

Исследование физико-химических процессов формирования композиционных материалов с заданными структурно-фазовыми характеристиками*

Михайлов Г.Г., Морозова А.Г.

Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)
г. Челябинск, Российская Федерация
mikhailivgg@susu.ru, labchim@mail.ru

Бамбуров В.Г.

Институт химии твердого тела
Уральского отделения РАН
г. Екатеринбург, Российская Федерация
bam@ihim.uran.ru

Аннотация. В отечественной практике разработка технологии производства рельсошлифовальных кругов опередила разработку технологии производства циркониевого электрокорунда, отвечающего требованиям бесприжоговой обработки металла. Среди искусственных абразивных материалов ведущее место занимает корунд и сплавы на его основе (циркониевые электрокорунды). В настоящее время отечественные заводы абразивной отрасли выпускают циркониевый электрокорунд доэвтектического состава (около 25% диоксида циркония) для силового обдирочного шлифования, используемого для грубой обработки проката. Циркониевый электрокорунд для окончательной бесприжоговой обработки металла отечественными заводами не выпускается. Отсутствуют технические требования, предъявляемые к такому материалу.

Работа посвящена разработке составов и параметров выплавки опытных образцов для получения в промышленных масштабах циркониевого электрокорунда с заданными управляемыми свойствами. Зерно циркониевого электрокорунда в составе торцешлифовальных кругов, используемых в рельсошлифовальных поездах, обладает специфическими свойствами. Согласно принципам бесприжоговой обработки материала структурное и фазовое состояние шлифовального зерна должно обеспечивать высокую прочность и стойкость при нормальных условиях и вместе с тем иметь склонность к микроскалыванию при термическом воздействии. Создание отечественного электрокорунда для рельсошлифования, не уступающего по свойствам импортным аналогам, является важной государственной задачей.

Ключевые слова: бесприжоговая обработка металла, рельсошлифование, циркониевый электрокорунд, тонкодисперсные эвтектики, взаимно-ориентированный парный рост кристаллов, микроскалывание.

ВВЕДЕНИЕ

Для разработки технологических приемов получения материала необходимо сформулировать технологические требования к электрокорунду. Для этого важно детально понять причины, обеспечивающие эффект бесприжогового шлифования рельсов в режиме самозатачивания инструмента [1]. Интенсивная эксплуатация железнодорожных рельсов в течение длительного времени приводит к их износу [2]. Уже после перевозок 100 млн. тонн груза в по-

верхностном слое рельсов накапливаются дефекты структуры, снижающие срок их службы и безопасность перевозок [3]. Устранение дефектов поверхности рельсов происходит в результате рельсошлифования, которое осуществляется в движении специальными поездами, оснащенными рельсошлифовальными кругами на основе циркониевого электрокорунда.

Среди искусственных абразивных материалов ведущее место занимает корунд (α - Al_2O_3) и твердые растворы на его основе $(Al, Me)_2O_3$, где $Me - Cr^{3+}, Ti^{3+}, V^{3+}$, а также циркониевый электрокорунд – эвтектические и доэвтектические сплавы системы $Al_2O_3 - ZrO_2$, синтезируемые электродуговой плавкой исходных оксидов. Требования к фазовым и структурным характеристикам определены в соответствии со спецификой силового обдирочного шлифования [4-6], когда в зоне контакта развиваются высокие давления и температуры. Абразивный материал для силового шлифования должен характеризоваться высокой динамической прочностью, стойкостью к ударным нагрузкам и знакопеременному термическому воздействию. В настоящее время отечественные заводы абразивной отрасли выпускают циркониевый электрокорунд доэвтектического состава (около 25% диоксида циркония) для силового обдирочного шлифования, удовлетворяя потребности производства абразивного инструмента для первичной обработки металла.

В свою очередь, бесприжоговая обработка металла предъявляет другие требования к материалу абразивных кругов, заключающиеся в сочетании высокой механической прочности со способностью к микроскалыванию тонких слоев, что обеспечивает возможность самозатачивания и отвод тепла из контактной зоны металла и абразивного инструмента. Российские заводы такой материал не выпускают. Данный факт обуславливает необходимость разработки технологии синтеза шлифовального материала специализированного назначения.

