



## Закономерности износа ковшовой футеровки. Результаты исследований

*В статье проанализировано влияние на стойкость ковшовой футеровки вида огнеупора, условий его эксплуатации. Оценено воспроизводимость результатов. Табл. 12. Библиогр.: 11 назв.*

**Ключевые слова:** ковш, огнеупор, стойкость, факторы

*The influence of type of refractory material and its operational conditions on the resistance of ladle lining is shown in the article. Repeatability is estimated.*

**Keywords:** ladle, refractory material, resistance, factors

### 1. История и состояние вопроса

Износ ковшовой футеровки, во многом определяемый составом шлака и, в частности, его окисленностью [1], инициировал в свое время поиски методов ее снижения.

В 1937 году ряд зарубежных фирм использовали графито-шамотную (ГШ) футеровку ковшей. В 1941 году академик АН УССР Будников П. П. и Цейтлин Л. А. применили ее в 7 т ковшах при разливке стали Гатфильда, содержащей 17 % Mn и поэтому быстро изнашивающей шамотную футеровку. Исследования Towers Н. (1955 г.) показали, что при 30 % графита в шамоте его стойкость увеличивается на 30 %, а при 50 % – на 50 %. Данные Зегжды В. П. (ДМетИ, 1959 г.) об интенсивности шлакоразъедания (Ш, мм<sup>2</sup>) с изменением концентрации «С» в ГШ огнеупоре могут быть обобщены уравнением

$$\text{Ш} = 5,9 - 0,357 \langle \text{С} \rangle + 5,7(-3) \langle \text{С} \rangle^2 \quad (1)$$

Как установил G. W. Workman (1962 г.), ГШ не смачивается шлаком, обладает высоким сопротивлением его проникновению в футеровку, не склонен к трещинам в отличие от основных огнеупоров, но требовала решения проблема связующих. В конце 1970-х годов она была решена при изготовлении периклазо-углеродистых (ПУ) огнеупоров [2-4]. Для монолитной футеровки ее средняя стойкость составила 1040 плавов (Германия, 2003 г.). Для ПУ огнеупора, обобщив данные приведенные в [2], получим уравнение скорости его износа V, г/м<sup>2</sup>с,

$$V = 12,5 \langle \text{С} \rangle - 1,4, \quad (2)$$

где «С» – содержание в огнеупоре коксового остатка.

В 1950-х годах получило развитие увеличение в огнеупорах системы SiO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> содержания глинозема, как более тугоплавкого, чем кремнезем. Анализ стойкости 13 ковшей вместимостью 20-200 т показал (1959 г.), что при Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > 55 % (перитекти-

ческая точка диаграммы SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> t<sub>пл</sub> = 1800 °С) стойкость ковшей составляла N = (20-75)/52/4\*, скорость износа футеровки, мм/пл. V<sub>1</sub> = (1,9-7)/3,6/3, а при Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> < 55 % N = (6-110)/88/6, V<sub>1</sub> = (1,4-2,5)/2,0/3. По данным Howard V. J. (США, 1956 г.) замена в 4 т ковше динаса набивкой 80 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 18 % SiO<sub>2</sub> увеличила стойкость футеровки с 41 до 106 плавов. Статистическая обработка экспериментальных данных [2] позволяет установить степень влияния на стойкость ковша его параметров и внепечной обработки. Содержание в ковшовом шлаке суммы содержания оксидов железа и марганца может иметь оптимум, при котором скорость износа футеровки минимизируется [5]. С увеличением скорости износа футеровки из-за снижения в огнеупоре концентрации глинозема растет загрязнение стали [6].

На современном металлургическом предприятии с конвертерным производством до 30 % всех расходующихся составляют ковшовые огнеупоры [7], что требует поиска путей их экономии.

К физико-химическим процессам износа ковшовых огнеупоров применимы теоретические положения [3]: зависимость температуры начала взаимодействия оксида металла с углеродом от температуры плавления оксида; температура Бочвара-Толмана, при которой начинается заметная диффузия в решетке твердого тела и протекает химический процесс, также определяемый этой температурой; температура начала взаимодействия связана со стандартным изменением энергии Гиббса при диссоциации оксида [3]. Изучены диффузия кислорода в оксиде магния, вязкость глинозема при t < 2000 °С, теплопроводность углеродсодержащих огнеупоров. В [8] рассмотрена термодинамика реакции <MgO> + <C> → {Mg} + {CO}, лежащей в основе использования в футеровке ковшей периклазоуглеродистых огнеупоров. Разработан механизм создания плотного слоя оксида магния в результате оседания паров магния на поверхности огнеупора.

