

УДК 621.924

Барсуков Геннадий Валерьевич

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»
Россия, Орел
Заведующий кафедрой
Доктор технических наук, доцент
E-Mail: awj@list.ru

Михеев Александр Васильевич

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»
Россия, Орел
Научный сотрудник, докторант
Кандидат технических наук
E-Mail: pr_uchastok@mail.ru

Журавлева Татьяна Александровна

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»
Россия, Орел
Аспирант
E-Mail: awj@list.ru

**Моделирование напряженного состояния
слоистого материала под действием сверхзвуковой
гидроабразивной струи**

Аннотация. В настоящее время производство слоистых материалов является одной из наиболее развивающихся отраслей промышленности. К числу перспективных процессов разделения таких материалов следует отнести гидроабразивное резание (ГАР). Основной проблемой обработки слоистых материалов методом ГАР является возникновение расслоений в местах прошивки материала. Однако имеющиеся практические рекомендации направлены в основном на обеспечение самого процесса разделения материала и не всегда учитывают строение раскраиваемого материала, что и приводит к потере качества обработки слоистых материалов. Для прогнозирования расслоения стеклопластика на операции ГАР авторами статьи проведено моделирование напряженно-деформированного состояния материала под действием гидроабразивной струи. Мы исходили из того, что если создаваемые напряжения по толщине проникания больше предела прочности клеевого соединения, то в этом месте будет происходить расслоение. Стохастические факторы, влияющие на прочность склейки, не учитывались. Установлено, что в момент врезания в слоистый материал именно касательные напряжения достигают максимальных значений и разрушают клеевое соединение между слоями путем сдвига. В соответствии с этим при назначении режимов резания стеклопластиков гидроабразивной струей с учетом возможного расслоения, на первом плане выступают создаваемые касательные напряжения, которые должны быть меньше предельных значений для применяемого материала.

Ключевые слова: сверхзвуковое взаимодействие; разрушение; проникание; индентор; гидроабразивное резание; объемный унос; частица; моделирование; преграда; сверхзвуковая скорость.

В настоящее время производство слоистых материалов является одной из наиболее развивающихся отраслей промышленности. Изделия из слоистых материалов потребляются во многих отраслях промышленности, и в первую очередь, в машиностроении, авиастроении и электротехнической промышленности, что позволяет заменить и сэкономить большое количество черных и цветных металлов.

Бурный рост производства полимерных материалов, в частности, листовых слоистых стеклопластиков, обусловленный расширением номенклатуры и областей их применения, вызывает повышенный интерес к вопросам теории и практики обработки листовых стеклопластиков резанием, так как получение изделий из листовых стеклопластиков не обходится без применения операций механической обработки.

Механическая обработка таких материалов связана с рядом трудностей и недостатков. Эти трудности заключаются в быстром затуплении режущего инструмента, большом шуме и запыленности рабочего места и объясняются, в основном, особенностями физико-механических свойств, строения и структуры стеклопластиков, высокими абразивными качествами наполнителя слоистых материалов, их высокой механической анизотропией и неоднородностью составных частей. Интенсивное затупление режущей части инструмента связано с большим количеством переточек и быстрым выходом инструмента из строя, что ведет к большому расходу инструмента на единицу длины обрабатываемого материала, усложняет общую технологию процесса.

При исследованиях процесса механической обработки стеклопластиков основное внимание уделяется вопросу стойкости режущего инструмента, так как все остальные факторы механической обработки являются производными от нее.

Основными путями повышения стойкости инструмента является изыскание и создание новых материалов для изготовления режущего инструмента, поиск оптимальной геометрии заточки инструмента и оптимальных режимов резания, применение различных методов дополнительной обработки рабочих поверхностей инструмента, применение в процессе резания различных методов охлаждения, внесение изменений в конструкцию инструмента.

Все эти меры, если и повышают стойкость инструмента, но не решают полностью вопроса стойкости.

В связи с этим возникает необходимость в разработке и промышленном освоении методов резки стеклопластиков, обеспечивающих высокую производительность, требуемые точность и качество поверхностей реза. К числу таких перспективных процессов разделения материалов следует отнести гидроабразивное резание (ГАР), основанное на процессах разрушения под действием сверхзвукового потока жидкости и абразива [1, 2].

