

УДК 624.131; 622.831

АНИЗОТРОПИЯ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИНТЕТИЧЕСКИХ МИНЕРАЛЬНЫХ СПЛАВОВ

Игнатова А.М., Игнатов М.Н., Артемов А.О.

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Пермь, e-mail: ignatovaanna2007@rambler.ru, artemoff87@mail.ru

Исследование, результаты которого представлены в статье, доказывают явление анизотропии структуры симиналов и описывают характер их механических свойств. Симиналы, как правило, лучше работают при статических сжимающих нагрузках, чем при динамических. Подробно изучена структура различных симиналов, выявленные особенности которой объясняют поведение материала при различных нагрузках. Установлено, что чем меньше размер кристаллических составляющих и чем больше доля аморфной фазы, тем сильнее выражена анизотропия, с развитием кристалличности поперечная прочность увеличивается в ущерб продольной, с развитием спаянности общая прочность снижается. Термическая обработка, с помощью которой и регулируется соотношение кристаллической фазы к аморфной и непосредственно размер кристаллических агрегатов в структуре, должна назначаться не только в соответствии с требованиями по прочности будущего изделия, но и в соответствии с его конфигурацией.

Ключевые слова: каменное литье, синтетические минеральные сплавы, механические свойства, анизотропия, структура

ANISOTROPY OF THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF SYNTHETIC MINERAL ALLOY

Ignatova A.M., Ignatov M.N., Artemov A.O.

National Research Perm Polytechnic University, Perm,
e-mail: ignatovaanna2007@rambler.ru, artemoff87@mail.ru

The study results, which are presented in the article demonstrate the phenomenon of anisotropy of the structure and describe the nature of siminals their mechanical properties. Siminals tend to work better under static compressive loads than dynamic. Studied in detail the structure of various siminals identified features which explain the behavior of materials under different loads. Found that the smaller the size of crystalline components and the greater proportion of the amorphous phase, the more pronounced anisotropy, with the development of crystalline of the transverse strength increases at the expense of the longitudinal, with the development of overall cohesion strength is reduced. Heat treatment by which the adjusted ratio of the crystalline phase to amorphous and crystalline aggregates directly to the size of the structure should be administered not only in conformity with the requirements of the future strength of the product, but also in compliance with its configuration.

Keywords: stone molding, synthetic mineral alloys, mechanical properties, the anisotropy of the structure

Современный уровень развития техники позволяет не только изучить особенности строения природных материалов, но и «повторить» его при синтезе новых материалов. Существует огромное число материалов, созданных искусственно, которые обладают структурой, подобной тем, которые встречаются в природе, причем такое подражание распространяется как на макро-, так и на микроуровень [1–3]. К числу природоподобных материалов относятся синтетические минеральные сплавы (симиналы) [4, 5].

Симиналы представляют собой материалы, полученные по технологии каменного литья, то есть в результате переплавления оксидного сырья, основного и ультраосновного характера. В качестве сырья могут быть использованы как натуральные горные породы, так и техногенные минеральные образования, схожие с ними по составу (доменный шлак, угольные терриконики и т.д.). В среднем температура плавления такого сырья составляет 1300–1500 °С, сам процесс плавления может быть иници-

рован в различных плавильных агрегатах, как топливных, так и электрических, наиболее часто используются электродуговые установки.

Технология каменного литья подразумевает формирование изделий непосредственно на стадии синтеза материала, то есть путем заливки расплава в литейные формы.

Структура симиналов представляет собой сочетание кристаллической и аморфной составляющих, что и делает их так похожими на горные породы как по основным структурным характеристикам, так и по уровню механических свойств.

Наличие в материале структурных составляющих с различной упорядоченностью достигается благодаря двум факторам: наличию упорядоченных нуклеаций в расплаве, которое обусловлено наличием тугоплавких соединений в составе сырья, и проведению кристаллизационно-отжигательной термической обработки, благодаря которой нуклеации развиваются до кристаллических структурных образований.

Термическая обработка включает в себя две стадии: первая – выдержка при температуре 800–900 °С, вторая – охлаждение до комнатной температуры со скоростью 30 °С/ч.

