
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Металлургия и материаловедение

УДК 621.791.794

Повышение прочности сварных соединений из низколегированной стали ультразвуковой ударной обработкой

М.М. Сидоров, Н.И. Голиков

Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск

Исследовано влияние ультразвуковой ударной обработки на перераспределение остаточных сварочных напряжений, структуру и ударную вязкость сварного соединения из низколегированной стали 10ХСНД. Результаты анализа отказов карьерной техники показывают, что чаще всего инициаторами их разрушений служат сварные соединения. В связи с этим одним из путей решения данной проблемы является применение методов их упрочнения. Описаны методики исследований и технология ультразвуковой ударной обработки сварных соединений низколегированной стали. Приведены результаты исследований влияния ультразвуковой ударной обработки на перераспределение остаточных напряжений в сварных соединениях. Показаны результаты ударных испытаний при комнатной и отрицательных температурах исходных и подвергнутых обработке образцов с надрезами в металле шва и зоне сплавления. Представлены результаты изменений микроструктуры поверхностного слоя зон сварного соединения вследствие ультразвуковой ударной обработки. Установлено, что ультразвуковая ударная обработка сварных соединений из низколегированной стали 10ХСНД приводит к перераспределению растягивающих остаточных напряжений на сжимающие. Выявлено, что применение технологии ударного инструмента улучшает структурные свойства обрабатываемой поверхности и положительно влияет на ударную вязкость сварного соединения при отрицательных температурах.

Ключевые слова: ультразвуковая ударная обработка, остаточные сварочные напряжения, сварные соединения, ударная вязкость, низколегированные стали.

Increasing the Strength of Welded Joints of Low Alloy Steel by Ultrasonic Shock Processing

M.M. Sidorov, N.I. Golikov

Institute of Physical-Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk

The article investigates the effect of ultrasonic shock processing on the redistribution of residual welding stresses, the structure and the toughness of welded joints of low-alloy steel 10HSND. The results of the analysis of failures of mining equipment show that the more often the initiators of their destruction are welded joints. In this regard, one way of solving this problem is to use methods of hardening. The paper describes the methodology of research and technology of ultrasonic shock processing of welded joints of low-alloy steel. The results of studies of the effect of ultrasonic shock processing on the redistribution of residual stresses in welded joints are presented. The results of impact tests at room and negative temperature on original and treated notched specimens in the weld metal and fusion zone are shown. The results of changes of a surface layer microstructure of the weld joint areas as a result of ultrasonic shock processing are presented. It was found that the ultrasonic shock processing of welded joints of low-alloy steel 10HSND leads to a redistribu-

СИДОРОВ Михаил Михайлович – к.т.н., м.н.с., sidorovmm@bk.ru; ГОЛИКОВ Николай Иннокентьевич – к.т.н., в.н.с., n.i.golikov@mail.ru.

tion of tensile residual stresses into compressive ones. It has been established that the use of impact tool technology improves the structural properties of the work surface and a have a positive effect on the toughness of the welded joint at negative temperatures.

Key words: ultrasonic shock processing, residual welding pressure, weld joints, impact strength, low-alloy steel.

Введение

Результаты многолетних исследований сотрудников ИФТПС СО РАН [1–5] показывают, что основными причинами, снижающими работоспособность техники при эксплуатации в условиях Севера, являются отказы механических частей машин, где очаги разрушения – сварные соединения. Анализ работы автохозяйств в зоне холодного климата показал, что срок службы автомобилей по сравнению с европейской частью России сокращается в 2 раза, а аварии и поломки, связанные с климатическими условиями, выводят из строя до 25 % парка машин. Поток отказов (по сравнению с летним периодом) деталей тракторов и бульдозеров увеличивается в зимнее время в 2–6 раз, деталей экскаваторов – в 5–7 раз, что свидетельствует о недостаточной хладостойкости и работоспособности их сварных соединений. В связи с этим изыскание средств и способов повышения срока службы техники при эксплуатации в условиях низких климатических температур является актуальной научно-технической задачей.

Один из перспективных способов повышения прочности и ресурса сварных соединений – ультразвуковая ударная обработка (УУО). Ряд научных трудов [6–10] и проведенные нами исследования [11–13] показывают эффективность применения технологии УУО для конструкционных, теплоустойчивых, мостовых и высокопрочных коррозионно-стойких марок сталей.