Основной проблемой обработки слоистых стеклопластиков методом ГАР является возникновение расслоений различной величины (до 70... 80 мм) в местах прошивки материала [3].

Созданные к настоящему времени научные разработки, технологии и оборудование гидроабразивного резания направлены в основном на обеспечение самого процесса разделения материала и не всегда учитывают строение раскраиваемого материала.

Основные подходы к обеспечению производительности и качества резания полимерных материалов сверхзвуковой струей жидкости различного состава разработаны Р.А. Тихомировым, Е.Н. Петуховым, Р.А. Кузьминым. В области создания гидрорежущего оборудования необходимо выделить труды Ю.Н. Лаптева, А.Т. Момчилова, В.С. Гуенко, И.И. Шапира, С.В. Беляева, В.А. Слабодянюка, И.В. Петко, М. Hashish, R. Kovacevic, B. Liu, J. Fair, C. Brandt и др. [4 – 6]

Технологические трудности, связанные с достижением требуемой шероховатости, точности формы и расположения поверхности реза, могут быть преодолены на основе применения современного программного обеспечения, способного не только моделировать взаимодействие между струей и материалом, но и программировать движение инструмента перед обработкой, оценивать время резания. Большой вклад в развитие этого направления внесли И.И. Шапиро, Г.В. Барсуков, А.Л. Галиновский, М.В. Барабанов, Г.М. Иванов, В.К. Свешников, J. Zeng, J. Munoz, P. Singh, M. Varghese, A. Thomas, Geskin E.S., D. Arola, M. Ramulu, R. Kovacevic, R. Mohan, M. Hashish, A. Momber и др. [7 - 9]

Тем не менее, при большом количестве работ, посвященным гидроабразивному резанию, отсутствуют практически применимые рекомендации и расчетные модели по выбору режимов прошивки листовых слоистых стеклопластиков, позволяющие исключить возникновение расслоений материала (рис. 1).

Следует отметить, что для решения проблемы расслоения слоистых материалов ряд производителей укомплектовывают установки ГАР модулем предварительного сверления отверстий под заход струи [10].

Однако существует ряд недостатков, связанных с его применением:

- установки гидроабразивной резки, поставляемые с модулем предварительного сверления отверстий, являются достаточно дорогостоящими и многие производители эту функцию не предлагают;
- необходимо засверливание отверстий для захода к каждому обрабатываемому контуру. Так как количество обрабатываемых контуров в раскрое достигает нескольких сотен, то очень высока вероятность поломки сверла вследствие его критического износа при обработке листового материала толщиной свыше 30 мм. Замена сверла в процессе раскроя листа является достаточно трудоемкой задачей и связана со значительным простоем оборудования;
- существует вероятность поломки сверла при столкновении с металлической кромкой опоры, на которой установлена листовая заготовка. Поэтому необходимо применение специальных подложек даже для толстолистовых материалов или применение быстроизнашивающихся опорных со вставками из мягких полимерных материалов.

Исходя из выше сказанного, изучение процесса прошивки слоистых стеклопластиков и разработка технологических рекомендаций по их обработке методом ГАР является актуальной научно-технической задачей.

