

*Канд. техн. наук В. В. Мартыненко,
канд. техн. наук П. А. Кущенко,
канд. техн. наук И. Г. Шулик, канд. техн. наук К. И. Кущенко,
канд. техн. наук Ю. А. Крахмаль, Л. П. Ткаченко
(АО «УкрНИИО имени А. С. Бережного», г. Харьков, Украина)*

Исследование влияния вида глинозема α -формы на свойства образцов из вибролитых муллитокорундовых зернистых масс

Введение

В АО «УкрНИИО имени А. С. Бережного» разработана технология вибролитья огнеупоров [1, 2], в частности высокоогнеупорных муллитокорундовых тиглей для плавки жаропрочных сплавов в индукционных печах [3—6]. Технология изготовления вибролитых муллитокорундовых огнеупоров предполагает использование в качестве дисперсионной связки глинозема α -формы, измельченного до размера зерен менее 10 мкм [2] (содержание в таком глиноземе частиц менее 4 мкм составляет более 50 %). Для улучшения литьевых характеристик вибролитых масс применяют диспергаторы [1—9]. Исследованиями [10] показана эффективность замены части глинозема, содержащего α -форму > 90 %, активными глиноземами в количестве 1, 2 и 3 %: реактивным бимодальным и сверхреактивным мономодальным, что способствует увеличению прочности как сырца, так и обожженных образцов.

Учитывая вышеизложенное, с целью доработки и совершенствования технологии вибролитых муллитокорундовых изделий, а также расширения сырьевой базы, проведение исследований влияния новых глиноземов α -формы на свойства образцов из вибролитых муллитокорундовых зернистых масс является актуальным и представляет научный и практический интерес.

Экспериментальная часть

Для проведения исследований были использованы: плавленые корунд и муллит фр. 3—0 мм производства АО «УкрНИИО имени А. С. Бережного»; глиноземы марок S, N и NR с содержанием

α -формы > 90 % различных производителей и диспергаторы на основе полиэтиленгликоля. Химический состав сырьевых материалов, который определяли в соответствии с действующими методиками и ГОСТами, приведен в табл. 1.

По данным петрографического анализа*, плавленный корунд (α - Al_2O_3 93—95 %) представлен изометричными кристаллами размером 0,1—0,4 мм, между которыми наблюдаются включения стекловидного вещества (до 1 об. %) и щелочного β - Al_2O_3 ~ 5—7 %.

Таблица 1

Химический состав сырьевых материалов

Наименование материала	Массовая доля, %							
	$\Delta m_{\text{прк}}$	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	TiO_2
Корунд плавленный	—	99,53	0,05	0,05	0,02	0,03	0,32	—
Муллит плавленный	—	75,55	23,0	0,17	0,53	0,44	0,31	—
Глинозем марки S	0,02	99,64	0,03	0,01	0,02	—	Na_2O 0,25	0,03
Глинозем марки N	0,02	99,69	0,03	0,01	0,02	—	Na_2O 0,20	0,03
Глинозем марки NR	0,02	99,77	0,03	0,01	0,02	—	Na_2O 0,12	0,03

Плавленный муллит, по данным петрографического анализа, представляет собой прочный сросток длиннопризматических кристаллов удлиненной и игольчатой формы, в котором наблюдаются включения стекловидного вещества в количестве 3—5 об. %. На контакте кристаллов наблюдаются удлиненные поры, вытянутые вдоль направления роста кристаллов.

По данным петрографического анализа, глиноземы марок S, N и NR подобны. Состоят они из округлых агрегатов размером до 100—120 мкм, которые легко измельчаются до частиц размером 30—40 мкм. Фазовый состав указанных глиноземов также подобен и представлен в основном α - Al_2O_3 97—98 %, наблюдается щелочной β - Al_2O_3 в количестве ~ 2—3 об. %, гидратных и переходных форм нет. Отличия глиноземов марок S, N и NR заключаются в их дисперсности (по данным петрографических исследований) и удельной поверхности (по данным сертификатов качества), которые приведены в табл. 2.

Использованные в настоящих исследованиях диспергаторы представляют собой полимеры на основе полиэтиленгликоля в виде порошков бежевого цвета, легко растворимы в воде, насыпной плотностью 300—500 кг/м³. По данным петрографического анализа, диспергаторы представлены частицами окру-

* Все петрографические исследования, приведенные в данной статье, выполнены Тишиной Т. Г.