Диаграмма состояния системы $Al_2O_3 - ZrO_2$ характеризуется наличием эвтектики в области 40% диоксида циркония с температурой плавления $1710 \pm 10^\circ C$ [5]. Оптимальные физико-механические свойства обеспечивают

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (№5.5523.2017/8.9), а также правительства Российской Федерации (постановление №211 от 16.03.2013 г.), соглашение №02.А03.21.0011. Статья публикуется по рекомендации программного комитета Международной научно-практической конференции "Материаловедение и металлургические технологии" (RusMetalCon-2018), <https://rusmetalcon.susu.ru>

эвтектические (и псевдоэвтектические сплавы) с необходимой прочностью и твердостью [7-9]. Микроструктура закристаллизованной эвтектики представляет собой набор плохо сформированных образований продуктов кристаллизации в соответствии с фазовой диаграммой: корунда и диоксида циркония, как правило, моноклинной модификации. В системе $Al_2O_3-ZrO_2$ традиционные способы получения эвтектических мелкодисперсных сплавов, связанные с подготовкой расплава, его оптимальной степенью переохлаждения, скоростью кристаллизации являются необходимыми, но недостаточными. Данное утверждение связано со следующим:

- ZrO_2 в составе сплавов претерпевает мартенситное бездиффузионное сдвиговое превращение $ZrO_2_{тетр} \leftrightarrow ZrO_2_{мон}$ для стехиометрического состава этого компонента абразива с большим (~7%) объемным эффектом при температурах ниже пластичности $\alpha-Al_2O_3$ (либо в области органической пластичности 750-1000°C), которое не удастся подавить закалкой [10, 11].

- различия в структурных характеристиках ZrO_2 и $\alpha-Al_2O_3$ исключают химически активированный парный рост кристаллов в эвтектике, что затрудняет получение мелкодисперсных эвтектических кристаллов с направленной кристаллизацией эвтектических колоний;

- присутствие частично восстановленных примесных фаз (оксикарбидов, оксинитридов, низших оксидов циркония и алюминия) сказывается на свойствах материала.

Существующие в настоящее время классификации эвтектических структур основаны, в основном, на зависимости морфологических и размерных особенностей совместно кристаллизующихся фаз от условий охлаждения расплава во время его кристаллизации [12]. Установлено [13, 14], что получение тонкодисперсных эвтектик (мелкозернистых фазовых смесей) возможно при скорости охлаждения $\sim 10^6$ °C и выше. Возможности регулирования кристаллохимических свойств кристаллизующихся фаз для обеспечения сопряженного роста эвтектических кристаллов в системе $\alpha-Al_2O_3 - ZrO_2$ изучено недостаточно [15]. Отсутствуют сведения о подготовке сырьевых материалов для получения расплава заданной химической предыстории и продукта кристаллизации с заданной микроструктурой и свойствами.

Согласно требованиям бесприжоговой обработки металла [16], эвтектические кристаллы должны обладать способностью к ориентированному микроскальванию (ограниченному объемом 1-3 мкм) с формированием псевдодубчатого характера излома. Такой способностью обладают мелкодисперсные эвтектики с направленной сопряженной кристаллизацией фазовых составляющих.

Соотношение фаз полупрозрачного оксида алюминия и диоксида циркония всегда приближено к эвтектическому составу в системе $Al_2O_3-ZrO_2$ (40 мас. % ZrO_2). Обычно в районе эвтектики наблюдаются флуктуации в фазовом составе, проявляющиеся в присутствии в различных частях образца первичных кристаллов каждой из эвтектических фаз [17]. В исследуемых образцах электрокорунда первичные кристаллы идентифицированы по фазовой принадлежности как кристаллы $\alpha-Al_2O_3$. Данные микроструктурного и рентгенофазового анализа полностью согласуются и свидетельствуют о содержании в электрокорунде диоксида циркония в количестве 35-40 мас. % [18].

Известно [8], что получение тонкодисперсных эвтектик (мелкодисперсных направленно-кристаллизованных фазовых смесей) возможно при скорости охлаждения 10^3 °C и выше. Такие кинетические условия являются труднодостижимыми. Получение эвтектических смесей заданной дисперсности и морфологии фазовых составляющих возможно в результате химически активированного сопряженного парного роста кристаллов в эвтектике.

Целью данной работы является разработка составов и параметров выплавки опытных образцов для получения циркониевого электрокорунда с заданными управляемыми свойствами.