Изложенное служит предпосылками к анализу результатов эксплуатации ковшовой футеровки.

**2. Зона взаимодействия**

При эксплуатации ковшовой футеровки на поверхности ее контакта с фазами сталеплавильной системы происходят превращения на толщину  $\delta$  огнеупора. В табл. 1а представлены для разных огнеупоров величины толщины зоны взаимодействия ( $\delta_1$ ) и гарнисажа ( $\delta_2$ ), температуры плавления шлака ( $t_1$ ) и материала зоны взаимодействия ( $t_2$ ). Толщина гарнисажа на порядок величины больше прореагировавшего огнеупора и приблизительно одинакова в отечественных (О) и зарубежных (З) исследованиях. Температура плавления зоны взаимодействия по-разному соотносится с температурой плавления шлака. Для особостойких огнеупоров (ПШ, ПУ) она, по-видимому, больше. Для шамота и песчаной набивки нижний предел  $t_2$  весьма мал, что и объясняет низкую стойкость этих огнеупоров. В [6] и [9] представлены составы ковшového шлака и зоны взаимодействия, что позволяет рассчитать по [10] долю шлака по балансу  $SiO_2$  и  $Al_2O_3$ . В песчаной набивке она составила 0,2, а в шамоте при расчете по балансу  $SiO_2$  1,0; 0,71 и 1,25, а по  $Al_2O_3$  – 0,88; 0,21 и 0,24. Таким образом, подтверждается и объясняется факт большей стойкости песчаной набивки.

**Таблица 1а. Характеристика взаимодействия ковшовых фаз и огнеупора**

Истр.	Пара-метр	Ш	П	КВ	MgO-SiO <sub>2</sub> -C	MgO-SiO <sub>2</sub> -C	MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -C	ПШ	ПУ
0	$\delta_1$	0,2-1,2 0,7/5					1,0 1,0/1		
	$\delta_2$	25 25/1			18-35 26/2			20 20/1	
	$t_1$	1450-1570 1507/3				1700 1700/1			
	$t_2$	1350-1700 1484/15	1300-1700 1536/6	1600 1600/1	1750-1800 1775/4			> 2000 > 2000/1	1630 1630/1
3	$\delta_1$								
	$\delta_2$		10-40 23/3						
	$t_1$								1500 1500/1
	$t_2$		1500-1600 1560/3						> 2100 > 2100/1

\* Здесь и далее: числитель – диапазон величины показателя, знаменатель – его средняя величина/количество случаев.

Зона взаимодействия характеризуется химическим составом – содержанием оксидов, определяющих стойкость огнеупора:  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $ZrO_2$ . Для обобщения различных содержаний этих оксидов в разных исследованиях использован относительный показатель  $C = C_3 / C_o$ , где  $C_3$ ,  $C_o$  – концентрации оксида в зоне взаимодействия и огнеупоре.

В табл. 1б представлены эти величины, содержание углерода  $\langle C \rangle$ , %, в углеродсодержащих огнеупорах, температура  $t_2$  и скорость износа огнеупора  $V_1$ , мм/пл, и  $V_2$ , мм/час, в зависимости от размерности ее в опубликованных данных.

**Таблица 1б. Параметры ковшовых огнеупоров в зоне взаимодействия**

Пара-метр	ГШ	Ш	П	МКВ	ПХ	ZrO <sub>2</sub>	MgO-SiO <sub>2</sub>	MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - $\langle C \rangle$	ПУ
$SiO_2$		0,27-1,00 0,73/15	0,39-0,96 0,77/12				0,14-1,4 0,91/12		
$Al_2O_3$		0,50-1,90 0,88/15	1,0-3,5 1,77/11					0,21 0,21/1	
$MgO$					0,71 0,71/1		0,72-1,0 0,82/12	0,5 0,5/1	88 88/1
$Cr_2O_3$					0,85 0,85/1				
$ZrO_2$									
$\langle C \rangle$									6-14 10/9
$t_2$		1200-1700 1470/19	1350-1700 1582/12		> 2000 > 2000/1		1700-1830 1762/12		1630- > 2000 > 1815/2
$V_1$	2,8-3,6 3,3/3	1,2-1,5 6,6/11	1-1,0 5,6/6		14-16 15/2	3,4 3,4/1	1,5-3,7 2,4/3	1,5 1,5/1	0,8-3,2 2,2/7
$V_2$		0,9-1,8 6,7/15	3 3/1	8 8/1			0,4-4,7 2,4/4		1,5-2 3,4/4

