

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОКОРУНДОВЫХ ПЛАСТИН, ЗАКРИСТАЛЛИЗОВАННЫХ В ВАЛКАХ-КРИСТАЛЛИЗАТОРАХ

В.Е. Гладков¹, В.М. Березин², Г.М. Купершляк-Юзефович³

Представлены результаты исследования статических характеристик физико-механических свойств, полученных из диаграмм $\sigma = \phi(\epsilon)$ при испытании пластин белого (≈ 98 мас.% α - Al_2O_3) и циркониевого (75 мас.% Al_2O_3 – 25 мас.% ZrO_2) электрокорунда, закристаллизованных в валках-кристаллизаторах. Проведено обсуждение по влиянию пористости, химического и фазового состава ZrO_2 на физико-механические свойства материала пластин и шлифовального зерна, получаемого при их дроблении.

Ключевые слова: электрокорунд, валки-кристаллизаторы, абразивные материалы, силовое обдирочное шлифование, тензометрия, диаграмма σ - ϵ , показатели механических свойств.

Введение

Основным материалом при получении шлифовального зерна для абразивных кругов силового обдирочного шлифования является цирконисвый электрокорунд – сплавы Al_2O_3 с 10–40 мас.% ZrO_2 . Процесс силового обдирочного шлифования характеризуется высокими скоростями резания 60–80 м/с, большими усилиями прижатия абразивного круга к обрабатываемой поверхности 5–10 кН, что обеспечивает съём металла до 250 кг/ч при зачистке стальных слитков и до 400 кг/ч – чугуновых. Температура в зоне резания достигает температуры обрабатываемого материала. Отношение массы снятого металла m_{mc} к массе израсходованного рабочего слоя абразивного круга m_k при силовом шлифовании $m_{mc}/m_k \geq 60$.

Отходы шлифования (рис. 1, а) при использовании кругов с зерном нормального электрокорунда представляют собой металлическую пыль, загрязненную материалом от абразивного круга, практически не пригодную для переплава и, как правило, идущую в отвал, что приводит к значительной потере дорогостоящих легирующих металлов (Ni, Co, W, Mo и др.) при обработке высоколегированных сталей. Отходы шлифования при обработке кругами на базе зерна из циркониевого электрокорунда (рис. 1, б) позволяют их использовать в качестве вторичного сырья.

Исходя из условий работы в качестве требования, предъявляемого к физико-механическим свойствам абразивного зерна для силового шлифования, можно отметить следующее. При работе абразивное зерно испытывает в основном два вида нагружения. Первое – радиальные силы инерции, вызывающие нормальные напряжения растяжения, допустимый предел которых ограничен пределом прочности на растяжение композиционного материала из зерна и связки. Второй вид нагружения – связан непосредственно с процессом шлифования, при котором зерно, расположенное на рабочей поверхности круга, можно рассматривать как резец, производящий стружку (рис. 1, б), за-

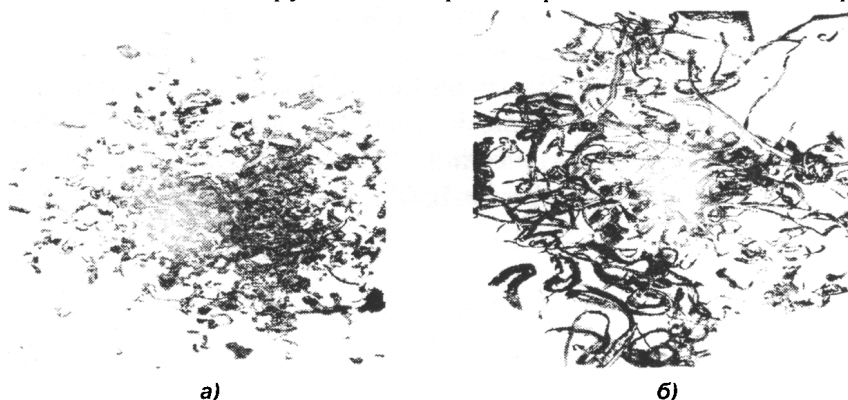


Рис. 1. Отходы шлифования при абразивной обработке слитков из стали 12Х18Н10Т шлифовальными кругами, изготовленными на базе абразивного зерна из нормального (а) и циркониевого электрокорунда (б)

¹ Гладков Владимир Евгеньевич – кандидат химических наук, доцент, кафедра технологии приборостроения, Южно-Уральский государственный университет.