Исследования, проведенные нами ранее [6–10], позволили сформировать наиболее полное представление о структуре симиналов. Кристаллические составляющие в структуре симиналов представляют собой сферолиты, состоящие из ядра и оболочки. Ядро, как правило, представляет собой кристалл тугоплавкого соединения, а оболочка состоит из другого минерального образования обрастающего вокруг ядра, как правило, близко к пироксену. На границе кристаллического составляющего как правило формируется переходный слой к аморфной, этот переходный слой содержит большое число дефектов кристаллической решетки, вакансий чаще всего больше. Аморфная составляющая распределяется между кристаллическими агрегатами неравномерно, она является своеобразной матрицей, которая амортизирует напряжения, возникающие в процессе роста кристаллов. В структуре симиналов могут встречаться макровключения, например, оливин.

Столь сложное строение материала позволяет добиться уникальных механиче-

ских характеристик, а именно сочетания высокой твердости и прочности при сжатии, которое делает симиналы стойкими к механическому изнашиванию [11], можно сказать, что симиналы – одни из самых долговечных материалов, срок службы которых исчисляется десятилетиями.

Недостатком симиналов является низкая пластичность и склонность к хрупким разрушениям, для того чтобы прогнозировать их поведение и предупреждать лавинообразные процессы разрушения при работе в конструкциях, необходимо иметь представление о деформационных процессах в этих материалах. Структура симиналов, как было отмечено ранее, является неравномерной, с большим числом дефектов кристаллической решетки, приводит к анизотропии свойств на макроуровне.

Настоящее исследование преследует цель определить, обладают ли симиналы анизотропией структуры и прочностных свойств на макроуровне, и при ее обнаружении определить характер этого явления.

В качестве объектов исследования выбраны две разновидности симиналов: термостойкие и износостойкие. Эти разновидности отличаются друг от друга по составу (таблица) и по строению.

Химический состав симинала

Разновидность симинала	Содержание, %									
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O+Na ₂ O	FeO	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO
Износостойкий	47,30	2,30	12,50	8,30	9,50	2,10	10,9	3,40	0,50	-
Термостойкий	56,10	0,40	6,70	13,90	18,80	0,40	-	3,30	-	0,06

Структура износостойкого симинала (рис. 1) порфировая. Порфировые выделения присутствуют в структуре в виде кристаллов магнетита изометрической формы размером от 0,01 до 0,09 мм и хромита размером от 0,01 до 0,07 мм, зачастую выделения образуют вариолы, где в центре – частица магнетита или хромита, а вокруг – лучистые отложения амфиболов. Текстура всех образцов в разной степени полосчатая, пятнистая, кристаллические выделения соединяются между собой буроватой стекломассой (по всей видимости мелкокристаллической). На рис. 1 *г, д, е* представлены структуры симиналов с полосчатой структурой, возникшей в результате переохлаждения расплава на стадии его дифференциации. Траектория текстурообразующих полос совпадает с движением расплава, что явно наблюдается на рис. 1, *е*, где представлен образец, полученный при центробежном литье в металлическую форму. Согласно наблюдениям полосы, формирующие структуру, стремятся к выстраиванию цепочек из сферолитов, в центре таких сферолитов расположены кристаллы магнетита или хромита (которые можно называть рудными выделениями). Встречаются случаи, когда в центре располагаются скелетные кристаллы этих же выделений или авгита, эти центры окружены келифитовыми каемками, возникшими предположительно в результате уже вторичных кристаллизационных процессов, каемки, как правило, представлены амфиболами.

Структура термостойкого симинала полнокристаллическая (рис. 2), мелко- и среднезернистая (размер зерен от 0,2 до 3,6 мм и более), полиаморфная. Главный порообразующий минерал сильно изменен, степень идиоморфизма невысокая. Порообразующий минерал авгит, бурого цвета изометрической, перистой и радиально-лучистой формы, спайность совершенная. Вследствие сильных температурных изменений спайность минерала приобрела зигзагообразное, волнообразное, местами метельчатое направление.

Структура термостойкого симинала полнокристаллическая (рис. 2), мелко- и среднезернистая (размер зерен от 0,2 до 3,6 мм и более), полиаморфная. Главный порообразующий минерал сильно изменен, степень идиоморфизма невысокая. Порообразующий минерал авгит, бурого цвета изометрической, перистой и радиально-лучистой формы, спайность совершенная. Вследствие сильных температурных изменений спайность минерала приобрела зигзагообразное, волнообразное, местами метельчатое направление.