глой, близкой к изометричной, иногда неправильной формы размером от 8 до 150 мкм. Частицы изотропные с оптическим показателем преломления $\sim 1,530 \pm 0,003$.

Таблица 2

Дисперсность и удельная поверхность товарных глиноземов марок S, N и NR

Марка глинозема	Размер частиц, мкм		Количество частиц, %		Удельная поверхность, м ² /г
	максимальный	преобладающий	< 10 мкм	< 4 мкм	
S	40	4—10	75—80	до 40	0,55
N	30	4—8	88—90	до 40	0,60
NR	40	4—8	88—90	~ 45	0,70

Для проведения исследований глиноземы всех марок подвергали помолу в вибрационной мельнице в течение заданного времени. Для этого в вибрационную мельницу загружали определенное количество исследуемого глинозема каждой марки и по истечению заданного времени помола (30, 45, 60, 75 и 90 мин) отбирали пробу молотого глинозема в определенном количестве.

Петрографические исследования и контроль дисперсности сырьевых материалов осуществляли в проходящем поляризованном свете в иммерсионных препаратах на микроскопе МИН-8.

Электронномикроскопические исследования молотых глиноземов выполняли в режиме вторичных электронов на сканирующем электронном микроскопе JSM-6390LV.

Для проведения исследований готовили массы заданного вещественного состава в смесителе с Z-образными валами. Составы шихт приведены в табл. 3.

Таблица 3

Составы шихт

Компоненты шихты	Содержание компонентов, %, в шихте		
	0 (S)	1 (N)	2 (NR)
Корунд плавленный фр. 3—0 мм	+	+	+
Муллит плавленный фр. 3—0 мм	+	+	+
Глинозем вибромолотый марки S	+	—	—
Глинозем вибромолотый марки N	—	+	—
Глинозем вибромолотый марки NR	—	—	+
Диспергаторы	+	+	+

Из каждой шихты (с использованием глиноземов всех дисперсностей, полученных при всех заданных значениях времени помола) были приготовлены вибролитые массы примерно

одинаковой консистенции (всего 15 масс) при соответствующих значениях влажности, приведенных в табл. 4.

Таблица 4

**Влажность вибролитых муллитокорундовых масс
из глиноземов марок S, N и NR для изготовления образцов**

Время помола глино- зема, мин	Влажность муллитокорундовой массы, %, шихты №					
	0 (S)		1 (N)		2 (NR)	
	Содержание частиц < 4 мкм в глиноземе, %	Влаж- ность мас- сы, %	Содержание частиц < 4 мкм в глиноземе, %	Влаж- ность мас- сы, %	Содержание частиц < 4 мкм в глиноземе, %	Влаж- ность мас- сы, %
30	45	4,1	45	4,6	50	4,6
45	50	4,3	50	4,8	60	4,8
60	55	4,4	55	4,9	70	5,0
75	57	4,5	70	5,0	75	5,0
90	60	4,5	75	5,0	80	5,0

Для определения физико-механических свойств муллитокорундовые образцы изготавливали методом вибролитья в разборных гипсовых формах в виде куба с длиной ребра 40 мм. После извлечения образцов из формы их выдерживали при комнатной температуре ($(+28 \pm 1)^\circ\text{C}$) в течение 2—3 суток, затем сушили при $(110 \pm 10)^\circ\text{C}$ до постоянного веса и обжигали при 1580°C с выдержкой при максимальной температуре 8 ч в газопламенной печи периодического действия опытного производства АО «УкрНИИО имени А. С. Бережного».

Кажущуюся плотность сырца после сушки при $(110 \pm 10)^\circ\text{C}$ до постоянного веса определяли путем замера и взвешивания образцов и рассчитывали как отношение массы образца к его объему; предел прочности при сжатии муллитокорундовых образцов до и после обжига при 1580°C определяли по ГОСТ 4071.1—94 (ИСО 10059-1-92); открытую пористость и кажущуюся плотность муллитокорундовых образцов после обжига при 1580°C — по ДСТУ ISO 5017:2014.