² Березин Владимир Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор, кафедра технологии приборостроения, Южно-Уральский государственный университет.

E-mail: bvm@susu.ac.ru

³ Купершляк-Юзефович Георгий Марьянович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, кафедра сопротивления материалов, Южно-Уральский государственный университет.

крепленный консольно в связке и работающий в условиях совместного действия изгибающих и сжимающих сил. С учетом того, что у твердых материалов прочность на сжатие значительно выше, чем на растяжение и изгиб, то существенный интерес при аттестации материала по его физико-механическим свойствам представляет определение прочности на изгиб и растяжение.

В ряде работ отмечено [1–3], что технологические показатели (разрушаемость абразивного зерна по ГОСТ 28924-91 и суммарный выход крупных номеров после дробления), характеризующие прочность пластин закристаллизованных в валках-кристаллизаторах, зависят от фазового состава ZrO_2 .

Задача настоящей работы – разработка методики и определение физико-механических свойств электрокорундовых материалов, закристаллизованных в валках-кристаллизаторах в виде пластин в зависимости от их химического состава, фазового состава ZrO_2 в объеме эвтектики и состояния макро и микроструктуры.

Аттестация образцов и методика исследований

Объектом исследования были пластины белого (≈ 99 мас.% $\alpha-Al_2O_3$) и сплава (75 мас.% Al_2O_3 – 25 мас.% ZrO_2) циркониевого электрокорунда закристаллизованные в валках-кристаллизаторах. Состав шихты: технический глинозем ($\gamma-Al_2O_3$) и технический диоксид циркония. Степень превращения ($\beta-ZrO_2 \rightarrow \alpha-ZrO_2$) изменяли добавками порошка металлического алюминия в расплав при его сливе на валки-кристаллизаторы [1–4]. Фазовый анализ полученных материалов проводили на установке ДРОН-2.

Физико-механические свойства пластин определяли по методике испытаний хрупких материалов при консольном изгибе. Геометрическая форма образца для статических испытаний на изгиб представлена на (рис. 2, а). Зону (ширину образца $b(x)$), в которой происходило разрушение, делали меньше, чем у соответствующей балки равного сопротивления изгибу, контур которой показан штриховой линией (рис. 2, а). Фактическая длина пластинки $L_n \geq 2C$. Длину образца L получали путем соответствующего удлинителя, с которым пластинку соединяли через резиновые прокладки. Относительные напряжения в рабочей части образца σ/σ_1 (при $\sigma_1 = \sigma(x/L = 1)$) с размерами ($b_{min}(x) = 14$, $L = 150$, $C = 40$) мм показаны на (рис. 2, б). Данный тип образцов применяли при испытаниях электрокорундовых пластин толщиной $h = 1,5–4,5$ мм. Поверхность разрушения образцов была локализована в пределах зоны ($0,87 \leq x/L \leq 0,9$, рис. 2, а, б). Изменения напряжений в этой зоне составляло не более 2 %.