Объекты и методы исследований

Выплавка опытных образцов осуществлялась в вакуумной печи ТВЧ в графитовых тиглях. Момент расплавления шихты определяли визуально, температуру расплава контролировали термоанализатором с точностью ± 25 °C. Параметры плавки задавались и контролировались путем регулирования токовой нагрузки. Кристаллизация расплава происходила после резкого снятия нагрузки в результате спонтанного охлаждения (~800°/мин). Выплавленные образцы подвергали рентгенофазовому и термогравиметрическому исследованиям. Анализ микроструктуры проводили в аншлифах под микроскопом отраженного света.

Рентгенофазовый анализ применялся для определения фазового состава образцов, идентификации фаз, определения кристаллохимических параметров элементарной ячейки. Порошкообразные пробы изучались при комнатных условиях на дифрактометре «ДРОН-6» в кобальтовом фильтрованном излучении (Co K α - излучение, Fe - фильтр) [19].

Термогравиметрический анализ проводился на дериватографе Q-1100. Масса навески составляла 0,5 г., тигель платиновый, скорость нагрева 10 К/мин. Фиксировались дифференциально-температурная, дифференциально-термическая, дифференциально-весовая кривые. Все расчеты выполнены с помощью комплекса компьютерных программ "Thermogram Analyser".

Микроструктурный (МСА) анализ применялся для идентификации фаз, определения фазового состава образцов, определения последовательности кристаллизации фаз, установления границ твердых растворов, размера зёрен первичных и эвтектических кристаллов, установления макродефектов, для измерения микротвердости фаз в гомогенных и многофазных образцах и построения зависимостей "состав – микротвердость". Исследования проведены на полированных и протравленных шлифах на микроскопе МЕТАМ РВ-22, на микроскопе NU-2 в иммерсионных препаратах, микротвердомере ПМТ-3М, по стандартным методикам [20].

Постановка задачи

Целью данной работы является разработка составов и параметров выплавки опытных образцов для получения циркониевого электрокорунда с заданными управляемыми свойствами.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе выполнения работы рассмотрены:

- влияние особенностей синтеза (температура, выдержка расплава, степень его перегрева и скорость охлаждения);
- способ направленного регулирования полиморфного превращения диоксида циркония с получением до 90% $ZrO_{2\text{тетр}}$ в продуктах кристаллизации;
- кристаллохимическое активирование взаимно ориентированного парного роста кристаллов в эвтектике до размеров 1-3 мкм;
- регулирование степени восстановления (дефектности) расплава;
- разработаны технологические приемы подготовки сырьевых материалов.

Регулированием токовой нагрузки ТВЧ при 1700-1900 °С на образцах базового состава ($ZrO_2:Al_2O_3=40:60$ вес.%) в атмосфере аргона удалось добиться однородности расплава и проконтролировать размеры кристаллов в эвтектике. Однако тип эвтектики и фазовые соотношения тетрагональной и моноклинной модификации диоксида циркония не обеспечивают заданные параметры (рис. 1).

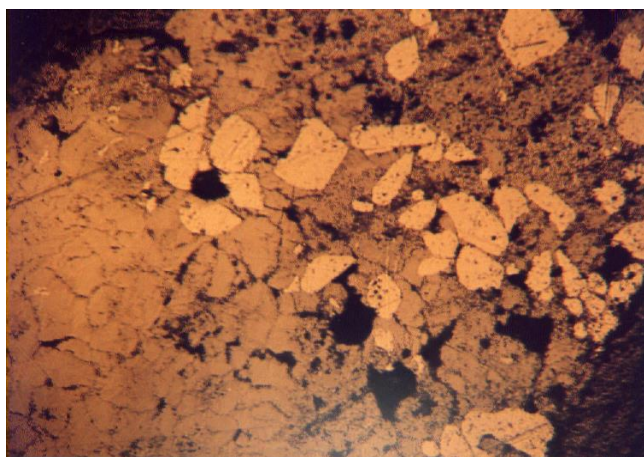


Рис. 1. Микроструктура конгломератного вида эвтектики. Свет отраж. Ув. 95^x

Стабилизация высокотемпературных модификаций диоксида циркония происходит в результате увеличения межионных расстояний в анионной подрешетке. Это реализуется при замещениях Zr^{4+} катионом с большим ионным радиусом ($> 0,082$ нм), либо в результате образования кислородных вакансий при замещении Zr^{4+} катионами в более низкой степени окисления. При этом следует исключить конкурирующие диффузионные процессы, связанные с образованием алюминатов. С этой целью меняли режим разогрева реакционной ячейки, выполненной из графита, выдержку при максимальной температуре, скорость охлаждения расплава. В качестве легирующих добавок использовали оксиды иттрия и элементов II группы таблицы Д.И. Менделеева. Заметим, что в соответствии с размерами ионных радиусов элементов Y^{3+} 0,097 нм и Ca^{2+} 0,104 нм наибольший эффект стабилизации ZrO_{2-x} в тетрагональной структуре можно было ожидать при совместном использовании этих оксидов. Действительно, сплавление предварительно подготовленного шихтового материала