Первый по значимости оксид огнеупора имеет величину  $C$  близкую к 1, что логично. Второй – может быть больше 1, если его концентрация мала ( $Al_2O_3$  в П) или меньше 1, если сопоставима с концентрацией ведущего оксида ( $Al_2O_3$  в  $MgO-Al_2O_3-\langle C \rangle$ ).

Как показано выше (см. табл. 1), температура плавления материала зоны взаимодействия  $t_2$  может быть выше фактической температуры сталеплавильной ванны, и характеризует стойкость огнеупора в целом (периклазовые огнеупоры).

Начиная с первого углеродсодержащего огнеупора (ГШ) и включая современные периклазоуглеродистые (ПУ) и  $MgO-Al_2O_3-\langle C \rangle$  огнеупоры, их стойкость, помимо огнеупорности, определяется раскисляющим шлаком действием углерода.

**3. Стойкость ковшовых огнеупоров**

В табл. 2 проанализировано влияние на стойкость ковшовой футеровки  $N$  плавки, в странах СНГ и за рубежом в конверторных (К), мартеновских (М) и электросталеплавильных (Э) цехах ряда факторов.

По-видимому, существует незначительная тенденция снижения стойкости с увеличением массы плавки, что связано с ростом силы удара струи стали на выпуске в так называемой бойной зоне. Тенденция сглаживается вследствие обычно принима-

## СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

**Таблица 2а. Стойкость ковшовых огнеупоров N, плавки**

Страны	Агрегат	Садка, т				
		< 100	100-200	200-300	300-400	> 400
СНГ	К		17-29 22/5	10-11 10/2	20-30 26/4	-
	М		7-10 9/4	6-22 12/8	8-17 12/5	12 12/1
	Э	32 32/1	7-22 13/7	8 8/1		
З	К	12-35 21/3	17-40 31/3	25-40 32/2		
	М	30 30/1	16-30 24/12			
	Э	12-49 30/4	14-43 28/3			

емых мер по утолщению в этом месте футеровки. Отечественная стойкость ковшей ниже, чем зарубежная, что связано с менее стойкими огнеупорами (табл. 2а). Особенно низкая стойкость ковшей в мартеновских цехах из-за старения всего оборудования.

При одинаковом ковшовом огнеупоре его стойкость в сталеплавильных цехах СНГ ниже, чем в зарубежных, иногда значительно (табл. 2б), что объясняется, в первую очередь, качеством огнеупоров. Заметнее и более высокая величина N в ККЦ СНГ, в большинстве случаев более поздней постройки.

**Таблица 2б. Стойкость ковшовых огнеупоров**

Страны	Агрегаты	Огнеупор						
		МД	ПУ	ПК	МК	МКР	КВ	Ш
СНГ	К		31 31/1	35 35/1	30 30/1	7-26 16/2	11-29 22/5	10-22 16/6
	М				22 22/1		11-29 22/5	6-17 11/15
	Э				18-22 21/3	7 7/1		7-16 11/5
З	К	115 115/1		40 40/1				17-25 21/2
	М			30-38 34/2				16 16/1
	Э				36-49 42/2	24-43 32/3		12-14 13/1

*Примечание:* МД – магнезитодоломит; ПУ – периклазоуглеродистый; ПК – полукислый; МК – муллитокорунд; МКР – муллитокремнеземистый; КВ – кварцит; Ш – шамот

Зарубежная ковшовая металлургия ориентируется, главным образом, на использование более качественных материалов, считая, что «дешевая рыбка – погана юшка». В определенной степени это подтверждается данными табл. 2в. За рубежом эксплуатируются и старые цехи (иногда, кстати, сдаваемые в аренду предпринимателям СНГ), которые уже не

боятся показывать свои результаты. Данных по некоторым огнеупорам не приводится из-за их отсутствия в эксплуатации.