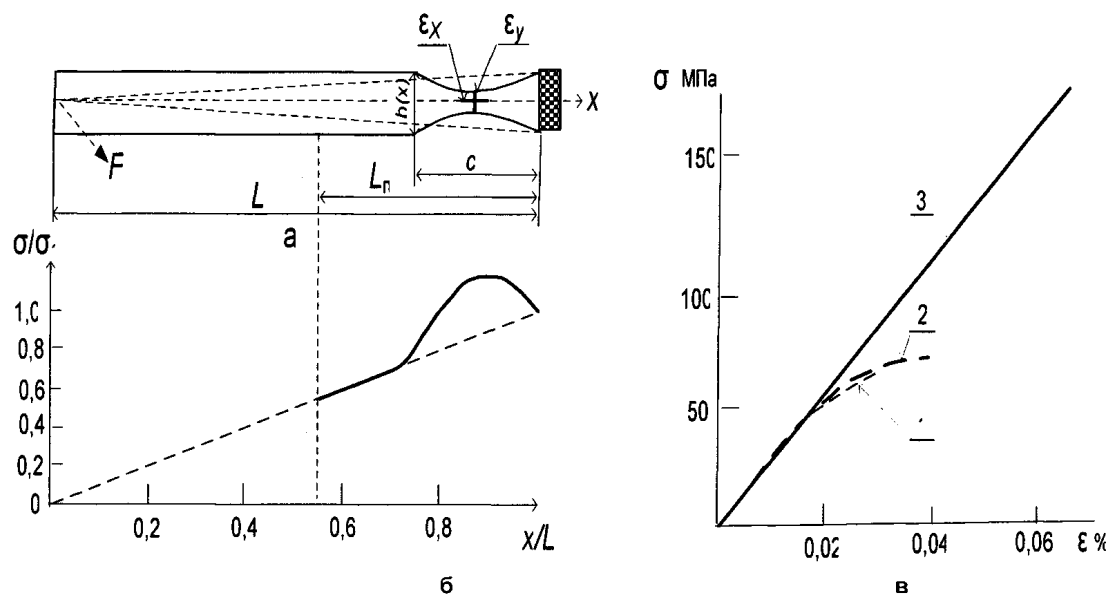


Рис. 2. Геометрическая форма образца для статических испытаний при консольном изгибе (а). Распределение относительных напряжений σ в рабочей части образца (б). Типичный вид диаграмм «напряжение–относительная деформация» при консольном изгибе (в) для образцов: 1, 2 – белого и 3 – циркониевого электрокорундов

Консоль нагружали путем наполнения водой емкости, подвешенной к тензодинамометру (для измерения силы F) в точке $x = 0$ (рис. 2, а). Такая система обеспечивала медленное, «статическое» нагружение с постоянной скоростью. Напряжения разрушения определяли из равенства

$$\sigma_p = 6Fx/b_p h_p^2 \quad (1)$$

где h_p – толщина и b_p – ширина образца в разрушенном сечении.

Для определения зависимости напряжение – деформация в контрольной точке (рис. 2, а) наклеивали тензорезистор ε с активной длиной (базой) 2 мм. Показания тензодинамометра и тензорезистора записывали двухкоординатным потенциометром для регистрации зависимости ($\varepsilon_i - \varepsilon_j$). Полученные при испытании пластин типичные зависимости $\sigma = \varphi(\varepsilon)$ представлены на (рис. 3, в).

Механические показатели электрокорундовых пластин, закристаллизованных в валках-кристаллизаторах

