

3. ГОСТ 28985–91. Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 10 с.

4. Martin C.D., Chandler N.A. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. – 1994. – V. 31, No. 6. – P. 643–659.

5. Hakala M., Kuula H., Hudson J.A. Estimating the transversely isotropic elastic intact rock properties for in

situ stress measurement data reduction: A case study of the Olkiluoto mica gneiss, Finland // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 2007. – V. 44, No. 1. – P. 14–46.

6. Eberhardt E., Stead D., Stimpson B., Read R.S. Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock // Can. Geotech. J. – 1998. – V. 35, No. 2. – P. 222–233.

Поступила в редакцию 14.11.2013

УДК 669.041:536.24

Вязкость расплава и технологические режимы формирования непрерывных базальтовых волокон при фильерном способе получения

А.А. Гаврильева, Г.Г. Винокуров, А.К. Кычкин

Определены основные технологические параметры формирования непрерывного базальтового волокна из сырья месторождения Республики Саха (Якутия). Установлено, что изменение вязкости расплава больше всего влияет на величину диаметра получаемого волокна, выделена аналитическая взаимосвязь между вязкостью, химическим составом, структурой расплава и температурой расплава базальта. На основе решения задач тепло-гидродинамических и реологических истечений базальтового непрерывного волокна с учетом теоретической вязкости местного сырья найдены соотношения для основных технологических параметров процесса.

Ключевые слова: базальтовое непрерывное волокно, фильерный способ, гидродинамика течения, вязкость, степень деполимеризации, энергия активации, температура кристаллизации.

The basic technological parameters of continuous basalt fiber formation from raw materials of a field of the Republic of Sakha (Yakutia) are determined. It is established that fusion viscosity change most of all influences received fiber diameter size. The analytical interrelation between viscosity, chemical composition, structure of fusion and basalt fusion temperature is found. On the basis of the solution of heat and hydrodynamic and rheological problems of continuous basalt fiber outflow and taking into account the viscosity of local raw materials the ratios for the basic technological parameters of the process are found.

Key words: continuous basalt fiber, spinneret method, flow hydrodynamics, viscosity, depolymerization degree, activation energy, crystallization temperature.

Введение

Одним из перспективных инновационных направлений развития Республики Саха (Якутия) и Севера России является внедрение технологий, связанных с производством базальтового непрерывного волокна (БНВ) и композиционных материалов на его основе. Это обусловлено наличием в республике сырьевой базы для их производства и экономической целесообразностью замены традиционных материалов на базальтопластики.

Как известно, промышленное производство БНВ осуществляется в одну стадию фильерным способом; формирование волокна производится из вязкого потока расплава базальта, вытекающего из фильеры. При этом натяжение передается через сформировавшееся волокно от вращающегося барабана намоточного агрегата. На процессы формирования существенно влияют зависимость вязкости от температуры и поверхностное натяжение расплава, которое практически не зависит от температуры в интервале формирования волокна. Поэтому разработка методов расчета и прогнозирования вязкости расплава базальта является актуальной научно-практической задачей. В результате систематических исследований вязкости расплавов горных пород установлено, что их течение в области ликвидуса соответствует ньютоновской модели жидкости; выявлена аналитическая взаимосвязь между вязкостью, хи-

ГАВРИЛЬЕВА Анна Андреевна – м.н.с. ИФТПС СО РАН, gav-ann@yandex.ru; ВИНОКУРОВ Геннадий Георгиевич – к.т.н., в.н.с. ИФТПС СО РАН, в.н.с., g.g.vinokurov@iptpn.ysn.ru; КЫЧКИН Анатолий Константинович – к.т.н., в.н.с. ИФТПС СО РАН, kychkinplasma@mail.ru.

мическим составом, структурой расплава, температурой и давлением [1].

В связи с тем, что научные основы технологии получения базальтовых волокон находятся в стадии разработки и становления, строгое описание поведения базальтовых расплавов при формировании волокна, т.е. решение системы уравнений движения, энергии и сплошности с соответствующими граничными условиями, практически отсутствует. Тем не менее, несмотря на узкий круг специалистов в области базальтовых волокон, в литературе постоянно появляются работы, связанные с накоплением экспериментальных данных и решением частных задач по математической формализации процесса получения непрерывного базальтового волокна [2]. Пионерами научного сопровождения технологии БНВ в этом направлении являются научные школы России и Украины.