Результаты и их обсуждение

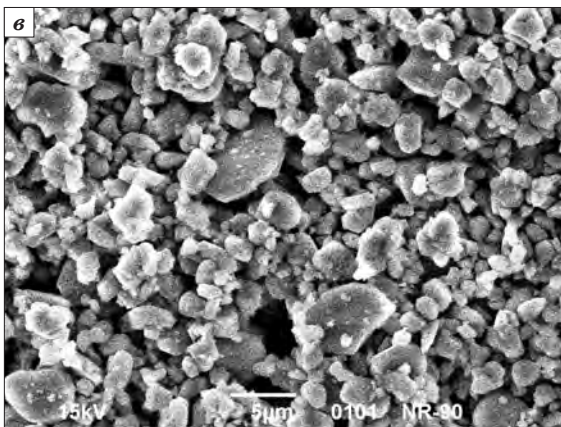
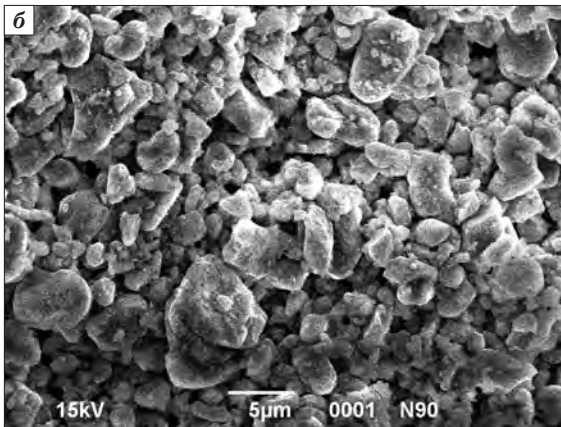
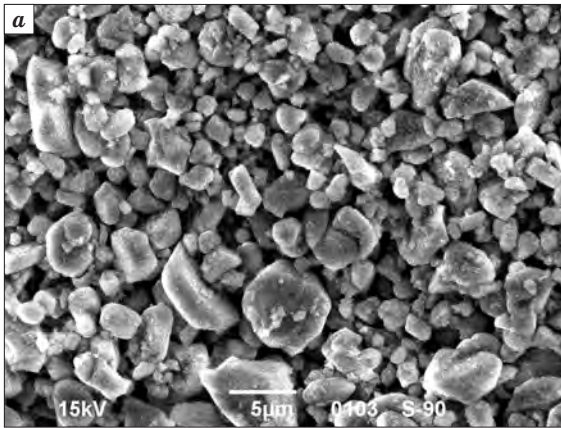
Результаты петрографических исследований кинетики изменения дисперсности глиноземов марок S, N и NR при их вибропомоле приведены в табл. 5, а результаты электронномикроскопических исследований дисперсности и микроструктуры этих глиноземов после 90 мин их помола — в табл. 5 и на рис. 1.

Таблица 5

Зависимость дисперсности глиноземов марок S, N и NR от времени их помола

Время помола	Марка глинозема											
	S				N				NR			
	Размер частиц, мкм		Содержание частиц, %		Размер частиц, мкм		Содержание частиц, %		Размер частиц, мкм		Содержание частиц, %	
	макси-мальный	преобла-дающий	10 мкм	4 мкм	макси-мальный	преобла-дающий	≤ 10 мкм	≤ 4 мкм	макси-мальный	преобла-дающий	≤ 10 мкм	≤ 4 мкм
0	40	4—10	75—80	до 40	30	4—8	88—90	до 40	40	4—8	88—90	~45
30	30	4—8	80—85	~45	25	4—8	90—92	~45	30	4—6	90—92	~50
45	25	4—8	85—88	~50	20	4—6	92—94	~50	20	4—6	92—94	~60
60	20	4—6	88—90	~55	20	4—6	93—95	~55	20	4	94—96	~70
75	20	4—6	90—92	~57	20	4	96—97	~70	20	4	96—97	~75
90 ^{*)}	$\frac{20}{< 10-12}$	$\frac{4-6}{2-4}$	92—93	~60	$\frac{20}{< 10-12}$	$\frac{4}{2-4}$	96—97	~75	$\frac{20}{< 10-12}$	$\frac{4}{2-4}$	96—97	~80

^{*)} Значение, указанное в числителе, — по данным петрографического анализа, в знаменателе — по данным электронно-микроскопического анализа.



Из табл. 5 видно, что необходимая дисперсность глиноземов (содержание частиц < 10 мкм — не менее 90 %, < 4 мкм — не менее 50 %) достигается практически за ~ 45 мин их помола. При дальнейшем увеличении времени помола до 60, 75 и 90 мин дисперсность глиноземов марок N и NR увеличивается по сравнению с глиноземом марки S и после 90 мин измельчения содержание частиц < 4 мкм в глиноземах соответственно составляет ~ 60 ; ~ 75 и ~ 80 %.