В настоящей работе исследовано влияние УУО на перераспределение остаточных сварочных напряжений (ОСН), структуру и ударную вязкость сварного соединения из низколегированной стали 10ХСНД.

Данная сталь применяется в различных деталях, к которым предъявляются требования повышенной прочности и коррозионной стойкости с ограничением массы и работающие при температуре от -70 до 450 °С, также относится к разряду хорошо свариваемых. Однако проведенный анализ отказов деталей техники [4], изготавливаемых из низколегированной высокопрочной стали 10ХСНД, показывает, что многоцикловые повреждения рам большегрузных карьерных автосамосвалов имеют усталостный характер с последующим хрупким развитием трещин из-за снижения вязкости (пластичности) стального проката в процессе эксплуатации. Причинами их отказов является трещина, образующаяся, как правило, в зоне сварного соединения в области конструктивных или технологических

концентраторов, а также в местах перехода с более жесткого узла в менее жесткий.

Материалы и методы исследования

Для исследований из пластин размерами $400 \times 100 \times 10$ мм были изготовлены сварные пробы. Сварка проб проводилась ручной дуговой сваркой в три слоя – корневой, заполняющий и облицовочный, электродами марки УОНИ 13/55, при этом осуществлено их жесткое закрепление во избежание послесварочных деформаций. Разделка кромок односторонняя, коническая с углом 30° , выполненная по ГОСТ 5264-80.

УУО осуществляли с применением технологического комплекса, состоящего из ультразвукового генератора УЗГТ 0.5/27 и оснастки типа «Шмель», разработанного в ФГБУН Институте физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск). В данной технологии реализован способ передачи и трансформации энергии ультразвука обрабатываемому изделию посредством перемещающихся вдоль оси колебательной системы стержневых ударных элементов (инденторов) с малой (относительно несущей частоты стохастического ударного импульса) волновой длиной. При таком виде обработки на поверхности остаются следы от игл ударного инструмента в виде круга диаметром 1–2 мм и образовывается тонкий слой наклепа.

Обработку проводили со стороны облицовочного слоя шва шириной до 40 мм. Инструмент перемещали вдоль шва с захватом механизированным способом. Частота колебаний инструмента составляла 26 кГц, амплитуда торца волновода 20 мкм, мощность, подводимая к преобразователю, 420 Вт, скорость перемещения инструмента не превышала 0,5 м/мин.

Анализ распределений и перераспределений остаточных напряжений в сварных соединениях до и после УУО проводили с помощью портативного рентгеновского определителя напряжений, действие которого основано на измерении межплоскостных расстояний в кристаллической решетке, определенных по относительному смещению дифракционных максимумов [14]. Напряжения измеряли в поперечном (σ_y) и продольном (σ_x) направлениях относительно оси шва пластины в точках, расположенных на различном расстоянии от центра шва.

Перед измерением ОСН производится подготовка поверхности участка контроля, которая состоит из следующих этапов:

- шлифовка мелкой наждачной бумагой участка вокруг выбранной точки рентгеносъемки от краски и окалины;

- снятие усиления металла шва длиной около 40–50 мм для обеспечения плотного соприкосновения коллимационного устройства прибора с поверхностью измеряемого участка;

- химическое травление поверхности выбранного участка съемки смесью азотной и соляной кислоты на глубину в пределах около 100 мкм. Затем травленный участок обильно промывается водой и обрабатывается спиртом.

Измерив начальные значения ОСН (до обработки), производили УУО. Далее для определения напряжений после обработки исследуемую поверхность заново зачищали для снятия следов ударного инструмента механическим шлифованием, затем производили химическое травление.

Для определения ударной вязкости сварного соединения из пробы были изготовлены образцы на ударный изгиб при температурах испытаний +20, –40 и –60 °С с U-образными концентраторами напряжений в области металла шва (МШ) и зоне сплавления (ЗС). Надрезы в МШ и ЗС выполнены по ГОСТ 6996-66. Перед нанесением надрезов на станке Blackcharpy образцы подвергались химическому травлению с целью установления местоположения границ шва и ЗС. Испытание проводили на инструментированном маятниковом копре Amsler RKP-450. Охлаждение образцов производили с помощью термостата Lauda.

Анализ микроструктуры основного металла и зон сварного соединения проведен с помощью металлографического микроскопа «Metam РВ-21». Подготовку шлифов для металлографического анализа выполняли по стандартной методике.