Разработка математической модели узла формирования БНВ предполагает решение ряда физических, гидродинамических, реологических и других задач. В первую очередь это расчет, прогнозирование вязкости расплава базальта для задач гидромеханики формирования базальтового волокна.

Целью данной работы являются разработка модели для расчета характеристик вязкости расплава базальта и определение основных технологических параметров формирования непрерывного базальтового волокна из сырья месторождения Республики Саха (Якутия) при фильерном способе их получения.

Модель для расчета вязкости

При фильерном способе получения для описания формирования базальтового непрерывного волокна и определения технологических режимов используется следующий упрощенный подход [2, 3]. Из закона сохранения массы количество вытекающей из фильеры базальтомассы равно количеству вытянутого за тот же промежуток времени волокна, тогда можно получить формулу для расчета основных технологических параметров процесса [2]:

$$d_g^2 V_g = 0,307 \frac{HD^4}{v l}, \quad (1)$$

где d_g – диаметр волокна, V_g – скорость вытяжки волокна, v – кинематическая вязкость, l , D – длина и диаметр цилиндрической фильеры, H – гидродинамический напор на входе фильеры.

Как видно из соотношения (1), на технологические режимы формирования БНВ из свойств расплава базальта влияет только его вязкость. Таким образом, возникает необходимость по-

строения модели для расчета и прогнозирования вязкости расплава базальта.

В работе [1] разработана обобщенная модель расчета и прогнозирования вязкости магматических расплавов. Теоретическими основами модели являются, с одной стороны, кинетическая теория жидкостей Я. И. Френкеля, с другой – теоретический анализ взаимосвязи строения магматических расплавов с их составом, осуществленный с целью обоснованного выбора структурно-химической характеристики расплавов. Сущность данной модели сводится к следующему. Аналитическая взаимосвязь между вязкостью, химическим составом, структурой расплава, температурой и давлением выражается уравнением

$$\lg \eta = \lg \eta_0 + E/4,57 - \alpha (P_{обц} - P_{H_2O}), \quad (2)$$

где предэкспоненциальная константа $\lg \eta_0 = -3,5 \pm 0,1$; T – температура, К; α – среднэрифметическое значение пьезокоэффициента вязкости для «сухих» базальтовых расплавов ($\alpha = 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ МПа}^{-1}$) и для водосодержащих ($\alpha = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ МПа}^{-1}$); $P_{обц}$ – литостатическое давление нагрузки перекрывающихся пород; P_{H_2O} – давление воды, Па; E – энергия активации вязкого течения (в кал/моль) является функцией состава и, соответственно, строения расплава. Это принципиально важно, так как энергия активации – независимый от температуры параметр расплава, и, являясь энергетической характеристикой сопротивления движущейся при сдвиге структурной единицы, она самым непосредственным образом отражает структурное состояние расплава и его состава. Сопоставление непосредственно вязкостей (а не энергий активации) расплавов имеет физико-химический смысл только в очень узких диапазонах составов близликвидусных магматических систем.

Взаимосвязь вязкости с составом и структурой расплава выражается через наиболее чувствительный структурно-химический параметр расплава – степень его деполимеризации:

$$K = \frac{O^-}{O^0}, \quad (3)$$

где O^0 – мостиковый ($\equiv Si-O-Si \equiv$) атом кислорода, O^- – немостиковый ($\equiv Si-O-Me \equiv$) ион кислорода. Именно эта характеристика, именуемая в дальнейшем структурным параметром, используется в данной модели расчета вязкости магматических расплавов; структурный параметр рассчитывается по химическому составу породы.

Сопоставление обобщенных зависимостей экспериментальных данных энергии активации [4] $E=f(K)$ от структурного параметра алюмоси-

ликатных и магматических расплавов позволяет получить уравнение функциональной зависимости $E=f(K)$:

$$E=27000\exp(0,058K)-47K+42220 \text{ кал/ моль. (4)}$$

Таким образом, из совместного решения данного уравнения с уравнением (2) установлено обобщенное уравнение концентрационной, температурной и барической зависимостей вязкости магматических расплавов в виде:

$$\lg \eta = \frac{27000 \exp(0,058K) - 47K + 42220}{4,576T - 3,5 + \alpha(P_{\text{общ}} - P_{H_2O})} \quad (5)$$

Результаты и обсуждения

Перспективным месторождением из нерудных горных пород магматического происхождения, пригодным для выпуска базальтового непрерывного волокна, является Васильевское месторождение, расположенное на территории Республики Саха (Якутия). Для определения технологических параметров формирования БНВ в силу вышеизложенной методики (1)–(5) необходимо рассчитать структурный параметр K (3) из химического состава базальта Васильевского месторождения, выраженного в мас.% окислов, по методике работы [1]; данные для расчета приведены в таблице.