**Таблица 2в. Стойкость ковшовых огнеупоров**

Страны	Огнеупор					
	ГШ	ПШ	КВ	Ш	ВГ	Д
О	8 8/1	7 7/1	8-12 10/2	6-20 11/17	14-39 24/3	30 30/1
З			5 5/1	8 8/1	30-100 69/4	41 41/1
		НП	СДМ	АМ	ПУ	Дол
О	8-71 34/6	35 35/1	55 55/1	23-149 70/8	77 77/1	
З						90 90/1

*Примечание:* ГШ – графитошамот; КВ – кварцит; Ш – шамот; ВГ – высокоглиноземистый; Д – динас; НП – набивка песка; СДМ – смолодоломитомagneзит; ПУ – периклазоуглеродистый; Дол – доломит

В табл. 2г-е выделены огнеупоры с наиболее часто используемыми компонентами. При содержании в огнеупоре  $Al_2O_3 > 70\%$  стойкость отечественных ковшей несколько выше, чем зарубежных. Но зарубежное производство ориентируется, судя по количеству случаев, на огнеупоры с  $Al_2O_3 < 70\%$ , где имеют место значительно более высокие как средние, так и максимально достигнутые результаты (табл. 2г).

**Таблица 2г. Стойкость ковшовых огнеупоров**

Страны	$Al_2O_3, \%$					
	< 50	50-60	60-70	70-80	80-90	> 90
СНГ	26-39 32/2	21-22 22/2	18-50 28/4	10-34 25/4	20-28 22/4	
З	28 28/1	17 17/1	17-30 25/4	9-331 110/12	40-260 114/7	98-450 274/2

За рубежом достигнута высокая стойкость и на магнезитосодержащих огнеупорах (табл. 2д). Обращает на себя внимание факт выделения из общего ряда огнеупоров с 50-60 %  $Al_2O_3$  и 10-50 % MgO при отсутствии случаев использования магнезиальных огнеупоров с 50-60 % MgO (по крайней мере, в публикациях).

**Таблица 2д. Стойкость ковшовых огнеупоров**

Страны	MgO, %					
	< 40	40-50	50-60	60-70	70-80	> 80
З	41-45 43/3	126- 260 174/3		125- 203 164/2	65-89 77/2	60-203 118/4

Огнеупоры, содержащие диоксид циркония, имеют максимальную стойкость при 40-50 % ZrO<sub>2</sub> (табл. 2е).

**Таблица 2е. Стойкость ковшовых огнеупоров**

Страны	ZrO <sub>2</sub> , %				
	< 30	30-40	40-50	50-60	> 60
3	<u>56</u> 56/11	<u>50</u> 50/2	<u>100-260</u> 180/2	<u>80-200</u> 116/4	<u>50-52</u> 51/2

Максимум температуры плавления существует в системе CaO-ZrO<sub>2</sub> и составляет 2840 °С при 62 % ZrO<sub>2</sub>. В системах ZrO<sub>2</sub>: с MgO – 2070 °С, 74 % ZrO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 1890 °С, 55 % ZrO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> – 1680 °С 4,5 % ZrO<sub>2</sub>, FeO – 1330 °С, 3 % ZrO<sub>2</sub> – эвтектики. Наиболее вероятно, что износ цирконатной ковшовой футеровки определяется окисленностью шлака.

**4. Воспроизводимость результатов**

Для оценки успешности работы ковшовой футеровки в различных режимах использован относительный показатель, названный воспроизводимостью (reproduce) результатов, %

$$R = 100(X_{\max} - X_{\min}) X_{cp}, \quad (3)$$

где X<sub>max</sub>, X<sub>min</sub>, X<sub>cp</sub> – максимальное, минимальное и среднее значение параметра в диапазоне его известных величин. Он рассчитывался при использовании огнеупора данного производителя не менее года. Уменьшение величины R свидетельствует о стабилизации качества огнеупора, что особенно ценно, если производитель обеспечивал одновременно нескольких потребителей.

В табл. 3а представлена динамика воспроизводимости результатов при использовании сталеплавильными цехами ковшовых огнеупоров произведенных в Украине (О), Германии (G), КНР (Ch), Турции (Tu) в 2003-12 гг.