Как видно из рис. 1, глиноземы после помола в течение 90 мин характеризуются одинаковым максимальным размером частиц —

Рис. 1. Микроструктура глиноземов марок S (а), N (б) и NR(в) после помола в течение 90 мин

не более 10—12 мкм, а также одинаковым преобладающим размером частиц — 2—4 мкм. В то же время, глиноземы марок N и NR характеризуются также наличием в них частиц менее 2 мкм в количестве до 8—10 и 12—15 % соответственно, которых практически нет (до 1—2 %) в аналогичном молотом глиноземе марки S. Кроме того, молотые глиноземы марок N и NR характеризуются более рельефной (шероховатой), дефектной поверхностью частиц, что также может обуславливать их более высокую активность к спеканию по сравнению с молотым глиноземом марки S, частицы которого имеют ровную поверхность.

Результаты исследований свойств высушенного сырца муллитокорундовых образцов приведены на рис. 2.

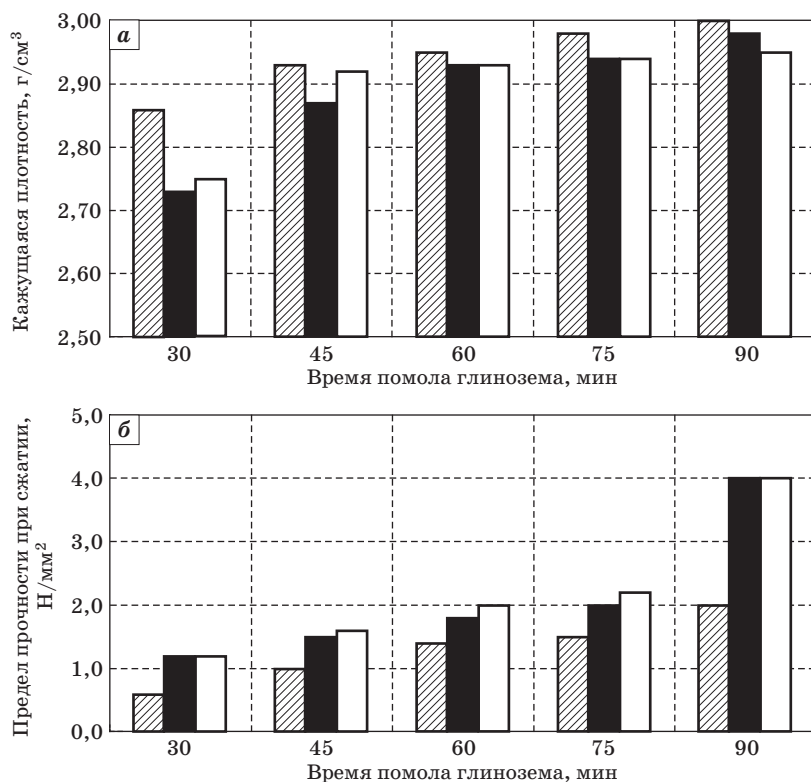


Рис. 2. Кажущаяся плотность (а) и предел прочности при сжатии (б) высушенных муллитокорундовых образцов, где:

▨ — глинозем марки S; ■ — глинозем марки N; □ — глинозем марки NR

Из рис. 2 видно, что значения кажущейся плотности высушенного сырца муллитокорундовых образцов уже при содержании в глиноземах частиц с размером менее 4 мкм в количестве 50—60 % (при времени помола 45 мин) и влажности массы 4,3 % (с глиноземом марки S) и 4,8 % (с глиноземами марок N и NR) являются высокими (2,87—2,90 г/см³) и практически не зависят от дисперсности глиноземов и принятых значений влажности масс. Прочность же высушенных образцов зависит от указанных факторов. Однако, даже при содержании в глиноземах частиц размером ниже 4 мкм в количестве 50—60 % и влажности массы 4,3 % (с глиноземом марки S) и 4,8 % (с глиноземами марок N и NR) прочность высушенных образцов является достаточно высокой (1,0—1,5 Н/мм²). При содержании в глиноземе марки N частиц < 4 мкм ~ 75 % и в глиноземе NR ~ 80 % (время помола 90 мин) прочность образцов существенно увеличивается (до 4,0 Н/мм²), что можно объяснить более высокой дисперсностью глиноземов марки N и NR и, как следствие, более плотной упаковкой частиц в связке образцов по сравнению с образцами с глиноземом марки S (табл. 5, рис. 1).