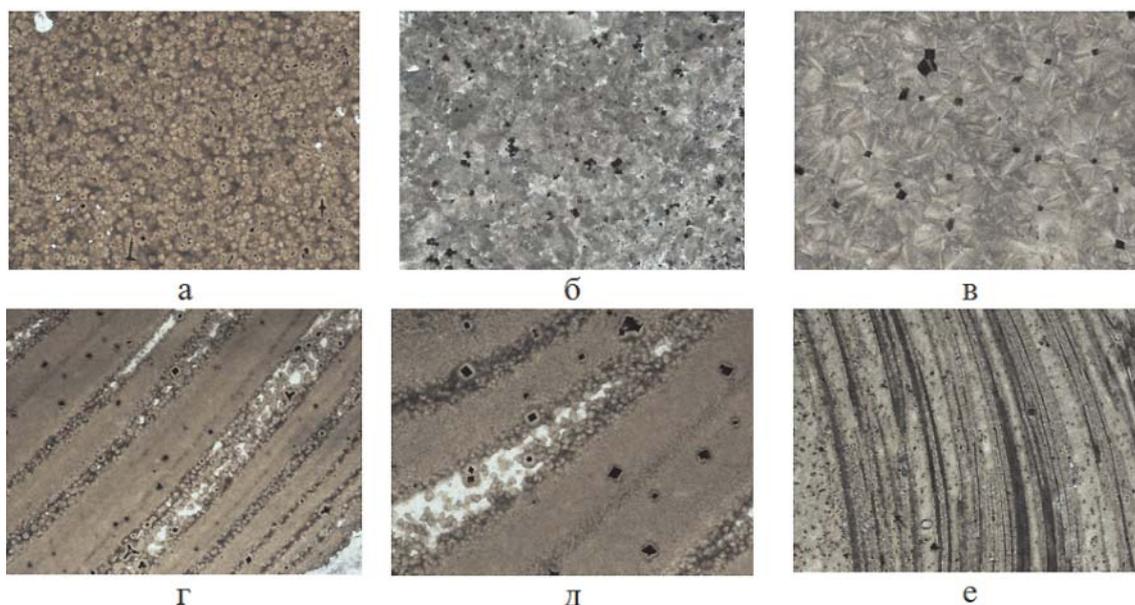


Рис. 1. Структура износостойких симиналов, зафиксированная при скрещенных николях: а – получено в разовой песчано-глинистой форме, ув. $\times 50$; б – получено в разовой песчано-глинистой форме, ув. $\times 50$; в – получено в разовой песчано-глинистой форме, ув. $\times 100$; г и д – структура с зафиксированной дифференциацией, ув. $\times 50$; е – структура полученная при литье металлическую форму центробежным способом, ув. $\times 50$

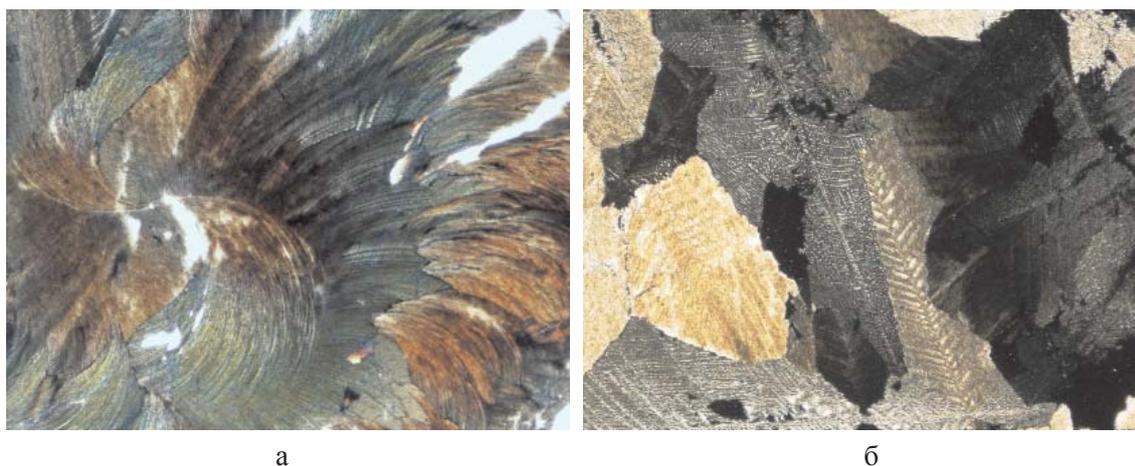


Рис. 2. Структура термостойкого симинала, полученного в песчно-глинистой форме при скрещенных николях: а – ув. $\times 50$; б – ув. $\times 100$