Материал	№ образцов	Размер образцов, мм		Механические показатели, МПа			Коэффициенты	
		h_p	b_p	σ_p	σ_{min}	$E \times 10^5$	μ	σ_p / σ_{max}
Пластина 1, белый электрокорунд	11	4,1	14,7	55	36	2,17	0,23	0,79
	5	4,3	14,1	56	40	2,54	0,21	0,8
	8	5,2	15,0	57	42	2,52	0,21	0,81
	6	4,7	13,5	60	43	2,64	0,18	0,86
	12	3,8	15,7	64	42	2,46	0,22	0,91
	4	4,0	14,1	65	46	2,74	0,22	0,93
	7	4,2	13,6	66	38	2,50	0,23	0,94
	2	3,4	14,2	70	48	2,70	0,21	1,0
	Среднее	–	–	62	42	2,53	0,21	–
Пластина 3, 10 мас. % β -ZrO ₂	4	3,1	15,1	106	–	2,51	0,25	0,82
	3	2,6	15,4	123	–	2,78	0,26	0,95
	5	3,6	14,8	129	–	2,72	0,26	1,0
	Среднее	–	–	119	–	2,67	0,26	–
Пластина 4, 20 мас. % β -ZrO ₂	4,а	1,7	14,4	152	–	2,64	0,26	0,79
	1	1,6	15,0	156	–	2,42	0,25	0,81
	4	1,8	14,0	160	–	2,45	–	0,83
	3*	1,9	17,0	169	–	2,52	–	0,88
	5,а	1,9	15,6	183	–	2,64	0,25	0,95
	2	2,0	14,0	186	–	2,55	0,26	0,96
	5	1,8	14,8	193	–	2,52	0,25	1,0
	Среднее	–	–	171	–	2,53	0,25	–

Механические характеристики, определенные по этим зависимостям для пластин (1, 3, 4) с фиксированным химическим и фазовым составом ZrO₂, представлены в таблице. Для образцов такого же химического состава, но изготовленных из других пластин с различной толщиной и фазовым составом, определяли только напряжение разрушения σ_p в зависимости от содержания β -ZrO₂ в их составе (рис. 3).

Обсуждение результатов

Механические характеристики ($\sigma = \varphi(\varepsilon)$, см. рис. 2, таблицу) позволяют отметить следующее. Вне зависимости от химического и фазового состава все анализируемые электрокорундовые материалы имеют сопоставимые средние значения модуля упругости и коэффициента Пуассона.

Зависимости $\sigma = \varphi(\varepsilon)$ для образцов белого электрокорунда перед разрушением характеризуются наличием нелинейного участка деформирования (рис. 2, в), подобного участку упрочнения пластичных материалов. Физико-химическая природа такой зависимости неоднозначна и может быть связана с состоянием структуры границ между кристаллами корунда (α -Al₂O₃) и природой межкристаллитной фазы. При замене межкристаллитной фазы в белом электрокорунде на эвтектику (Al₂O₃-ZrO₂) секущий модуль упругости увеличивается, а среднее значение напряжения разрушения σ_p возрастает с увеличением содержания β -ZrO₂ в ее составе (см. таблицу и рис. 3).

Разрушение всех образцов происходило хрупко. При этом широкий диапазон значений напряжений разрушения (σ_p в таблице) образцов из различных пластин с фиксированным фазовым составом связан не со свойствами материала, а с состоянием макроструктуры пластин в разрушенном сечении. Локальные раковины, пористость и другие макроскопические дефекты струк-

туры [2, 4], особенно вблизи поверхности, существенно уменьшают момент сопротивления сечения. Поэтому напряжения разрушения с учетом данного фактора должны определяться из равенства

$$\sigma_p = \sigma_n \left[1 - (12/bh^3) \sum y^2 S_i \right], \quad (2)$$

где S_i – площадь дефекта, $0 \leq y \leq h/2$ – расстояние от нейтральной оси до центра тяжести площади дефекта.