Ниже в табл. 1 и 2 приведены результаты спектрального анализа стали 10ХСНД и механические характеристики стали, полученные на установках Центра коллективного пользования «Станция низкотемпературных натуральных испытаний» ИФТПС СО РАН.

Т а б л и ц а 1

Результаты спектрального анализа стали

Содержание химических элементов, %									
C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Cu	Al	Fe
0,12	0,89	0,73	0,97	0,66	0,012	0,005	0,036	0,026	Ост.

Т а б л и ц а 2

Результаты механических испытаний на растяжение

Материал	Средние значения механических характеристик		
	Временное сопротивление $\sigma_{в}$, МПа	Предел текучести $\sigma_{т}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
Основной металл 10ХСНД	575	406	28,7

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены результаты измерений значений напряжений поперечных (σ_y) и продольных (σ_x) остаточных напряжений с облицовочной стороны пластины на удалении y от центра шва. Как видно из графика, в зоне МШ и околошовной зоне (ОШЗ) значения σ_y и σ_x достигают 200 МПа. При дальнейшем удалении от ОШЗ значения напряжений снижаются, при этом сохраняется положительный знак значений (рис. 1, а). Таким образом со стороны облицовочного слоя шва после сварки наблюдается формирование растягивающих напряжений.

После проведения УУО со стороны облицовочного слоя шва отмечается полная смена знака напряжений, максимальное значение σ_y достигает –260 МПа; σ_x – –340 МПа. Средняя величина абсолютного перераспределения ($\Delta\sigma_{ср}$) для σ_y составила 316 МПа, для σ_x – 455 МПа (рис. 1, б). Таким образом, после УУО наблюдается полная трансформация напряжений с растягивающих на сжимающие. Перераспределение остаточных сварочных напряжений с растягивающих на сжимающие при ультразвуковой ударной обработке в целом может положительно влиять на усталостную прочность и циклическую долговечность сварного соединения.

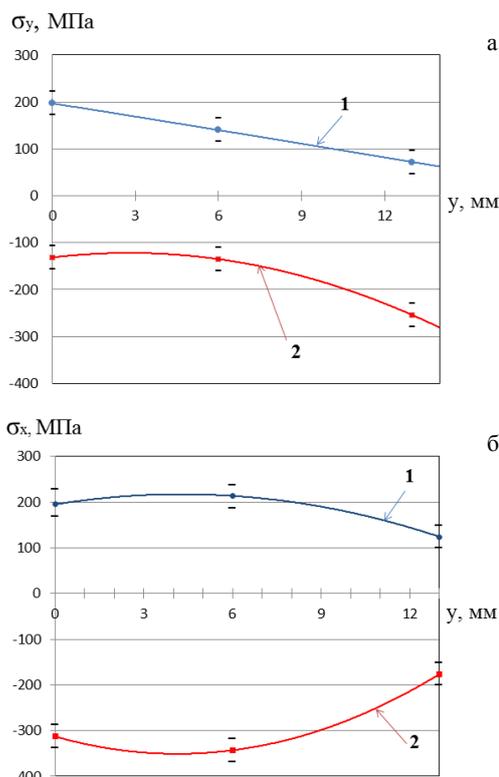


Рис. 1. Перераспределение остаточных напряжений в поперечном (а) и продольном (б) направлениях относительно оси сварного соединения из стали 10ХСНД в точках, расположенных на различном расстоянии y от центра шва ($y = 0$ мм): 1 – до УУО; 2 – после УУО

Результаты ударных испытаний образцов, изготовленных из сварных проб из стали 10ХСНД, толщиной 10 мм исходных и подвергнутых УУО, приведены на рис. 2 и 3.

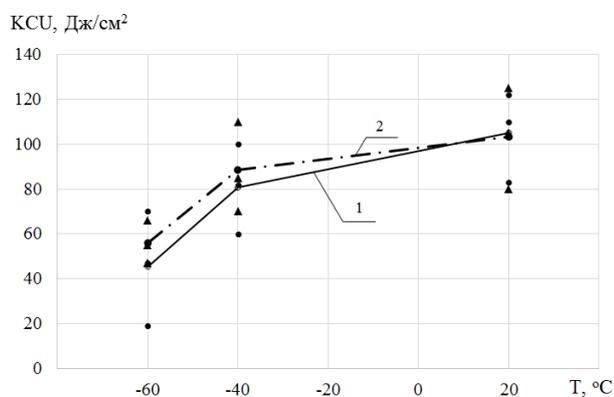


Рис. 2. Зависимость ударной вязкости образцов с надрезом в МШ от температуры: 1 – исходная; 2 – после УУО