эвтектической смеси диоксида циркония и полупроцентного оксида алюминия с добавками Y_2O_3 до 1 мас.% и CaO до 2 мас.% после предварительного прокалывания на воздухе при 1100–1200 °С для очистки от сорбированных газообразных примесей обеспечило получение тетрагональной модификации диоксида циркония $ZrO_{2-x\text{тетр}}$ $\approx 90\%$ (рис. 2).

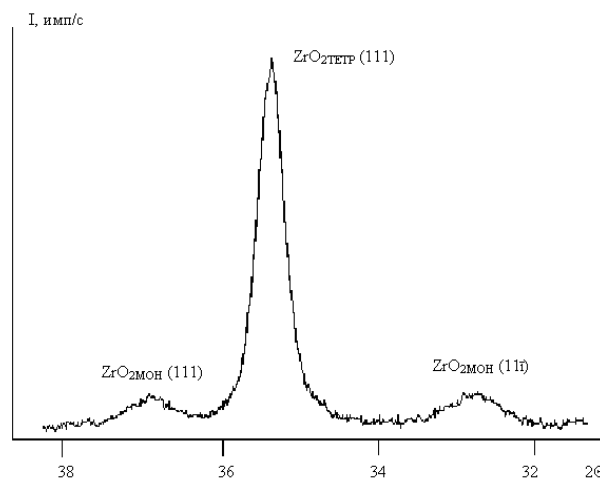


Рис. 2. Фрагмент дифрактограммы зерна оптимального состава

Для получения направленно кристаллизованных эвтектических сплавов в мелкодисперсном состоянии (с размером кристаллов в эвтектике 1-3 мкм) (рис. 3) использовали эффект кристаллохимического активирования ориентированного парного роста по принципу размерного и ориентационного соответствия.

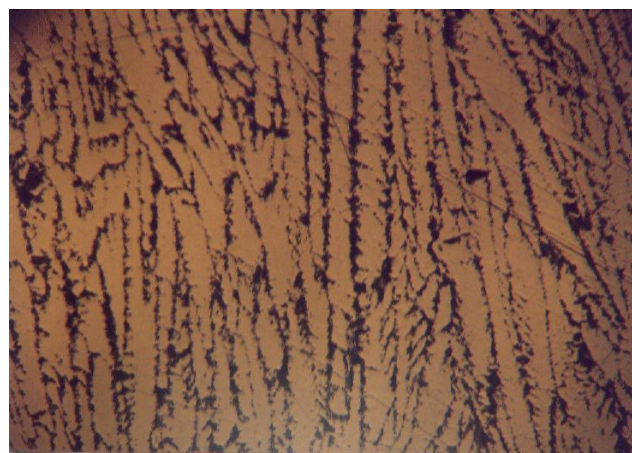


Рис. 3. Микроструктура направленной дендритной кристаллизации. Свет отраж. Ув. 95^x

Были опробованы легирующие добавки к эвтектическим смесям, способные образовывать твердые растворы с диоксидом циркония, но инертные к Al_2O_3 . Наряду с CaO и Y_2O_3 такой способностью обладали некоторые оксиды элементов V группы таблицы Д.И. Менделеева также с меньшим, чем у Zr^{4+} , радиусом катиона (например, Nb^{5+} - 0,066 нм). Образование твердых растворов $ZrO_{2-x\text{тетр}}$ при кристаллизации эвтектических сплавов в системе $ZrO_{2-x\text{тетр}} - Al_2O_3$ (Al^{3+} - 0,057 нм) устраняет структурные несоответствия решеток корунда и дефектного диоксида цир-

кония. Это создает предпосылки для взаимно активированного парного роста кристаллов $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ и ZrO_{2-x} тетр (твердый раствор) в эвтектике с образованием полукруглых границ раздела.