Данные, полученные о структуре симиналов, свидетельствуют о том, что соотношение кристаллической и аморфной составляющей не постоянно и в разных частях изделия является различным. По аналогии с горными породами известно [12], что значительную роль при деформировании в подобных системах играет аморфная прослойка. Как правило, соотношение кристаллической фазы к аморфной в износостойких симиналах составляет 93 на 7%, а в термостойких – 96 на 4%. Поскольку однозначные данные о пластическом поведении подобных составляющих отсутствуют, нами были про-

ведены экспериментальные исследования прочности при одноосном на сжатии.

В своих исследованиях мы использовали универсальную испытательную машину (УИМ) марки Zwick – Z250 (Германия). В процессе испытаний фиксируются значения подаваемой нагрузки, момент инерции, величина деформации и продолжительность испытаний. Управление ходом испытаний и фиксирование их результатов производится с помощью персонального компьютера, синхронизированного с установкой. В данной работе в качестве образцов использовались бруски в форме парал-

лелепипеда 18×12×15 мм, вырезанные из тела отливок.

Для того что бы выявить анизотропию для каждой разновидности симиналов, были получены образцы двух типов: продольные и поперечные.

В результате проведения испытаний были получены диаграммы, характеризующие предел прочности при сжатии у испытываемых образцов (рис. 3). Для упрощения

анализа данных они были представлены в виде столбчатых диаграмм (рис. 4). Установлено, что наиболее сильно анизотропия выражена в образцах износостойкого симинала, общий наиболее высокий уровень прочности характерен также износостойким симиналам. Характерная особенность заключается в том, что у износостойких симиналов выше продольные показатели, а у термостойких – поперечные.