Согласно Дж. Каррону, степень деполимеризации расплава (3) выражается следующим образом:

$$K = \frac{2(O - 2H)}{H} \cdot 100, \quad (6)$$

где H – суммарное количество грамм-ионов сеткообразователей (Si^{4+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , P^{5+}), находящихся в тетраэдрической координации по кислороду и входящих в анионную часть структу-

ры расплава; O – суммарное число грамм-ионов кислорода в расплаве; число грамм-ионов катионов сеткообразователей и модификаторов, а также число грамм-ионов кислорода, вносимых в расплав с 1 мас.% соответствующего окисла, является величиной, обратной молекулярному весу окисла с учетом стехиометрических коэффициентов, например: $Si^{4+}=10^3/M_{SiO_2}=16,65$; $Al^{3+}=2/M_{Al_2O_3}=19,63$ и т.д.; множитель 10^3 введен для упрощения расчетов.

Таким образом, используя данные таблицы и согласно выражению (6), получено значение $K=24,6$. Действительно, как показывает обзор литературы, значение K соответствует базальту по [1,4].

По значению структурного параметра расплава получается, что энергия активации вязкого течения расплава базальта в уравнении (4) $E=47,55$ ккал/ моль; с учетом того, что исследуемый базальт находился на поверхности земной коры, литостатического давления мало, и расплав почти не содержит воду – $P_{\text{общ}}=0$, $P_{H_2O}=0$, теоретическая вязкость (5) получается в виде температурной зависимости:

$$\lg \eta = 10390,3/T - 3,5. \quad (7)$$

Следует отметить, что полученная теоретическая вязкость (7) адекватно описывает экспериментальную вязкость в зоне ликвидуса, т.е. выше температуры верхнего предела кристаллизации. Действительно, на рис. 1 приведены экспериментальные данные вязкости базальта Васильевского месторождения Республики Саха (Якутия) и его теоретическая зависимость, рассчитанная по формуле (7). Как видно из графиков, модель расчета вязкости магматических

Данные для расчета структурного параметра базальтового расплава Васильевского месторождения РС(Я)

Состав		Число грамм-ионов сеткообразователей $\cdot 10^3$		Число грамм-ионов кислорода	
Окислы	мас.%	в 1 мас.%	в расплаве	в 1 мас.% $\cdot 10^3$	в расплаве
SiO ₂	53,45	16,65	889,94	33,3	1779,89
TiO ₂	2,03	19,63	226,73	25,03	340,02
Al ₂ O ₃	11,55	-	-	29,44	281,06
Fe ₂ O ₃	14,95	12,53	187,32	18,8	50,81
CaO	6,88	-	-	17,83	122,67
MgO	4,63	-	-	24,81	114,87
Na ₂ O	3,53	-	-	16,13	15,39
K ₂ O	1,45	-	-	10,62	56,94
Li ₂ O	0,20	-	-	33,45	6,69
			H=1303,99	O=2768,36	

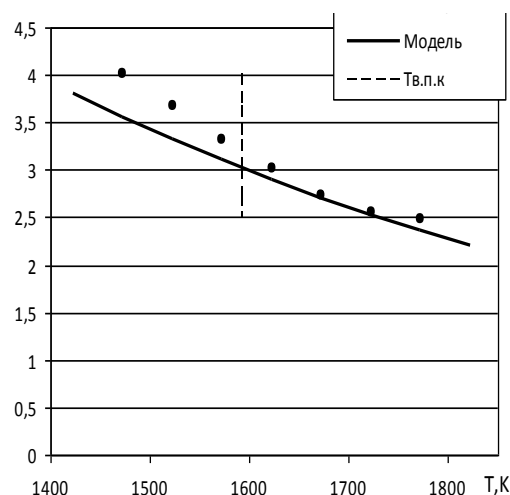


Рис.1. Экспериментальная и теоретическая вязкость расплава базальтового сырья Васильевского месторождения РС(Я); температура верхнего предела кристаллизации – Тв.п.к.=1592 К

расплавов в температурном интервале 1592–1772 К удовлетворительно описывает экспериментальные данные базальтового расплава, погрешность не превышает ~10%.