**Таблица 3а. Динамика воспроизводимости результатов использования ковшовых огнеупоров разных стран**

Страна	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2011	2012
О	<u>8-68</u> 22/19	<u>5-31</u> 19/17	<u>5-29</u> 13/15	<u>7-26</u> 14/16	<u>4-25</u> 13/12	<u>4-39</u> 13/11	<u>6-51</u> 25/9	<u>11-77</u> 36/6	<u>3-28</u> 17/4
G	<u>10-34</u> 19/3	<u>16-50</u> 30/4	<u>11-26</u> 18/4	<u>9-44</u> 23/4	<u>6-50</u> 18/4	<u>11-25</u> 17/4	<u>11-27</u> 20/3	<u>3-12</u> 8/2	
Ch					<u>12-15</u> 14/4	<u>14-38</u> 30/4	<u>16-36</u> 23/3	<u>11-45</u> 20/6	<u>11-25</u> 18/7
Tu					<u>14</u> 14/1	<u>22-53</u> 38/2	<u>23-26</u> 24/2	<u>16</u> 16/1	

Общая тенденция – снижение R, нарушенная мировым кризисом, но затем восстановленная зарубежными производителями. В Украине масштабы производства ковшовых огнеупоров (количество случаев) непрерывно снижалось, что и вызвало уменьшение величины R<sub>ср</sub> в 2012 году после мирового кризиса. Фирмы Германии стабильно присутствовали на украинском рынке ковшовых огнеупоров, но в 2009-2011 гг. уступили первенство китайским и турецким производителям, появившимся на рынке в 2007 году. В 2012 году зарубежные поставки осуществлялись только фирмами КНР. Общее количество случаев поставок на украинский рынок сократилось с 22 в 2003 году до 11 в 2012 году, что отчасти объясняется переходом кислородно-конвертерного производства на периклазо-углеродистые огнеупоры и увеличение стойкости футеровки в несколько раз.

Анализ величины воспроизводимости для отдельных поставщиков показывает (табл. 3б), что величина R минимальна, когда используется собственное производство и вновь созданное на базе Calderis (Германия) фирмы Calderis (Украина). Близки к ним результаты фирмы Lafarge (Украина), преемницы одноименной немецкой фирмы. Воспроизводимость качества продукции отечественных огнеупорных предприятий не уступает лучшим зарубежным.

**Таблица 3б. Воспроизводимость стойкости футеровки разных производителей**

Шифр	A	B	B	Г	Д
О	<u>3-1</u> 7/9	<u>6-79</u> 20/38	<u>9-51</u> 19/22	<u>8-50</u> 23/15	<u>10-27</u> 16/3
Шифр	A	B	C	D	E
3	<u>12-18</u> 16/4	<u>10-33</u> 36/6	<u>8-30</u> 16/4	<u>13-40</u> 26/8	<u>18-55</u> 34/5
	F	G	H	I	J
	<u>9-39</u> 21/6	<u>14-40</u> 25/18	<u>36-53</u> 31/3	<u>11-18</u> 14/2	<u>3</u> 3/1

A – собственное пр-во; B – Овручский ГОК; B – ЧасовойЯрский ОЗ; Г – 3ОЗ; Д – Lafarge (Украина); A – Керамет Фематек; B – Vesuvius Lafarge (G); C – Dalmond (КНР); D – Lafarge (G); E – Duferco (КНР); F – Calderis (G); G – Dalmond (КНР); H – Melt (Tu); I – Puyang (КНР); J – Calderis (Украина)

С увеличением стойкости ковшей в отечественном (О) и зарубежном (3) сталеплавильном про-

## СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

изводстве воспроизводимость величины R растет (табл. 3в), особенно заметно для ковшей вместимостью свыше 100 т, что объясняется как совершенствованием их конструкции, так и ростом чувства ответственности персонала. Для ПУ огнеупоров она заметно ниже для отечественных, чем зарубежных поставок и обеспечивает менее 10 % потребляемого.