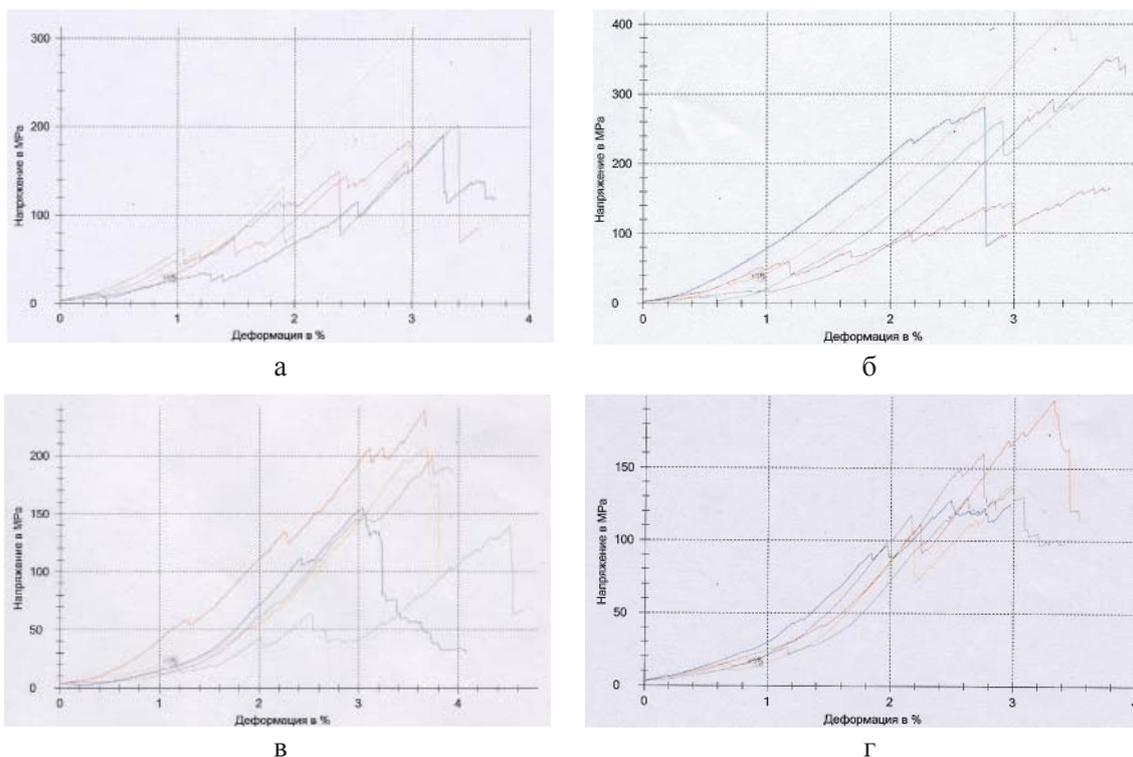


Рис. 3. Диаграммы зависимости деформации образцов симиналов от приложенной нагрузки:
 а – поперечный образец износостойкого симинала;
 б – продольный образец износостойкого симинала; в – поперечный образец термостойкого симинала; г – продольный образец термостойкого симинала

Очевидно, что различия в строении обеспечивают различный характер деформирования и разрушения.

Для того что бы выделить определенные характерные особенности деформирования различных симиналов, рассмотрим общий механизм деформирования. Достоверно установлено [13], что процесс деформации в материалах, подобных симиналам (горных породах), обусловлен перемещением дислокаций, как правило, в результате деформирования дислокации не возникают. В деформации учувствуют те дислокации, которые присутствовали в структуре до нагружения. Однако в процессе деформации вакансии вполне могут частично перейти в дислокации, а значит, число их может быть увеличено. В кристаллах минеральных образований, входящих в структуру,

в точках дислокаций при деформировании происходит скольжение, смещение одного пласта кристалла относительно другого, причем внутри самих пластов каких-либо изменений обычно не происходит.

Симиналы не склонны к ползучести, это говорит о том, что дислокации быстро, практически мгновенно, проходят возможное расстояние и останавливаются, затем по всей видимости, в деформационном процессе начинает принимать участие аморфная фаза. Известно [12], что аморфные минералы остаются упругими и вплоть до разрыва сплошности, что подтверждают результаты испытаний, величина деформации и изменения длины образцов невелика и не превышает сотых долей процента.

Разрушение образцов симиналов в процессе сжатия, вероятнее всего, вызвана об-

разованием и лавинообразным развитием трещин, отрыва и сдвига различного размера и их комбинации. Опять же в силу структурной неоднородности предшествующие образованию трещин напряжения так же

концентрируются неравномерно, при достижении в некоторой области нагруженного тела предельного значения напряжения происходит разрыв внутренних связей и частичное снятие (релаксация) напряжения.

