolyatsionnoy smesi dlya obogreva pribyiley* [Composition of Exoinsulating Mixture for Heating-up of Shrinkage Heads]. Patent RU, no. 2017575, 1994.
2. Laskovnev A. P., Ovchinnikov V. V., Volochko A. T., Makarova Zh. E., Churko N. A. *Uteplitel'naya vstavka dlya alyuminiyevykh splavov* [Warmth-keeping Insert for Aluminum Alloys]. Patent BY, no. 1577, 2004.
3. [http:// www.rantal-impex.ru](http://www.rantal-impex.ru)

4. Volochko A. T., Laskovnev A. P., Ovchinnikov V. V., Zhdanovich O. E. *Uteplitel'naya vstavka dlya litya alyuminievykh splavov* [Warmth-keeping Insert for Casting of Aluminum Alloys]. Patent BY, no. 1075, 2003.
5. Volochko A. T., Podbolotov K. B., Dyatlova E. M. *Ogneupornye i tugoplavkie keramicheskie materialy* [Refractory and Heat-resistant Ceramic Materials]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2013. 385 p.
6. Volochko A. T. *Pererabotka i ispolzovanie alyuminievykh otdodov v proizvodstve poroshkov, past, kompozitsionnykh i keramicheskikh materialov* [Wastes for Production of Powders, Pastes, Composite and Ceramic Materials]. Minsk, Belaruskaya nauka Publ., 2006. 302 p.
7. Laskovnyov A. P., Ovchinnikov V. V., Zhdanovich O. E. *Proizvodstvo alyuminievykh porshney dlya vysokoforsirovannykh dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Production of Aluminum Pistons for High-boosted Internal Combustion Engines]. Minsk, Ekoperspektiva Publ., 2004. 190 p.
8. Volochko A. T. Sintez ognepornoy keramiki na osnove fosfatnogo svyazuyushego i mnogokomponentnykh sistem oksidov [Synthesis of Refractory Ceramic Materials Based on a Phosphate Binding Agent and Multicomponent Oxide Systems]. *Vesti Natsional'nay Akademii nauk Belarusi. Ser. fizika-tekhnicheskikh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Ser. Physical-technical Sciences*, 2013. no 2, pp. 33–40.
9. Rozanova V. S., Dovbyish A. V. Puti uluchsheniya stoykosti ognepornykh materialov, primenyaemykh v proizvodstve alyuminiya [Ways of Increasing the Durability of Refractory Materials Applied in Production of Aluminum]. *Tehnologiya legkikh splavov = Technology of light alloys*, 1981, no. 9, pp. 20–22.
10. Volochko A. T., Laskovnev A. P., Batsevichus O. G.-A., Ovchinnikov V. V., Belov I. A. *Ogneupornaya keramicheskaya massa* [Refractory Ceramic Mixture]. Patent BY, no. 9508, 2007.
11. Keramika iz prirodnogo wollastonita dlya liteynykh ustanovok alyuminievoy promyshlennosti [Natural Wollastonite Ceramics for Casting Machines of Aluminum Industry]. L. N. Rusanova [i dr.]. *Ogneupory i tehicheskaya keramika = Refractories and Technical Ceramics*, 2008, no. 5, pp. 39–44.
12. O primenenii wollastonita v proizvodstve kompozitsionnykh stroitelnykh materialov i izdeliy na osnove tsementa [Application of Wollastonite in Production of Composite Constructional Materials and Cement-based Products]. V. I. Eyrih [i dr.]. *Stroitelnye materialy = Building materials*, 2002, no. 1, p. 14.
13. Veinik A. I. *Teoriya zatverdeniya otlivki* [Theory of Casting Solidification]. Moscow, Mashgiz Publ., 1960, 435 p.
14. Veinik A. I. *Raschyot otlivki* [Calculation of Casting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1964, 403 p.

#### Сведения об авторе

Волочко Александр Тихонович, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», ул. Купревича, 10, 210141, Минск, Республика Беларусь. E-mail: volochkoat@mail.ru. Тел.: + 375 29 675-68-62.

#### Information about the authors

Volochko Alexander, Physical and Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, 10 Kuprevich Str., Minsk, 220141. Belarus. E-mail: volochkoat@mail.ru. Tel.: + 375 29 675-68-62.