Определив вышеизложенным методом вязкость расплава базальта, можно рассчитать основные технологические параметры формования БНВ по формуле (1) для формования на промышленной установке разработки НПК «Терм» ОАО «СТЕКЛОПЛАСТИК». При этом конструктивными параметрами плавильной установки являются: диаметр фильеры $D=1,65$ мм; высота фильеры $l=4,7$ мм; температура в печи 1430–1450°C; скорость вытяжки волокна $V_g \approx 30–60$ м/с.

При расчетах следует учитывать отношение вязкости расплава базальта к диаметру фильеры, определяющее стабильность и непрерывность процесса волокнообразования [5]

$$5 < \frac{\eta}{D^2} < 25, \quad (8)$$

где η – динамическая вязкость, Па·с; D – диаметр фильеры, мм. Таким образом, соотношение (8) с учетом температурной зависимости вязкости (7) приводит к температурному диапазону вязкости расплава от 1370 до 1570°C. С учетом температуры в печи получается, что необходимо обеспечить температуру формования БНВ от 1370 до 1450 °С, вязкость при этом 36–72 Па·с.

При создании технологий получения непрерывных волокон для каждого диаметра волокна выбирают значение дебета фильеры, т.е. количество вытекающей из фильеры в единицу времени $\theta = 0,241 \frac{HD^4}{vl}$, м³/с в основной формуле (1), тогда диаметр волокна будет определяться скоростью вытягивания.

Таким образом, используя формулу (1), для формования непрерывного базальтового волокна из сырья месторождения Республики Саха (Якутия) с требуемым диаметром от 9 до 13 мкм при задаваемой технологической скорости вытяжки 30 м/с установки разработки НПК «Терм» ОАО «СТЕКЛОПЛАСТИК» при температуре расплава 1370–1450°C, необходимо поддерживать гидростатическое давление $H=0,14$ м (рис. 2).

Выводы

1. Для расчета вязкости расплава базальта использована теоретическая модель, построенная на основе анализа обобщенных реологических закономерностей силикатных и алюмосиликатных расплавов во взаимосвязи с их структурой.

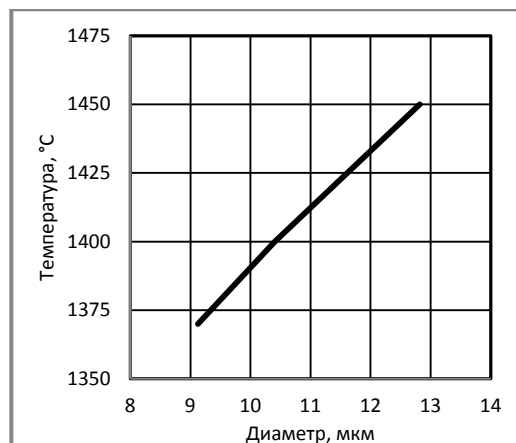


Рис.2. Зависимость диаметра волокна от температуры расплава

Результаты расчетов удовлетворительно описывают экспериментальные данные вязкости расплава базальта Васильевского месторождения РС(Я).

2. Определены реологические характеристики вязкости, энергии активации и структурный параметр базальтового расплава. Выявлено, что структурно-химический параметр расплава базальта Васильевского месторождения РС(Я) отражает их химический состав степенью деполимеризации.

3. Установлено, что основными параметрами, определяющими диаметр вытягиваемого волокна, являются вязкость базальтомассы, гидростатическое давление, диаметр и длина фильеры. При установившемся расходе базальтомассы диаметр волокна определяется скоростью вытягивания.

4. Определены основные технологические параметры формования непрерывного базальтового волокна из сырья месторождения Республики Саха (Якутия) на промышленной установке разработки НПК «Терм» ОАО «СТЕКЛОПЛАСТИК». Для формования непрерывного базальтового волокна из сырья месторождения Республики Саха (Якутия) с требуемым диаметром от 9 до 13 мкм при задаваемой технологической скорости вытяжки 30 м/с необходимо обеспечить температуру расплава 1370–1450°C и гидростатическое давление $H=0,14$ м.