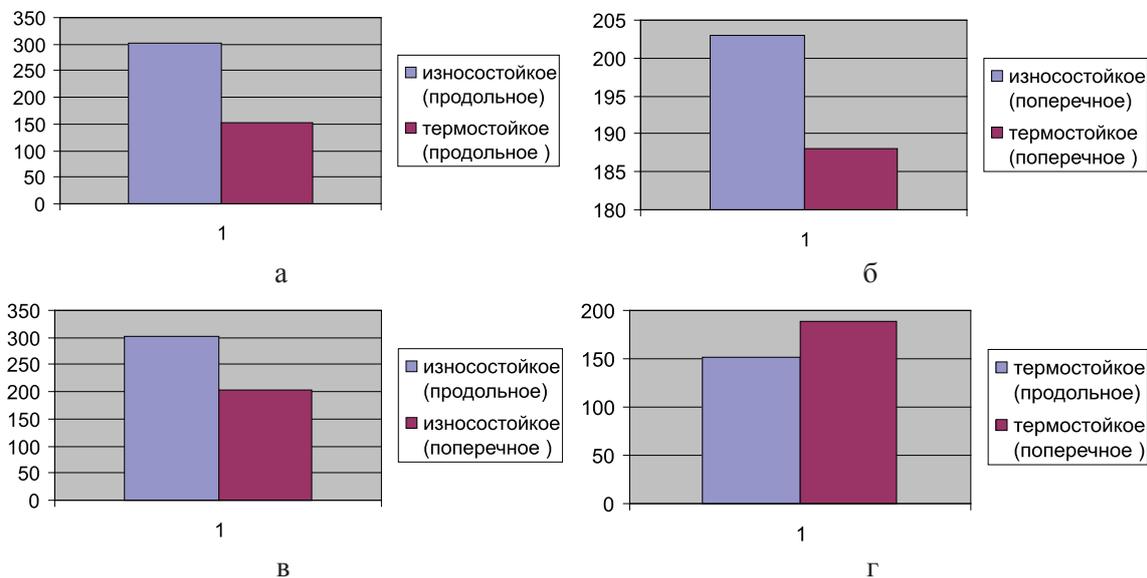


Рис. 4. Столбчатые диаграммы сравнения показателей предела прочности при сжатии, МПа: а – сравнение продольных показателей у двух разновидностей симиналов; б – сравнение поперечных показателей у двух разновидностей симиналов; в – сравнение продольных и поперечных показателей износостойкого симинала; г – сравнение продольных и поперечных показателей термостойкого симинала

Таким образом, факт наличия анизотропии структуры и механических свойств симиналов установлен. Применяв эти теоретические данные к полученным результатам, можно утверждать, что:

- чем меньше размер кристаллических составляющих и чем больше доля аморфной фазы, тем сильнее выражена анизотропия;
- с развитием кристалличности поперечная прочность увеличивается в ущерб продольной;
- с развитием спаянности общая прочность снижается.

Учитывая эти закономерности, можно сказать, что термическая обработка, с помощью которой и регулируется соотношение кристаллической фазы к аморфной и непосредственно размер агрегатов, должна назначаться не только в соответствии с требованиями по прочности будущего изделия, но и в соответствии с его конфигурацией.

Список литературы

1. Капица С.П. Синергетика и прогнозы будущего. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 342 с.
2. Курдюмов С.П. У истоков синергетического видения мира: режимы с обострением/ С.П. Курдюмов, Е.Н. Князева // Самоорганизация и наука: опыт философского осмысления. – М.: Арга, 1994. – С. 162–186.

3. Николис Г. Познание сложного. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 344 с.

4. Игнатова А.М. Исследование и разработка схемы абразивного изнашивания поверхности синтетических минеральных сплавов склерометрическими измерениями // Вестник Тамбовского университета, серия: Естественные и технические науки. – 2010. – № 3, т. 15. – С. 1203–1208.

5. Игнатова А.М. Петрографические исследования взаимосвязи структуры и свойств базальтового сырья и литья // Материалы 10-х всероссийских научных чтений памяти Ильменского минералога В.О. Полякова. – Миасс, 2009. – С. 45–49.

6. Игнатова А.М. Кристаллизационно-ликвационная модель-схема формирования стеклокристаллических материалов каменного литья / А.М. Игнатова, В.П. Чернов, А.М. Ханов // Материалы V-й Всероссийской НТК «АНТЭ-09». – Казань: КГАУ, 2009. – С. 235–237.

7. Игнатова А.М. Нанотвердость и особенности структуры синтетического каменного литья / А.М. Игнатова, А.М. Ханов // Новые материалы, наносистемы и нанотехнологии: Материалы всероссийской молодежной научно-технической конференции. – Ульяновск, 2010. – С. 345–348.

8. Игнатова А.М. Исследование и разработка основных правил управления структурным миром силикатов применительно к каменному литью / А.М. Игнатова, В.П. Чернов, А.М. Ханов // От наноструктур, наноматериалов и нанотехнологий к наноиндустрии: сб. тезисов II Всероссийской конференции. – Ижевск: ИжГТУ, 2009. – С. 45.

9. Игнатова А.М. Исследование кристаллохимической систематики силикатов применительно к каменному литью / А.М. Игнатова, А.М. Ханов // Перспективы развития фундаментальных наук: материалы Международной конференции студентов и молодых ученых. – Томск: ТПУ, 2009. – С. 38.

10. Игнатова А.М. Правила управления структурой и свойствами каменного литья // Вестник Пермского государственного технического университета. Машиностроение. Материаловедение. – 2010. – № 3, т.14. – С. 67–75.

11. Чечулин В.А. Свойства силикатных расплавов для производства камнелитых отливок / В.А. Чечулин, Ю.Г. Ковалев // Литейные свойства металлов и сплавов: тр. XXI совещания по теории литейных процессов. – М.: Наука, 1967. – С. 356–378.