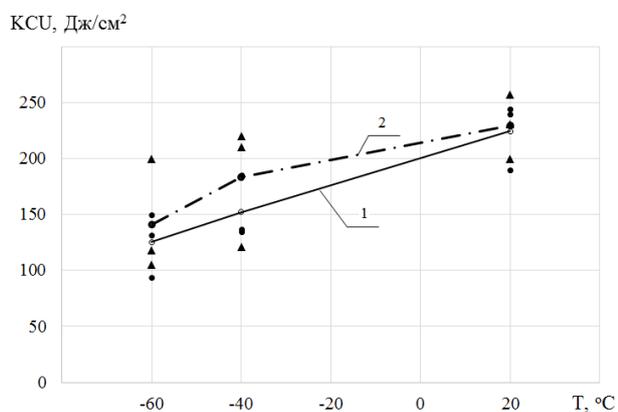


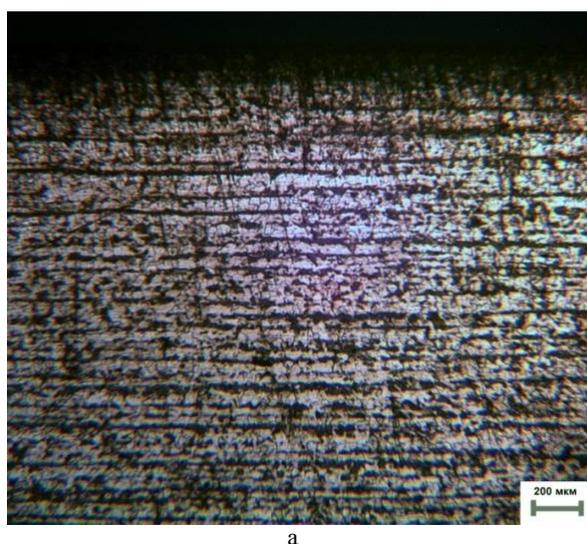
Рис. 3. Зависимость ударной вязкости образцов с надрезом в ЗС от температуры: 1 – исходная; 2 – после УУО

Испытания показали, что после УУО ударная вязкость в МШ при отрицательных температурах в среднем увеличилась по сравнению с исходным состоянием на 9 Дж/см², что составляет 14 %, а в ЗС в среднем – соответственно 24 Дж/см² и 17 %. При комнатных температурах УУО не привела к изменению средних значений ударной вязкости.

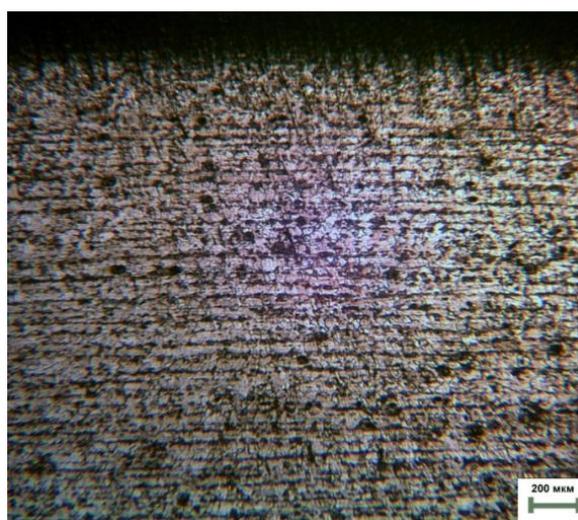
В результате металлографических исследований установлено, что микроструктура основного металла представляет собой ферритно-перлитную структуру с величиной зерна 10 баллов по шкале ГОСТ 5639-82, что соответствует среднему размеру зерна ≈ 12 мкм (рис. 4, а). Наблюдается равномерное чередование ферритных и перлитных полос, состоящих из равноосных зерен. В результате УУО происходит диспергирование структуры поверхностного слоя металла толщиной до 1,0 мм за счет измельчения зерен феррита и перлита (рис. 4, б).