Литература

1. Персиков Э.С. Вязкость магматических расплавов. – М.: Наука, 1984. – 160 с.
2. Смирнов Л.Н., Кошелев В.Ю. Механика формования непрерывных базальтовых волокон при фильерном способе их получения. – М.: Информконверсия, 2000 (Научная библиотека журнала «Конверсия в машиностроении», вып. 3, приложение к журналу № 2, 2000). – 24 с.

3. *Стекланные волокна* / М.С. Асланова, Ю.И. Колесов, В.Е. Хазанов и др. / Под ред. Аслановой. – М.: Химия, 1979. – 256 с.

4. Персиков Э.С., Эпельбаум М.Б. Экспериментальное исследование вязкости системы гранит+H₂O+HCl при давлениях флюида до 4 кбар // X Всесоюз. совещ. По экспериментальной и технической

минералогии и петрографии. – Киев.: Наукова думка, 1981. – С. 249–254.

5. Патент РФ RU2102342C1, МКИ 6С03В37/00. Способ изготовления непрерывного волокна из расплава базальтовых горных пород / В.И. Трефилов (UA), В.П. Сергеев (UA), М.Ф. Махова (UA). 8с.: илл.

Поступила в редакцию 10.01.2014

УДК 669.15: 621.777: 620.186

Роль наноструктурирования в повышении механических свойств низколегированных сталей

С.П. Яковлева, С.Н. Махарова

Исследованы изменения микростроения и природа прочности низколегированной стали после объемного наноструктурирования с применением режимов «теплого» (при 300 ...500 °С) и «холодного» (при комнатной температуре) равноканального углового прессования (РКУП), обеспечивших технически значимое улучшение комплекса механических свойств материала. Впервые обоснован и подтвержден эффект формирования наномасштабных структурных элементов в ферритно-перлитной стали при рекристаллизации после холодного РКУП. С позиций кинетической концепции разрушения проведен анализ особенностей накопления повреждений и процессов трещинообразования в наноструктурированном металле при статическом и динамическом нагружении; получены приоритетные данные в выявлении роли наносубмикронных элементов структуры как факторов высокопрочного состояния металлических материалов. Установлено, что измельчение структурных составляющих стали создает условия для деформационно-стимулированной самоорганизации структуры при последующем нагружении, в результате которой локализация деформации происходит на более поздних стадиях по сравнению с материалом в крупнозернистом состоянии. Определяющими факторами при разрушении являются множественный характер зарождения начальных несплошностей и смена базового микромеханизма разрушения квазисколом на более энергоемкие микромеханизмы разрушения – вязкий ямочный отрыв и дисперсный квазискол.

Ключевые слова: низколегированная сталь, наноструктурирование, равноканальное угловое прессование, механические свойства, деформация, разрушение.

Microstructural changes and the nature of strength of a low alloy steel were investigated after volume nanostructuring using the conditions of «warm» (at 300°C ... 500°C) and «cold» (at room temperature) equal channel angular pressing (ECAP), which provided a technically significant improvement of the material's mechanical properties. For the first time the effect of nanoscale structural elements formation in the ferritic-pearlitic steel during recrystallization after cold ECAP was substantiated and confirmed. From positions of the kinetic concept of fracture the analysis of damage accumulation features and crack formation processes in nanostructured metal under static and dynamic loading was conducted. The priority data was obtained in identifying the role of nano-submicron structure elements as factors of high strength state of metallic materials. It was established that the refinement of structural components of steel enables for strain-induced self-organization of structure during subsequent loading, as a result the localization of deformation occurs at the later stages compared to a material in the coarse-grained state. The determining factors in the fracture process are the multiple character of initial discontinuities' nucleation and a change of the base micromechanism of fracture by quasi-cleavage to more energy-intensive micromechanisms of fracture – ductile dimple fracture and dispersive quasi-cleavage.

Key words: low-alloy steel, nanostructuring, equal channel angular pressing, mechanical properties, deformation, failure.

ЯКОВЛЕВА Софья Петровна – д.т.н., проф., зав. отд. ИФТПС СО РАН, spyakovleva@yandex.ru; МАХАРОВА Сусанна Николаевна – к.т.н., в.н.с. ИФТПС СО РАН, snmachar@yandex.ru.