Результаты исследования свойств муллитокорундовых образцов после обжига при температуре 1580 °C приведены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что, начиная с содержания в глиноземах частиц ниже 4 мкм в количестве 50—60 % и принятой влажности масс 4,3 % (с глиноземом марки S) и 4,8 % (с глиноземами марок N и NR), после обжига при 1580 °C все образцы характеризуются высокими показателями свойств: открытая пористость не превышает 16 %, кажущаяся плотность выше 3 г/см³ и предел прочности при сжатии выше 140 Н/мм² соответственно. При этом значение предела прочности при сжатии как высушенных, так и обожженных образцов в значительной степени зависит от дисперсности использованных глиноземов и принятых значений влажности масс, а на значения открытой пористости и кажущейся плотности данные факторы влияния практически не оказывают. В то же время обожженные образцы, изготовленные с глиноземом марки S, при содержании в нем частиц ниже 4 мкм 50—60 % и влажности масс 4,3—4,5 % имеют более высокое значение предела прочности при сжатии по сравнению с образцами, изготовленными с глиноземами марок N и NR.

Результаты петрографических исследований структуры муллитокорундовых образцов после обжига при температуре 1580 °C приведены на рис. 4, из которого видно, что все образцы

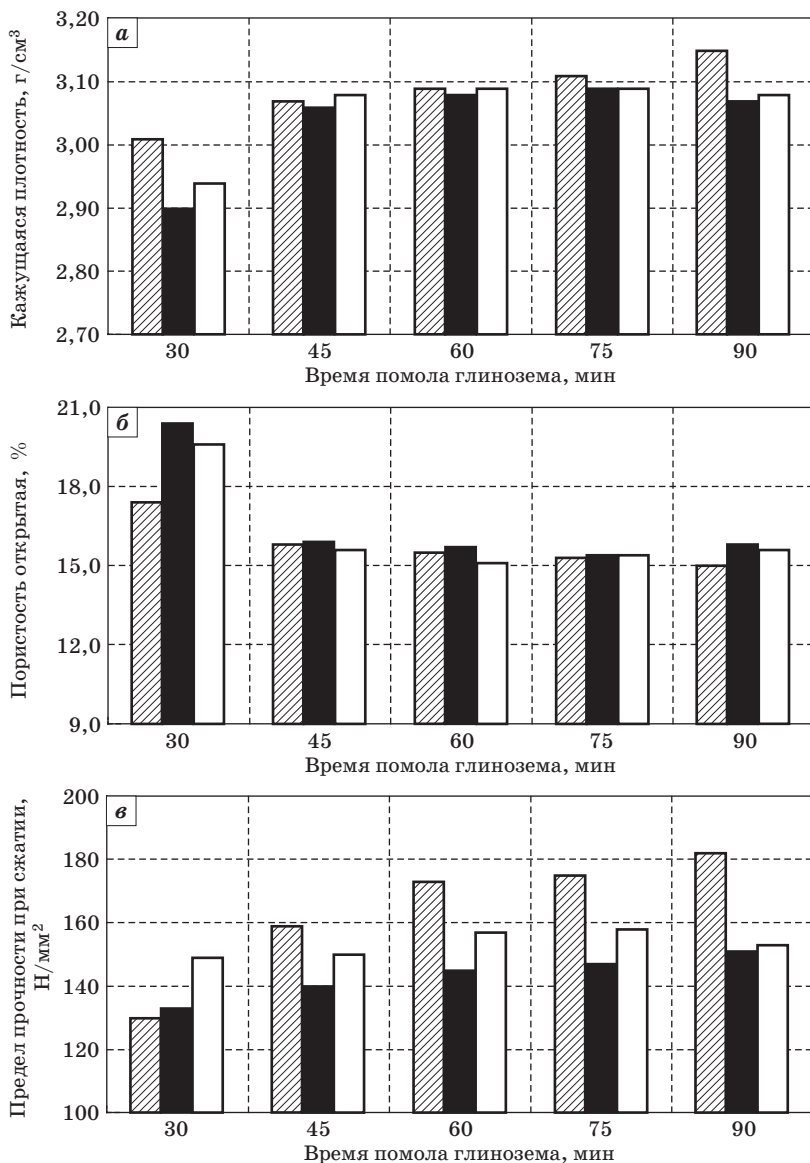
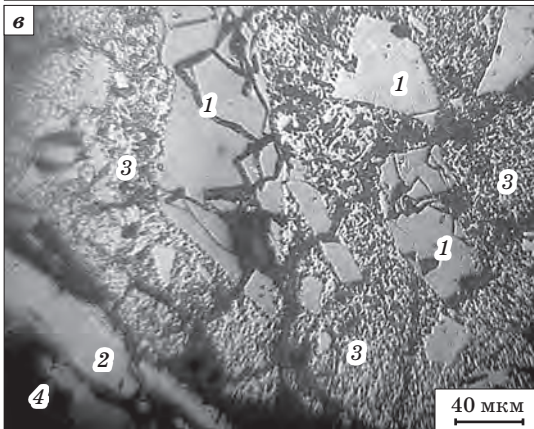
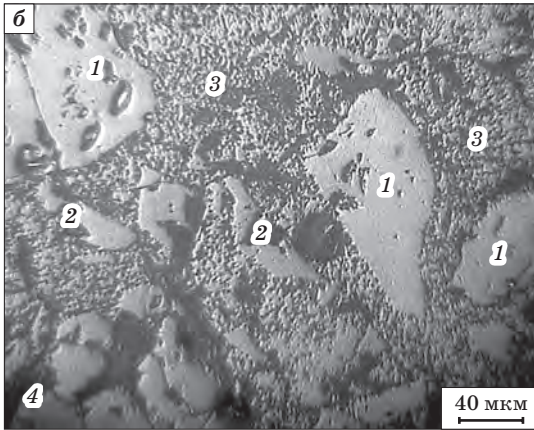
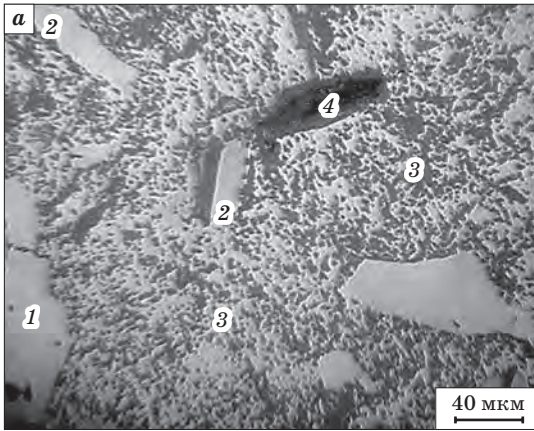