Микроструктура металла шва облицовочного слоя имеет выраженные столбчатые образования в виде ферритных оторочек (рис. 5, а). После УУО на поверхностном слое виден упрочняющий «белый слой» толщиной до 1,0 мм по зонам сварного соединения, где наблюдается небольшое размытие в виде плавного перехода между металлом шва и зоной термического влияния (рис. 5, б).

В результате действия ударных волн на поверхности образуется непрерывный ряд твердых растворов, что приводит к зернограничному упрочнению за счет измельчения зерен в виде «белого слоя». Образовавшийся «белый слой» в результате воздействия УУО, характеризующийся благоприятным сочетанием остаточных



а



б

Рис. 4. Микроструктура основного металла: исходное (а), после УУО (б)

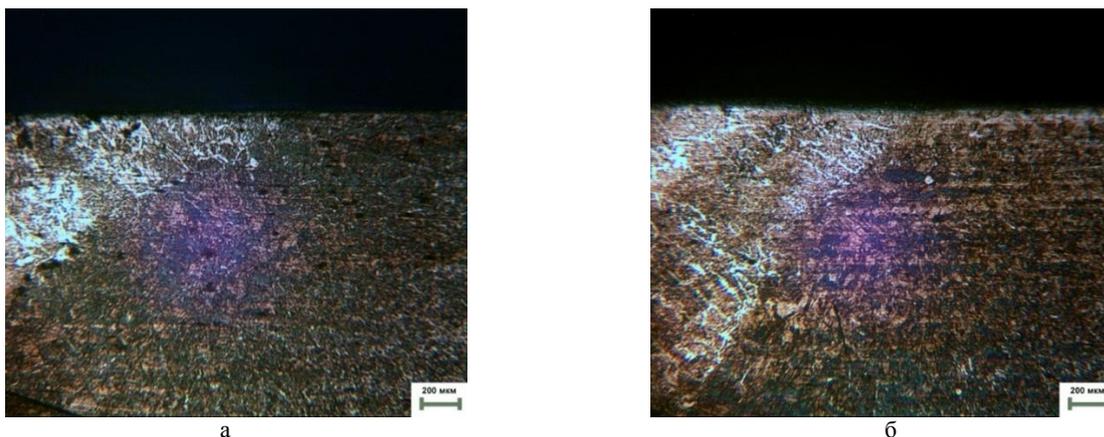


Рис. 5. Микроструктура металла шва и зоны термического влияния: исходное (а), после УУО (б)

макронапряжений и структуры, наиболее эффективно повышает трещиностойкость стали и является весьма перспективным способом повышения стойкости стальных деталей к коррозионному растрескиванию, что в свою очередь замедляет рост трещин, соответственно, увеличивает ударную вязкость металла.

Выводы

1. Установлено, что ультразвуковая ударная обработка с облицовочной стороны стыкового шва способствует перераспределению продольных и поперечных остаточных сварочных напряжений с растягивающих на сжимающие, при этом на обработанной поверхности средняя величина абсолютного перераспределения составляет 316 МПа для поперечных и 455 МПа для продольных напряжений. Наведение сжимающих остаточных напряжений при ультразвуковой ударной обработке может способствовать повышению циклической долговечности сварных соединений машин.

2. Выявлен положительный эффект ультразвуковой ударной обработки для сварного соединения из стали 10ХСНД в диапазоне отрицательных температур: по сравнению с исходным ударная вязкость металла шва в среднем увеличилась на 14 %, а в зоне сплавления – на 17 %.

3. Ультразвуковая ударная обработка сварных соединений из стали 10ХСНД способствует упрочнению обрабатываемой поверхности и формированию в поверхностных слоях зон шва значительных сжимающих напряжений за счет диспергирования твердых растворов в структуре металла с одновременным увеличением ударной вязкости.

Литература

1. Ларионов В.П. Электродуговая сварка конструкций. Новосибирск: Наука, 1986. 252 с.

2. Аммосов А.П. Термодеформационные процессы и разрушение сварных соединений. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1988. 136 с.

3. Ларионов В.П., Кузьмин В.Р., Слепцов О.И. и др. Хладостойкость материалов и элементов конструкций: Результаты и перспективы. Новосибирск: Наука, 2005. 290 с.

4. Слепцов О.И., Шульгинов Б.С., Михайлов В.Е. и др. Повышение прочности сварных металлоконструкций горнодобывающей и транспортной техники в условиях Севера. Новосибирск: Наука, 2012. 183 с.