Наблюдаемое в аншлифах чередование кристаллов корунда и дефектного диоксида циркония – результат скоростной кристаллизации эвтектического расплава, которая в свою очередь является дополнительным способом получения материала в мелкодисперсном состоянии. Одновременное использование для легирования оксидов с разновеликими катионами позволило наряду с расширением области существования ZrO_{2-x} тетр (твердый раствор) до комнатных температур получить высокопрочные и высокоплотные сплавы с направленной мелкодисперсной кристаллизацией эвтектических составляющих.

Специфика рельсошлифования требует совмещения прочностных характеристик абразивного зерна с наличием эффекта микроскалывания, иметь с одной стороны постоянное обновление режущих кромок, а с другой – интенсивный отвод тепла удаляемыми частицами, обеспечивая, в конечном счете, требуемую бесприжоговую обработку металла. Анализ аналогов циркониевого электрокорунда ведущих фирм-производителей, например, Saint-Gobain, показал при термогравиметрических исследованиях, что данный материал получен в слабо восстановительных условиях и обладал некоторой нестехиометрией по кислороду, связанной, по-видимому, с содержанием частично восстановленных примесей, таких, как низшие оксиды, окси- и карбонитриды, оксикарбиды и др. Эти примеси, концентрируясь по границам эвтектических кристаллов, способны обеспечить при термическом воздействии процесс микроскалывания и самозатачивания абразивного материала.

В нашем случае регулирование степени восстановления образцов циркониевого электрокорунда проводили введением в шихту следующих восстановителей: 0,5 мас. % углерода, металлов (Al, Ti) 1-2 мас.%. Подбирая режим плавки, обеспечивающие связывание летучих продуктов, кристаллизацию примесных фаз по границам эвтектических кристаллов, удалось получить плотный высокопрочный материал с требуемыми параметрами. Его твердость была в пределах 9,81 (по шкале Мооса), плотность характеризовалась 4,6 г/см³. Прибыль массы в условиях принудительного окисления по данным термогравиметрического анализа составляла 0,5-0,6 мас. % и в совокупности с мелкодисперсной направленной кристаллизацией обеспечила процесс микроскалывания с сохранением острых кромок при термическом воздействии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

1. В результате комплексного легирования и высокоскоростной кристаллизации получены направленно кристаллизованные эвтектические сплавы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ и ZrO_{2-x} тетр (твердый раствор) с размером кристаллов в эвтектике на уровне 1-3 мкм.

2. Синтезированы экспериментальные образцы циркониевого электрокорунда, по своему структурно-фазовому состоянию отвечающие требованиям бесприжоговой обработки металла.

3. Предложен комплекс легирующих добавок, обладающих синергетическим действием в направлении получе-

ния циркониевого электрокорунда заданного структурного и фазового состава.

4. Разработаны экспериментальные приемы комплексного легирования расплава и оптимизированы параметры синтеза (температура, выдержка расплава, скорость охлаждения) с получением образцов циркониевого электрокорунда, отвечающих требованиям бесприжоговой обработки металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Орлова Т.Н. Повышение режущих свойств абразивного инструмента для шлифования железнодорожных рельсов / Т.Н. Орлова, И.В. Дуличенко, И.Ю. Орлов // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: сборник статей международной научно-технической конференции "Шлифабразив-2011" (Волгоград - Волжский, 01 января - 31 декабря 2011 г.). – Волгоград, 2012. – С. 39-42.

2. Обсуждены проблемы техносферной безопасности и экологии // Железнодорожный транспорт. – 2014. – №12. – С. 44-46.

3. Ильиных А.С. Совершенствование организации работ по рельсошлифованию на основе оценки стоимости жизненного цикла рельсов / А.С. Ильиных, О.А. Шаламова, Е.О. Юркова // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2018. – №1(44). – С. 26-32.

4. Зубов А.С. Исследование и разработка процесса получения абразивного материала для силового шлифования на основе корунда: автореф. дис. канд. техн. наук. – Челябинск, 1982. – 27 с.

5. Некоторые вопросы теории и практики производства циркониевого электрокорунда / Г.Г. Михайлов, Ю.С. Кузнецов, А.С. Зубов и др. // Теоретические и экспериментальные исследования абразивных материалов: сборник статей. – Свердловск: АН СССР, Уральский научный центр, 1982. – С. 54-69.

6. Жеханова Н.Б. Требования к абразивным материалам для обдирочного шлифования из циркониевого электрокорунда. // Деп. в ВНИИТЭМР, мш. 91. – Челябинск, 1991, – №57. – 10 с.