Рис. 3. Кажущаяся плотность (а), открытая пористость (б) и предел прочности при сжатии (в) муллитокорундовых образцов после обжига при температуре 1580 °С, где:

▨ — глинозем марки S; ■ — глинозем марки N; □ — глинозем марки NR



(с глиноземами марок S, N или NR) имеют подобную структуру, брекчиевидного типа в сочетании с микрокристаллической, состоящей из зерен наполнителя и спеченной связующей массы. Зерна наполнителя имеют угловато-осколочную неправильную форму размером до 3 мм и представлены плавленными корундом и муллитом. Связующая масса представляет собой сросток мелких неориентированных удлиненно-призматических спеченных зерен корунда, образовавшихся в результате спекания частиц глинозема при обжиге образцов. В структуре муллитокорундовых

Рис. 4. Структура вибролитых муллитокорундовых образцов, обожженных при температуре 1580 °С, содержащих глиноземы марок S (а), N (б) и NR (в) после помола в течение 90 мин, где:

- 1 — зерно корунда;
- 2 — зерно муллита;
- 3 — связка; 4 — пора

образцов наблюдается наличие пор неправильной формы, зачастую приближающихся к изометричным, как круглых изолированных, так и удлиненных, сообщающихся между собой. Структура образцов неравномерноспеченная, пористо-трещиноватая: образцы с глиноземом марки S более плотно спечены, а образцы с глиноземом марок N и NR — более пористые, причем наличие пор в основном наблюдается на контакте зерен плавленых корунда либо муллита и тонкодисперсной связки. Это, вероятно, связано с более интенсивным спеканием, сопровождающимся большей усадкой связующей массы в образцах с глиноземом марок N и NR за счет присутствия в данных глиноземах мелких частиц размером менее 2 мкм, как было отмечено ранее (рис. 1), что обуславливает сокращение контакта зерен наполнителя и связки, а следовательно, и более низкое значение предела прочности при сжатии после обжига при 1580 °С данных образцов по сравнению с образцами с глиноземом марки S.

Таким образом, в результате проведенных исследований зависимости свойств муллитокорундовой зернистой массы и образцов из нее от вида глинозема α -формы показана возможность использования глиноземов марок N и NR наряду с глиноземом марки S в технологии муллитокорундовых огнеупоров, в том числе и высокоогнеупорных муллитокорундовых тиглей. Установлено, что после обжига при 1580 °С образцы характеризуются высокими показателями свойств, соответствующими требованиям ТУ У 23.2-00190503-428:2017 для изделий марки МКТ.