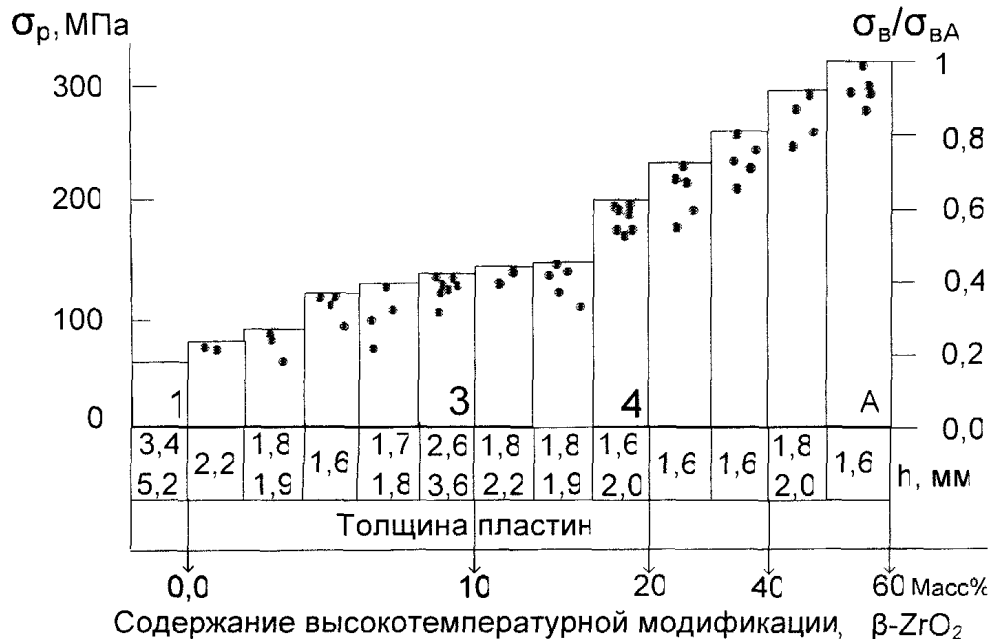


Рис. 3. Зависимость напряжения разрушения электрокорундовых пластин различной толщины с фиксированным фазовым составом $\beta\text{-ZrO}_2$. Пластина 1 – белый электрокорунд (а)

В связи с этим за прочность материала σ_n , с фиксированным химическим и фазовым составом, можно принять максимальные значения напряжений разрушения в серии испытания образцов ($\sigma_n = \sigma_{p \max}$, см. таблицу, рис. 3), вырезанных из одной пластины. В этом случае величину $(1 - \sigma_p/\sigma_n)$ можно рассматривать как параметр, характеризующий дефектность материала в области сечения поверхностью разрушения. Влияние содержания ($\beta\text{-ZrO}_2$) в составе эвтектики на относительную прочность материала можно оценить по величине соотношения $\sigma_n/\sigma_{нА}$ (рис. 3); где $\sigma_n = \sigma_{p \max}$ для пластин с фиксированным фазовым составом, а $\sigma_{нА} = \sigma_{p \max}$ для пластины, обозначенной буквой А (рис. 3), с максимальным содержанием 60 мас. % $\beta\text{-ZrO}_2$.

Влияние степени развития полиморфного превращения $\beta\text{-ZrO}_2 \rightarrow \alpha\text{-ZrO}_2$ в составе эвтектики циркониевого электрокорунда, проходящего (при охлаждении после кристаллизации слитка) с увеличением объема (на $\leq 7\%$), существенно сказывается на технологических показателях, характеризующих разрушение материала в процессах его переработки на шлифовальное зерно. В работе [1] пластины циркониевого электрокорунда, закристаллизованные в валках-кристаллизаторах, с различным содержанием тетрагональной модификации ($\beta\text{-ZrO}_2$) подвергали измельчению и последующему рассеву для определения суммарного выхода фракций (2000, 1600, 1250) мкм. При содержании $\beta\text{-ZrO}_2 \leq 20$ мас. % после измельчения суммарное содержание фракции 1000–2000 мкм составляло 33–38 мас. %. С увеличением содержания $\beta\text{-ZrO}_2 \geq 20$ –50 мас. % суммарное содержание фракции 1000–2000 мкм возрастало до 46–60 мас. %. При этом показатель разрушаемости (технологическая проба по ГОСТ 28924-91) уменьшался с $\approx 21\%$ при 10 мас. % $\beta\text{-ZrO}_2$ до $\approx 11\%$ при 30 мас. % $\beta\text{-ZrO}_2$. Дальнейшее увеличение $\beta\text{-ZrO}_2$ до ≤ 70 мас. % не влияло на показатель разрушаемости.