**Таблица 3в. Воспроизводимость результатов при различной стойкости ковшовых огнеупоров**

Страна	>10	10-30	30-50	50-70	70-90	90-110	110-130	>130
О	<u>5-42</u> 23/13	<u>3-77</u> 18/71	<u>8-46</u> 17/14	<u>14-40</u> 20/3	<u>14-26</u> 20/6		<u>4-8</u> 6/2	<u>4-13</u> 9/5
З		<u>11-50</u> 31/11	<u>12-50</u> 20/9	<u>11-38</u> 18/22	<u>3-36</u> 18/17	<u>10-38</u> 18/5		<u>3-7</u> 5/2

Ведущие позиции занимают кварцитовые огнеупоры с приемлемо низкой величиной R (табл. 3г).

**Таблица 3г. Воспроизводимость результатов для разных ковшовых огнеупоров**

Страна	Ш	П	КВ	ШКУ	ПХ	ПУ	АПУ	МКР
О	<u>5-33</u> 17/11	<u>8-51</u> 27/9	<u>3-68</u> 18/58	<u>8-28</u> 14/10	<u>4-13</u> 8/6	<u>13-46</u> 34/3	<u>14-18</u> 17/4	<u>42</u> 42/1
З						<u>11-53</u> 23/48	<u>18</u> 18/1	

Рейтинг отечественных предприятий по воспроизводимости результатов применения отечественных и зарубежных ковшовых огнеупоров должен интенсифицировать поиск приемлемых поставщиков:

Предприятие, R, %	КрМК	ДонМЗ	МКЗ	МКА	АМК	ДСС
	8,5	12	15	16	20	22
	ММК	ЕМЗ	ДнМЗ	ДМК	МакМЗ (до 2009 г)	
	23	24	26	29	39	

### 5. Износ углеродсодержащего огнеупора

Удельная интенсивность окисления углерода  $i_c$ , г-ат/см<sup>2</sup>с углеродсодержащего огнеупора может быть определена по уравнению (6.64) [10] и на внепечной стадии сталеплавильных процессов, в

среднем, составляет около 1,7(-5) г-ат/см<sup>2</sup>с площади контакта огнеупор-шлак. Тогда скорость износа футеровки, если она лимитируется скоростью окисления углерода, составит

$$V = 100 i_c M_c / \rho_o \langle C \rangle, \quad (4)$$

где  $M_c$  – атомарная масса углерода;  $\rho_o$  – плотность огнеупора.

При измерении V в мм/мин она будет

$$V = 4 / \langle C \rangle. \quad (5)$$

Сопоставляя теоретическое (t) и эмпирическое (1) выражения можно говорить о качественном соответствии.

### Выводы

Проанализированы факторы определяющие стойкость и скорость износа ковшовой футеровки в разных условиях.

### Библиографический список

- Охотский В. Б., Зражевский А. Д. Закономерности износа ковшовой футеровки. Предпосылки (находится в редакции).
- Великин Б. А., Карклит В. К., Колпаков С. В. и др. Футеровка сталеразливочных ковшей. – М.: Металлургия, 1990. – 248 с.
- Кашеев И. Д., Оксидно-углеродистые огнеупоры. М.: Интерметинжиниринг, 2000. – 265 с.
- Стариков В. С., Темлянцев М. В., Стариков В. В. Огнеупоры и футеровки в ковшовой металлургии. – М.: МИСиС, 2003. – 328 с.
- Аристов Г. Г. Огнеупорные изделия для разлива стали. – М.: Металлургия, 1969. – 264 с.
- Маргулис О. М., Караулов А. Г. // Огнеупоры. – 1956. – № 6. – С. 253-258.
- Левада А. П., Денисов Ю. Л., Гареев Д. О., Белюсов А. М. // Сталь. – 2010. – № 11. – С. 25-26.
- Fruehan R. J., Mortonik A. J. // Met. Trans. – 1976. – Vol. 7B. – № 4. – P. 537-572.
- Карклит А. К., Шевченко В. П., Лапотышкин Н. Т. // Огнеупоры. – 1970. – № 7. – С. 27-35.
- Охотский В. Б. Модели металлургических систем. – Днепропетровск: Системные технологии, 2006. – 287 с.
- Торопов Н. А., Барзаковский В. Н., Лапин В. В., Курцева Н. Н. Диаграммы состояния силикатных систем. Справочник. – Ленинград: Наука, 1969. – 822 с.

Поступила 15.01.2014