Заключение

Изучена кинетика изменения дисперсности глиноземов (марок S, N и NR) при их помоле. Установлено, что необходимая дисперсность глиноземов (содержание частиц < 10 мкм — не менее 90 %, частиц < 4 мкм — не менее 50 %) достигается практически за одинаковое время помола, причем для глиноземов марок N и NR имеется возможность даже некоторого уменьшения времени их измельчения.

Свойства вибролитых муллитокорундовых образцов, обожженных при температуре 1580 °С, содержащих глиноземы марок S, N и NR, характеризуются высоким уровнем значений кажущейся плотности (выше 3 г/см³), открытой пористости (ниже 16 %) и предела прочности при сжатии (выше 140 Н/мм²), что обеспечивает возможность использования исследованных глиноземов α -формы марок N и NR наряду с глиноземом

α -формы марки S в технологии вибролитых муллитокорундовых огнеупоров, в том числе и высокоогнеупорных муллитокорундовых тиглей.

Библиографический список

1. Примаченко В. В. Исследования по разработке новой технологии производства крупногабаритных изделий методом вибролитья из зернистых масс. *Повышение качества и стойкости огнеупоров в тепловых агрегатах и снижение их расхода в народном хозяйстве* : Всесоюзная науч.-техн. конф. : тез. докл. М. : Черметинформация, 1977. С. 36—37.

2. Исследования по изготовлению крупногабаритных алюмосиликатных огнеупоров способом вибролитья / В. В. Примаченко и др. *Тематич. отрасл. сб. «Производство специальных огнеупоров»*. М. : Металлургия, 1978. № 6. С. 58—62.

3. Исследование муллитокорундовых стаканов после службы при плавке в вакууме сплавов на никелевой основе / В. В. Примаченко и др. *Огнеупоры*. 1980. № 6. С. 18—19.

4. Примаченко В. В., Колесников Л. М., Устиченко В. А. Новые эффективные футеровки индукционных тигельных печей для плавки специальных сталей и сплавов. *Тематич. отрасл. сб. Украинского гос. науч.-исследоват. ин-та огнеупоров*. Харьков, 1993. С. 123—129.

5. Примаченко В. В., Устиченко В. А., Коровянская А. А. О технологии изготовления муллитокорундовых тиглей. *Огнеупоры*. 1990. № 3. С. 24—29.

6. Примаченко В. В. Физико-химические основы и новая технология производства крупногабаритных огнеупоров — вибролитье : дис. ... доктора техн. наук : 05.17.11 / Украинский научно-исследовательский институт огнеупоров. Харьков, 1995. 419 с.

7. Primachenko V., Ustichenko V., Chaplianko S. Corundum based crucibles for induction melting of heatresistant alloys. *Stahl und Eisen*. Düsseldorf : Verlag Stahleisen GmbH., 2006. P. 52—54.

8. Вибролитые тигли различного состава для индукционной плавки жаропрочных сплавов / В. В. Примаченко и др. *Литье и металлургия*. Спецвыпуск. Минск : Беларуский национальный технический университет, 2012. 3(67). С. 169—171.

9. Примаченко В. В. *Вибролитье огнеупоров* : избранные научные труды в 2 томах. Харьков : Точка, 2020. Т. II. 510 с.

10. Зависимость свойств вибролитой муллитокорундовой массы и образцов из нее от вида и количества активного глинозема / В. В. Примаченко и др. *Зб. наук. пр. ПАТ «УКРНДІВОГНТРИВІВ ІМЕНІ А. С. БЕРЕЖНОГО»*. Харьков : ПАТ «УКРНДІ ВОГНТРИВІВ ІМЕНІ А. С. БЕРЕЖНОГО», 2016. № 116. С. 11—18.

References (transliterated):

1. Primachenko V. V. Issledovaniya po razrabotke novoy tehnologii proizvodstva krupnogabaritnykh izdeliy metodom vibrolitya iz zernistykh mass [The research on the development of a new technology manufacture of large-sized products by vibrocast method from grainy masses]. *Povyishenie kachestva i stoykosti ogneuporov v teplovykh agregatah i snizhenie ih rashoda v narodnom hozyaystve. Tezisy dokladov Vsesoyuznoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Improving the quality and resistance of refractories in thermal units and reducing their consumption in the national economy. Abstracts of the All-Union Sci.-Techn. Conf.]. Moscow, Chermetinformatiya Publ. [Chermetinformatiya], 1977, pp. 36—37 (in Russian).