7. Rowse Robert A., Watson George R. Zirconia-alumina abrasive grain and grinding tools // Patent US 3891408. 1972.

8. Галлманн Вольфганг, Мельтген Пауль. Способ получения абразивного зерна на основе циркониевого электрокорунда // Патент РФ №2138463. 1994.

9. Зубов А.С., Дубынин А.А., Кузнецов А.В., Филимонов А.Л. Циркониевый электрокорунд, способ его получения и кристаллизатор для его получения // Патент РФ №2144502. 1998. Бюл. №2.

10. Chen J.-W. Martensitic nucleation in ZrO_2 / J.-W.Chen, Y.-H. Chiao // Actamet. – 1983. – Vol. 31, №10. – P. 1627-1638. DOI: 10.1016/0001-6160(83)90161-X

11. К вопросу регулирования структурного и фазового состояния циркониевого электрокорунда эвтектического состава / А.Г. Морозова, Б.А. Чаплыгин, Н.Г. Кузьменко и др. // Абразивное производство: сборник научных трудов. – Челябинск: издательство ЮУрГУ, 2005. – С. 3-5.

12. Монотектическая кристаллизация расплавов системы $\text{ZrO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ / Ю.П. Удалов, Д.В. Грищенко, Ю.Б. Пет-

ров и др. // Физика и химия стекла. – 2006. – Т. 32, №4. – С. 656-665.

13. Таран Ю.Н. Структура эвтектических сплавов / Ю.Н. Таран, В.Н. Мазур. – М.: Металлургия, 1978. – 312 с.

14. Стрюков Д.О. Выращивание профилированных оксидных эвтектик методом Степанова (EFG) // Физико-химия и технология неорганических материалов: сборник материалов XIII Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов (Москва, 18-21 октября 2016 г.). – Москва, 2016. – С. 216-217.

15. Гладков В.Е. Влияние неравновесных условий кристаллизации на объемное соотношение структурных составляющих в сплаве 75 мас % Al_2O_3 – 25 мас % ZrO_2 / В.Е. Гладков, В.М. Березин, Н.Б. Жеханова // Челябинский физико-математический журнал. – 2012. – №31(285). – С. 34-39.

16. Формирование качества поверхностного слоя рельса на основе оптимизации теплового воздействия при шлифовании / В.А. Шаламов, В.А. Аксенов, С.В.

Щелоков, А.С. Ильиных // Прогрессивные технологии в транспортных системах: сборник докладов VII Всероссийской научно-практической конференции. (Оренбург, 01-02 декабря 2005 г.). – Оренбург, 2005. – С. 373-380.

17. Guskov A. Model of directed crystallization of binary alloy // Computational Materials Science. – 2000. – vol. 17, is. 2-4. – P. 555-559. DOI: 10.1016/S0927-0256(00)00087-2

18. Морозова А.Г., Чаплыгин Б.А. и др. Способ получения циркониевого электрокорунда с высоким содержанием тетрагональной модификации диоксида циркония // Патент РФ №2317964. 2006. Бюл. №6.

19. Кертман А.В. Рентгенография. / А.В. Кертман, Н.А. Хригохин, О.В. Андреев. – Тюмень: ТюмГУ, 1993. – 70 с.

20. Аносов В.Я. Основы физико-химического анализа / В.Я. Аносов, М.И. Озерова, Ю.А. Фиалков. – М.: Наука, 1976. – 503 с.

DOI: 10.24892/RIJE/20180404

Investigation of Physical and Chemical Processes of Formation of Composite Materials with Specified Structural Phase Characteristics

Mikhailov G.G., Morozova A.G.

South Ural State University (National Research University)

Chelyabinsk, Russian Federation

mikhailivgg@susu.ru, labchim@mail.ru

Bamburov V.G.

Institute of Solid-State Chemistry

Ural Branch, Russian Academy of Science

Yekaterinburg, Russian Federation

bam@ihim.uran.ru

Abstract. In domestic practice development of the production technology of rail grinding wheels has outstripped the development of technology for the production of zirconium electrocorundum; the electrocorundum meets the requirements of non-thermal metal treatment. Among the artificial abrasives the leading place belongs to corundum and corundum based alloys (zirconium electrocorundum). At the moment the domestic factories of the abrasive industry are producing zirconium electrocorundum of the pre-eutectic composition (containing about 25% of zirconium dioxide) for rough grinding applied for the rough processing of the rolled products. The zirconium electrocorundum for the final non-thermal metal treatment is not produced by domestic factories; there are no technical requirements for such a material. This work was targeted to develop compositions and parameters for melting of prototypes for the industrial scale production of zirconium electrocorundum with specified and controlled properties. The grain of zirconium electrocorundum in the grinding wheels used in rail grinding trains has specific properties. According to the principles of non-thermal material processing, the structural and phase state of the grinding grain should provide high strength and durability under normal conditions, and at the same time it should tend to shear during the thermal exposure. The design of domestic electrocorundum for rail grinding with properties which are not inferior in comparison with the imported analogues is a strategic issue.