Таким образом, установленная зависимость прочности на изгиб (см. таблицу, рис. 3) от содержания $\beta\text{-ZrO}_2$ хорошо коррелирует с технологическими показателями: суммарным выходом крупных номеров шлифовального зерна и его разрушаемостью в зависимости от содержания $\beta\text{-ZrO}_2$.

Пластины при их дроблении на шлифовальное зерно в основном разрушаются по дефектным сечениям с минимальной прочностью, а в шлифовальное зерно переходят участки объемов с вы-

сокой прочностью. При этом пористость и её распределение оказывают существенное влияние на получение качественного абразивного зерна. Усадочные и газовые поры, размер которых и расстояние между ними сравнимы с размером зерна 1250–2500 мкм, при дроблении материала выходят на поверхность. Поэтому их присутствие на физико-механических свойствах шлифовального зерна практически не сказывается. С учетом наличия пор размером ≤ 100 мкм прочность на изгиб абразивного зерна, получаемого из пластин с фиксированным химическим и фазовым составом, можно оценить средними напряжениями разрушения $\sigma_{p\ c}$ из диапазона $(0,95...1)\sigma_p/\sigma_{max}$ представленного в таблице и на рис. 3.

Высокотемпературная модификация $\beta\text{-ZrO}_2$ в составе эвтектических колоний метастабильна. В связи с этим установленные показатели механических свойств (таблица и рис. 2) будут характеризовать свойства материала только в том случае, если он не подвергался термической обработке. В [3, 5] показано, что после нагрева до температуры $T \geq 1100$ °С интервал полиморфного превращения $\beta\text{-ZrO}_2 \rightarrow \alpha\text{-ZrO}_2$ зависит от времени выдержки, и существенно ниже температурного интервала пластичности корунда. При этом пластины и абразивное зерно с исходным содержанием $\beta\text{-ZrO}_2 \geq 50$ % при охлаждении самопроизвольно растрескиваются, а показатель разрушаемости возрастает тем больше, чем больше было метастабильной модификации в исходном фазовом составе.

Выводы

Полиморфное превращение $\beta\text{-ZrO}_2 \Rightarrow \alpha\text{-ZrO}_2$ в составе эвтектических колоний сплава 75 мас.% Al_2O_3 – 25 мас. % ZrO_2 проходящее с увеличением объёма на ~ 7 %, существенно сказывается на прочностных свойствах материала. При подавлении превращения в интервале 0–60 % прочность материала на изгиб возрастает от 100 до 300 МПа.

Литература

1. Гладков, В.Е. Влияние различных модификаций ZrO_2 на физико-механические свойства циркониевого электрокорунда / В.Е. Гладков, А.А. Фотиев, А.С. Зубов // Неорганические материалы. – 1985. – Т. 21, № 4. – С. 616–619.
2. Гладков, В.Е. Влияние условий охлаждения расплава на формирование структуры и фазового состава в слитках сплавов $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ / В.Е. Гладков, В.М. Березин, Н.Б. Жеханова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2010. – Вып. 2. – № 9(185). – С. 27–31.
3. Гладков, В.Е. Полиморфное превращение ZrO_2 в сплаве 75 мас.% Al_2O_3 – 25 мас. % ZrO_2 , закристаллизованном в неравновесных условиях / В.Е. Гладков, В.М. Березин, Н.Б. Жеханова // Неорганические материалы. – 2010. – Т. 46, № 7. – С. 838–842.
4. Гладков, В.Е. Условия формирования плотной макроструктуры электрокорундовых пластин в валках-кристаллизаторах / В.Е. Гладков, В.М. Березин, Н.Б. Жеханова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2011. – Вып. 4. – № 10(227). – С. 67–71.
5. Влияние скорости охлаждения эвтектики системы Al_2O_3 – ZrO_2 на стабильность фазовых составляющих / И.Ю. Волкова, С.С. Семенов, А.Е. Кравчик и др. // Неорганические материалы. – 1987. – Т. 23, № 3. – С. 448–451.