2. Primachenko V. V., Pitak N. V., Kolesnikov L. M., Zadorozhnaya T. A. Issledovaniya po izgotovleniyu krupnogabaritnykh al'yumosilikatnykh oneuporov sposobom vibrolitya [The research on the manufacture of large-sized aluminosilicate by vibrocast method] *Tematich. otrasl. sb. "Proizvodstvo spetsialnykh ogneuporov"* [Thematic. Indust. Coll. "Production of special refractories"]. Moscow, Metallurgiya Publ. [Metallurgy], 1978, no. 6, pp. 58—62 (in Russian).

3. Primachenko V. V., Ustichenko V. V., Zhukova Z. D., Gladkov V. A., Lapin A. M., Kasatkin Yu. T. Issledovanie mullitokorundovykh stakanov posle sluzhby pri plavke v vakuume splavov na nikel'evoy osnove [The research of mullitecorundum crucible after exploitation in vacuum melting of nickelbased alloys] *Ogneupory* [Refractories]. 1980, no. 6, pp. 18—19 (in Russian).

4. Primachenko V. V., Kolesnikov L. M., Ustichenko V. V. Novyye effektivnyye futerovki induktsionnykh tigelnykh pechey dlya plavki spetsialnykh staley i splavov [New efficient linings for induction crucible furnaces for melting special steels and alloys] *Temach. otrasl. sb. Ukrainskogo gos. nauchno-issledovat. in-ta ogneuporov* [Thematic. Indust. Coll. Ukrainian state Research Institute of Refractories]. Kharkiv, 1993, pp. 123—129 (in Russian).

5. Primachenko V. V., Ustichenko V. V., Korovyanskaya A.A. O tehnologii izgotovleniya mullitokorundovykh tigley [About the technology of manufacturing mullitecorundum crucibles] *Ogneupory* [Refractories]. Moscow, 1990, no. 3, pp. 24—29 (in Russian).

6. Primachenko V. V. *Fiziko-himicheskie osnovy i novaya tehnologiya proizvodstva krupnogabaritnykh ogneuporov — vibrolite : dis. ... d-ra tekhn. nauk 05.17.11* [Physicochemical fundamentals and new technology for the production of large-sized refractories — vibrocasting. Dr. eng. sci. diss.] Ukrainian Research Institute of Refractories. Kharkov, 1995. 419 p. (in Russian).

7. Primachenko V., Ustichenko V., Chaplianko S. Corundum based crucibles for induction melting of heatresistant alloys. *Stall und Eisen*. Düsseldorf, Verlag Stahleisen GmbH., 2006, pp. 52—54 (in English).

8. Primachenko V. V., Martynenko V. V., Shulik I. G., Chaplianko S. V. Grytsyuk L. V., Tkachenko L. P. Vibrolitye tigly razlichnogo sostava dlya induktsionnoy plavki zharoprochnykh splavov [The crucibles from different compositions by vibrocasting for induction melting of heat-resistant alloys] *Lite i metallurgiya. Spetsvyipusk* [Casting and metallurgy. Special issue]. Minsk, Belaruckiy natsional'nyy tekhnicheskiiy universitet Publ. [Belarusian National Technical University], 2012, no. 3(67), pp. 169—171 (in Russian).

9. Primachenko V. V. *Vibrolite ogneuporov: izbrannyye nauchnyie trudyi v 2 tomah* [Vibrocasting of refractories. Selected scientific works in 2 volumes]. Kharkov, Tochka Publ, 2020, V. II, 419 p. (in Russian).

10. Primachenko V. V. Zavisimost svoystv vibrolity mullitokorundovoy massy i obraztsov iz nee ot vida i kolichestva aktivnogo glinozema [Dependence of the properties of vibrocast mullitecorundum mass and samples from it on the type and amount of active alumina]. *Zb. nauk. pr. PAT "UKRNDI VOGNETRYVIV IM. A. S. BEREZHNOGO"* [Coll. Sci. Proc. of PJSC "THE URIR NAMED AFTER A. S. BEREZHNOY"]. Kharkov, PAT "UKRNDI VOGNETRYVIV IM. A. S. BEREZHNOGO" Publ., 2016, no. 116, pp. 11—18 (in Russian).

*Рецензенты: д-р техн. наук Корогодская А. Н.,
канд. техн. наук Савина Л. К.*