Keywords: Non-thermal metal treatment, rail grinding, zirconium electrocorundum, finely dispersed eutectics, mutually oriented paired growth of crystals, micro shearing.

REFERENCES

1. Orlova T.N., Dulichenko I.V., Orlov I.Yu. Improving the cutting properties of the abrasive tool for grinding rail rails x Povyshenie rezhushchikh svoystv abrazivnogo instrumenta dlya shlifovaniya zheleznodorozhnykh rel'sov], *Cbornik statey mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Protsesty abrazivnoy obrabotki, abrazivnye instrumenty i materialy" [A collection of articles of the international scientific-technical conference "Abrasive machining processes, abrasive tools and materials"]*, (Volgograd - Volzhsky, January 1 - December 31, 2011), Volgograd, 2012, pp. 39-42. (in Russ.)

2. The problems of technospheric safety and ecology were discussed [Obsuzhdeny problemy tekhnosfernoy bezopasnosti i ekologii], *Zheleznodorozhnyy transport [Railway Transport]*, 2014, no.12, pp. 44-46. (in Russ.)

3. Ilinykh A.S. Shalamova O.A., Yurkova E.O. Improving the Organization of Work on Rail Grinding Based on the Cost of the Rails Vital Cycle [Sovershenstvovanie organizatsii rabot po rel'soshlifovaniyu na osnove otsenki stoimosti zhiznennogo tsikla rel'sov], *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya [Bulletin of the Siberian State University of Communications]*, 2018, no.1 (44), pp. 26-32. (in Russ.)

4. Zubov A.S. *Issledovanie i razrabotka protsesta polucheniya abrazivnogo materiala dlya silovogo shlifovaniya na*

osnove korunda: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk [Research and development of the process of obtaining abrasive material for force grinding on the basis of corundum: author. PhD dissertation], Chelyabinsk, 1982, 27 p. (in Russ.)

5. Mikhailov G.G., Kuznetsov Yu.S., Zubov A.S. et al. Some questions of the theory and practice of production of zirconium electrocorundum [Nekotorye voprosy teorii i praktiki proizvodstva tsirkonievogo elektrokorunda], *Cbornik staty "Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya abrazivnykh materialov" [A collection of articles "Theoretical and experimental studies of abrasive materials"]*, Sverdlovsk, USSR Academy of Sciences, Ural Scientific Center, 1982, pp. 54-69. (in Russ.)

6. Zhekhanova N.B. Requirements for abrasive materials for roughing grinding of zirconium oxide [Trebovaniya k abrazivnym materialam dlya obdirochnogo shlifovaniya iz tsirkonievogo elektrokorunda], *Dep. in VNIITEMR*, ms. 91, Chelyabinsk, 1991, no.57, 10 p. (in Russ.)

7. Rowse Robert A., Watson George R. Zirconia-alumina abrasive grain and grinding tools, Patent US 3891408, 1972.

8. Gallmann Wolfgang, Meltgen Paul. *Sposob polucheniya abrazivnogo zerna na osnove tsirkonievogo elektrokorunda* [A method of obtaining abrasive grain based on zirconium oxide electrocorundum], Patent RF 2138463, 1994. (in Russ.)

9. Zubov A.S., Dubynin A.A., Kuznetsov A.V., Filimonov A.L. *Tsirkonievyy elektrokorund, sposob ego polucheniya i kristallizator dlya ego polucheniya* [Zirconium electrocorundum, method of its production and mold for its production], Patent RF 2144502, 1998, Bull. No.2. (in Russ.)

10. Chen J.-W., Chiao Y.-H. Martensitic nucleation in ZrO_2 , *Actamet*, 1983, vol. 31, no.10, pp. 1627-1638. DOI: 10.1016/0001-6160(83)90161-X

11. Morozova A.G., Chaplygin B.A., Kuzmenko N.G. et al. To the issue of regulation of the structural and phase state of zirconium electrocorundum of eutectic composition [K voprosu regulirovaniya strukturnogo i fazovogo sostoyaniya tsirkonievogo elektrokorunda evtekticheskogo sostava], *Cbornik nauchnykh trudov "Abrazivnoe proizvodstvo" [Collection of Scientific Works "Abrasive Production"]*, Chelyabinsk, SUSU publishing house, 2005, pp. 3-5. (in Russ.)