5. Солнцев Ю.П., Титова Т.И. Стали для Севера и Сибири. СПб.: Химиздат, 2002. 352 с.

6. Нехорошков О.Н., Першин В.П., Семухин Б.С. Применение метода ультразвуковой ударной обработки для сварных соединений конструкционных сталей // Вестник ТГАСУ. 2006. № 2. С.120–125.

7. Безбородов В.П., Клименов В.А., Плешанов В.С. и др. Влияние ультразвуковой ударной обработки на структуру и свойства сварных соединений теплостойкости стали 12Х1МФ // Сварочное производство. 2000. № 7. С. 17–21.

8. Кузнецов П.В., Панин В.Е., Петракова И.В., Батурин А.А. Влияние ударной ультразвуковой обработки на распределение усталостных повреждений в области сварного шва // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. №4. С. 46–52.

9. Статников Е.Ш., Муктепавел В.О. Технология ультразвуковой ударной обработки как средство повышенной надежности и долговечности сварных металлоконструкций // Сварочное производство. 2003. №4. С. 25–29.

10. Шестаков С.Д. Ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование для упрочнения и пассивации наклепом: теория, технологические процессы и оборудование // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 7. С.3–15.

11. Голиков Н.И., Сидоров М.М. Перераспределение остаточных сварочных напряжений при ультразвуковой ударной обработке сварных соединений стыков труб // Сварочное производство. 2011. № 5. С. 3–6.

12. Голиков Н.И., Сидоров М.М. Влияние ультразвуковой ударной обработки на ударную вязкость сварных соединений труб, изготовленных из сталей 09Г2С и 13Г1С-У// Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 7. С. 3–5.

13. Голиков Н.И., Сидоров М.М. Исследование перераспределений остаточных напряжений при циклическом нагружении сварных соединений // Сварочное производство. 2013. № 12. С. 18–20.

14. Голиков Н.И., Аммосов А.П. Прочность сварных соединений резервуаров и трубопроводов, эксплуатирующихся в условиях Севера. Якутск: Изд. дом СВФУ, 2012. 232 с.

Поступила в редакцию 10.02.2016

УДК 669.041:536.24

Гидромеханика и технологические характеристики формирования базальтовых непрерывных волокон при фильерном способе их получения

А.А. Гаврильева, Г.Г. Винокуров, А.К. Кычкин
Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск

Для получения волокон с уникальными свойствами с целью последующего изготовления на их основе композиционных материалов наиболее приемлемым сырьем являются базальты – высокостабильные по химическому и минералогическому составу экструзивные горные породы магматического происхождения, запасы которых в мире практически неисчерпаемы, в том числе и запасы месторождения Республики Саха (Якутия). Получают базальтовые волокна при одностадийном технологическом процессе из однокомпонентного дешевого сырья – формование волокна производится из вязкого потока расплава базальта, вытекающего из фильеры. В настоящее время в производстве ООО «ТБМ» (г. Якутск) используют канал фильеры, который имеет вид цилиндра и для него ранее авторами были определены технологические характеристики формования базальтовых непрерывных волокон. В данной статье предлагается альтернативная геометрия канала фильеры для получения базальтового непрерывного волокна, которая состоит из усеченного конуса (конфузора) и цилиндра. Показано, что предлагаемая конструкция фильеры стабилизирует истечение расплава базальта, что повышает скорость вытяжки за счет улучшения физико-механических свойств получаемого волокна по сравнению с каналом постоянного сечения. Описана гидромеханика формования базальтовых непрерывных волокон на стадии истечения вязкого расплава через канал фильеры. А именно, получены аналитические формулы для инженерных расчетов распределения скорости потока и давления по каналу фильеры при малых углах конфузурности и малых числах Рейнольдса. На основе полученных зависимостей определен объемный расход расплава базальта через канал фильеры. Результаты исследований могут использоваться для выбора и оптимизации технологических режимов получения непрерывных базальтовых волокон из сырья месторождения Республики Саха (Якутия) на промышленной установке разработки НПК «Терм» ОАО «Стеклопластик».

Ключевые слова: базальтовое непрерывное волокно, фильера, расплав, вязкость, гидромеханика.

Hydromechanics and Technical Characteristics of Formation of Continuous Basalt Fibres by Spinneret Method

A.A. Gavrilieva, G.G. Vinokurov, A.K. Kychkin

Institute of Physical-Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk

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