Поступила в редакцию 20 декабря 2011 г.

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF ELECTROCORUNDUM PLATES, CRYSTALLIZED IN ROLL-CRYSTALLIZERS

V.E. Gladkov¹, V.M. Berezin², G.M. Kupershlyak-Yuzefovich³

The results of research of static characteristics of physical and mechanical properties obtained from the diagrams $\sigma = \sigma(\epsilon)$ during tests of the crystallized in rolls-crystallizers plates of white (≈ 98 wt.% α -Al₂O₃) and zirconium (75 wt.% Al₂O₃ – 25 wt.% ZrO₂) electrocorundum. A discussion on the influence of porosity, chemical and phase composition of ZrO₂ on physical and mechanical properties of the plates and grinding of grain received during their shattering.

Keywords: electrocorundum, roll-crystallizers, abrasive, heavy rough-grinding, tensometry, σ - ϵ diagram, mechanical properties.

References

1. Gladkov V.E., Fotiev A.A., Zubov A.S. Vliyanie razlichnykh modifikacij ZrO₂ na fiziko-mekhanicheskie svojjstva cirkonievogo ehlektrokورونا (Influence of different modifications of ZrO₂ on the physico-mechanical properties of electrocorundum). *Neorganicheskie materialy*. 1985. Vol. 21, no. 4. pp. 616–619. (in Russ.).
2. Gladkov V.E., Berezin V.M., Zhekhanova N.B. Vliyanie uslovijj okhlazhdenija rasplava na formirovanie struktury i fazovogo sostava v slitkakh splavov Al₂O₃-ZrO₂ (Influence of conditions of melt cooling upon structure formation and phase composition in ingots of Al₂O₃-ZrO₂ alloys). *Vestnik JuUrGU. Serija «Matematika. Mekhanika. Fizika»*. 2010. Issue 2. no. 9(185). pp. 27–31. (in Russ.).
3. Gladkov V.E., Berezin V.M., Zhekhanova N.B. Polimorfnoe prevrashhenie ZrO₂ v splave 75 mas. % Al₂O₃ – 25 mas. % ZrO₂ zakristallizovannom v neravnovesnykh uslovijakh (Polymorphic transformation of ZrO₂ in the alloy is 75 wt. % Al₂O₃ – 25 wt. % ZrO₂ crystallized under nonequilibrium conditions). *Neorganicheskie materialy*. 2010. Vol. 46, no. 7. pp. 838–842. (in Russ.).
4. Gladkov V.E., Berezin V.M., Zhekhanova N.B. Usloviya formirovaniya plotnoj makrostruktury ehlektrokوروناovykh plastin v valkakh kristallizatorakh (Conditions of formation of dense macrostructure of electrocorundum plates in rollers of crystallizers). *Vestnik JuUrGU. Serija «Matematika. Mekhanika. Fizika»*. 2011. Issue 4. no. 10(227). pp. 67–71. (in Russ.).
5. Volkova I.Ju., Semenov S.S., Kravchik A.E. *et al.* Vliyanie skorosti okhlazhdenija ehvtektiki sistemy Al₂O₃-ZrO₂ na stabil'nost' fazovykh sostavljajushhikh (Effect of cooling rate of the eutectic Al₂O₃-ZrO₂ phase on the stability of the components). *Neorganicheskie materialy*. 1987. Vol. 23, no. 3. pp. 448–451. (in Russ.).

¹ Gladkov Vladimir Evgenievich is Cand. Sc. (Chemistry), Associate Professor, Instrument Production Technique department, South Ural State University.

² Berezin Vladimir Mikhailovich is Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Instrument Production Technique department, South Ural State University.

E-mail. bvm@susu.ac.ru

³ Kupershlyak-Yuzefovich George Maryanovich is Cand. Sc. (Engineering), a senior research assistant, Applied Mechanics, Dynamics and Strength of Machines Department, South Ural State University