12. Udalov Yu.P., Grishchenko D.V., Petrov Yu.B. et al. Monotectic crystallization of melts in the ZrO_2 -Al $_2$ O $_3$ system, *Glass Physics and Chemistry*, 2006, vol.32, no.4, pp. 479-485. DOI: 10.1134/S1087659606040122

13. Taran Yu.N., Mazur V.N. *Struktura evtekticheskikh splavov* [Structure of eutectic alloys], Moscow, Metallurgy, 1978, 312 p. (in Russ.)

14. Stryukov D.O. Growing profiled oxide eutectics using the Stepanov method (EFG) [Vyrashchivanie profilirovannykh ok-sidnykh evtektik metodom Stepanova (EFG)], *Sbornik materialov XIII Rossiyskoy ezhegodnoy konferentsii molodykh nauchnykh sotrudnikov i aspirantov "Fiziko-khimiya i tekhnologiya neorganicheskikh materialov" [A collection of materials from the XIII Russian annual conference of young researchers and graduate students "Physical chemistry and technology of inorganic materials"]*, (Moscow, October 18-21, 2016), Moscow, 2016, pp. 216-217. (in Russ.)

15. Gladkov V.E., Berezin V.M., Zhekhanov N.B. The effect of non-equilibrium crystallization conditions on the volume ratio of the structural components in the alloy of 75 wt.% Al $_2$ O $_3$ - 25 wt.% ZrO $_2$ [Vliyaniye neravnovesnykh usloviy kristallizatsii na ob'emnoe sootnoshenie strukturnykh sostavlyayushchikh v splave 75 mas % Al $_2$ O $_3$ – 25 mas % ZrO $_2$], *Chelyabinskii fiziko-matematicheskii zhurnal [Chelyabinsk Physics and Mathematics Journal]*, 2012, no.31 (285), pp. 34-39. (in Russ.)

16. Shalamov V.A., Aksenov V.A., Schelokov S.V., Ilinykh A.S. Formation of the quality of the surface layer of the rail based on the optimization of thermal effects during grinding [Formirovaniye kachestva poverkhnostnogo sloya rel'sa na osnove optimizatsii teplovogo vozdeystviya pri shlifovanii], *Sbornik dokladov VII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Progressivnyye tekhnologii v transportnykh sistemakh" [A collection of reports of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference "Progressive technologies in transport systems"]*, (Orenburg, 01-02 December 2005), Orenburg, 2005, pp. 373-380. (in Russ.)

17. Guskov A. Model of directed crystallization of binary alloy, *Computational Materials Science*, 2000, vol. 17, is. 2-4, pp. 555-559. DOI: 10.1016/S0927-0256(00)00087-2

18. Morozova A.G., Chaplygin B.A. et al. *Sposob polucheniya tsirkonievogo elektrokorunda s vysokim soderzhaniem tetragonal'noy modifikatsii dioksida tsirkoniya* [A method of producing zirconium electrocorundum with a high content of tetragonal modification of zirconium dioxide], Patent RF 2317964, 2006, Bull. No.6. (in Russ.)

19. Kurtman A.V. Khritokhin N.A., Andreev O.V. *Rentgenografiya* [X-ray], Tyumen, Tyumen State University, 1993, 70 p. (in Russ.)

20. Anosov V.Ya., Ozerova M.I., Fialkov Yu.A. *Osnovy fiziko-khimicheskogo analiza* [Fundamentals of physical and chemical analysis], Moscow, Science, 1976, 503 p. (in Russ.)

Библиографическое описание статьи

Михайлов Г.Г. Исследование физико-химических процессов формирования композиционных материалов с заданными структурно-фазовыми характеристиками / Михайлов Г.Г., Морозова А.Г., Бамбуров В.Г. // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2018. – Т.6, №4. – С. 17-22. DOI: 10.24892/RIJIE/20180404

Reference to article

Mikhailov G.G., Morozova A.G., Bamburov V.G. Investigation of physical and chemical processes of formation of composite materials with specified structural phase characteristics, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2018, vol.6, no.4, pp. 17-22. DOI: 10.24892/RIJIE/20180404