12. Hoek E. A simple triaxial cell for field and laboratory testing of rock // Trans. Instn Min. Metall. – 1968. – Vol. 77. – P. 22–26.

13. Ставрогин А.Н. Прочность горных пород и устойчивость выработок на большой глубине. – М.: Недра, 1986. – 789 с.

References

1. Kapica S.P. Sinergetika i prognozy buduwego. М.: Editorial URSS, 2002. 342 p.

2. Kurdjumov S.P. U istokov sinergeticheskogo videnija mira: rezhimy s obostreniem / S.P. Kurdjumov, E.N. Knjazeva // Samoorganizacija i nauka: opyt filosofskogo osmyslenija. М.: Argo, 1994. pp. 162–186.

3. Nikolis G. Poznanie slozhnogo. -М.: Editorial URSS, 2003. 344 p.

4. Ignatova A.M. Issledovanie i razrabotka shemy abrazivnogo iznashivaniya poverhnosti sinteticheskikh mineralnyh splavov sklerometricheskimi izmerenijami // Vestnik Tambovskogo universiteta, serija: Estestvennye i tehnicheckie nauki. no. 3, t. 15, 2010. pp. 1203–1208.

5. Ignatova A.M. Petrograficheskie issledovanija vzaimosvjazi struktury i svojstv bazaltovogo syrja i litja/A.M. Ignatova // Materialy 10-yh vserossijskikh nauchnyh chtenij pamjati Ilmenskogo mineraloga V.O.Poljakova. Miass, 2009. pp. 45–49.

6. Ignatova A.M. Kristallizacionno-likvacionnaja model-shema formirovanija steklokristallicheskih materialov kamennogo lit / A.M. Ignatova, V.P. Chernov, A.M. Hanov // Materialy V-oj Vserossijskoj NTK «ANTJe-09» – Kazan: KGAU, 2009. pp. 235–237.

7. Ignatova A.M. Nanotverdost i osobennosti struktury sinteticheskogo kamennogo lit'ja/ A.M. Ignatova, A.M. Hanov//

Materialy vserossijskoj molodezhnoj nauchno-tehnicheckoj konferencii «Novye materialy, nanosistemy i nanotehnologii». Uljanovsk, 2010. pp. 345–348.

8. Ignatova A.M. Issledovanie i razrabotka osnovnyh pravil upravlenija strukturnym mirom silikatov primenitelno k kamennomu litju/ A.M. Ignatova, V.P. Chernov, A.M. Hanov// Sb. tezisov II Vserossijskoj konferencii «Ot nanostruktur, nanomaterialov i nanotehnologij k nanoindustrii». Izhevsk: IzhGTU, 2009. pp. 45.

9. Ignatova A.M. Issledovanie kristallohimicheskoi sistematiki silikatov primenitel'no k kamennomu litju / A.M. Ignatova, A.M. Hanov// Materialy Mezhdunarodnoj konferencii studentov i molodyh uchenyh «Perspektivy razvitiya fundamental'nyh nauk». Tomsk: TPU, 2009. pp. 38.

10. Ignatova A.M. Pravila upravlenija strukturoj i svojstvami kamennogo litja // «Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tehnicheckogo universiteta «Mashinostroenie. Materialovedenie» . no. 3, t.14, 2010. pp. 67–75.

11. Chechulin V.A. Svojstva silikatnyh rasplavov dlja proizvodstva kamnelityh otlivok / V.A. Chechulin, Ju.G. Koval'ev // Tr. XXI sovesanija po teorii litejnyh processov «Litejnye svojstva metallov i splavov». М: Nauka, 1967. pp. 356–378.

12. Hoek E. A simple triaxial cell for field and laboratory testing of rock // Trans. Instn Min. Metall. 1968, Vol. 77. pp. 22–26.

13. Stavrogin A.N. Prochnost gornyh porod i ustojchivost' vyrabotok na bol'shoj glubine. М.: Nedra, 1986. 789 p.

Рецензенты:

Беленький В.Я., д.т.н., профессор, зам. директора, Западно-уральский аттестационный центр, г. Пермь;

Щицын Ю.Д., д.т.н., профессор, зав. кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь.

Работа поступила в редакцию 04.05.2012.