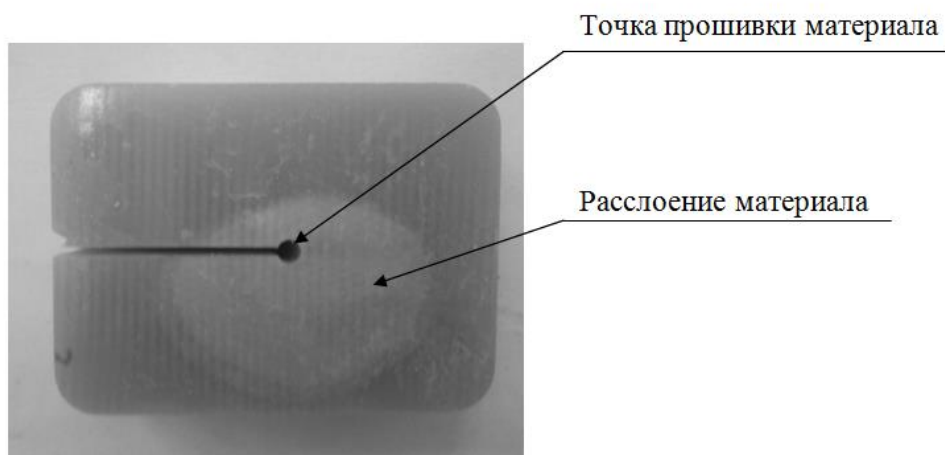


Рис.1. Расслоение, образующееся вокруг точки прошивки материала

Для прогнозирования расслоения стеклопластика на операции ГАР авторами статьи проведено моделирование напряженно-деформированного состояния материала под действием гидроабразивной струи. Мы исходили из того, что если создаваемые напряжения по толщине проникания больше предела прочности клеевого соединения, то в этом месте будет происходить расслоение. Стохастические факторы, влияющие на прочность склейки, не учитывались.

При моделировании учитывалось, что выражения для перемещения и, создаваемого сосредоточенными особенностями того или иного типа (сосредоточенная сила, двойная сила, центр расширения, центр вращения), можно рассматривать как некоторые частные решения уравнений теории упругости для безграничной среды, из которой удалена точка приложения особенности (решение должно быть в рассматриваемой области конечным и непрерывным и иметь в ней такие же производные любого порядка по всем координатам). Можно построить сколь угодно большое число новых выражений вектора, рассматривая наложение действий этих элементарных особенностей, распределенных по некоторым линиям, поверхностям и объемам. Эти выражения будут служить решениями уравнений теории упругости для частей упругой среды, не содержащих указанных особых геометрических мест.

За линию распределения этих особенностей с точки зрения требования максимальной простоты выбрана бесконечная полупрямая. После чего получено решение уравнений теории упругости для упругой среды, из которой выделена область, ограниченная конической поверхностью со сколь угодно малым углом раствора, имеющей вершину в начале полупрямой и охватывающей эту полупрямую.

По результатам расчетов получены следующие аналитические зависимости для расчета напряженного состояния слоистого материала под действием проникающей гидроабразивной струи:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} = & \frac{2G}{m-2} \operatorname{div} U + \frac{1}{2\pi} \left(S_x \left(\frac{x}{R^3} - \frac{3x^3}{R^5} + \frac{m-2}{m} \left(-\frac{3x}{R(R+z)^2} - \frac{x^3(3R+z)}{R^3(R+z)^3} \right) \right) + \right. \\ & + S_y \left(-\frac{y}{R^3} - \frac{3x^2y}{R^5} - \frac{m-2}{m} \left(\frac{y}{R(R+z)^2} - \frac{x^2y(3R+z)}{R^2(R+z)^4} \right) \right) + \\ & \left. + S_z \left(\frac{z}{R^3} - \frac{3x^2z}{R^5} - \frac{m-2}{m} \left(\frac{1}{R(R+z)} - \frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right) \right) \right) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{yy} = & \frac{2G}{m-2} \operatorname{div} U + \frac{1}{2\pi} \left(S_x \left(\frac{x}{R^3} - \frac{3y^2x}{R^5} - \frac{m-2}{m} \left(\frac{x}{R^2(R+z)} - \frac{xy^2(3R+z)}{R^2(R+z)^4} \right) \right) + \right. \\ & + S_y \left(\frac{y}{R^3} - \frac{3y^3}{R^5} + \frac{m-2}{m} \left(-\frac{3y}{R(R+z)^2} + \frac{y^3(3R+z)}{R^3(R+z)^3} \right) \right) + \\ & \left. + S_z \left(\frac{z}{R^3} - \frac{3zy^2}{R^5} - \frac{m-2}{m} \left(\frac{1}{R(R+z)} + \frac{y^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right) \right) \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{zz} = & \frac{2G}{m-2} \operatorname{div} U + \frac{1}{2\pi} \left(S_x \left(\frac{x}{R^3} - \frac{3z^2 x}{R^5} - \frac{m-2}{m} \frac{x}{R^3} \right) + \right. \\ & + S_y \left(\frac{y}{R^3} - \frac{3z^2 y}{R^5} - \frac{m-2}{m} \frac{y}{R^3} \right) + \\ & \left. + S_z \left(-\frac{2(m-1)}{m} \frac{z}{R^3} + \frac{2z}{R^3} - \frac{3z^3}{R^5} \right) \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{xy} = & \frac{1}{4\pi} \left(S_x \left(-\frac{6x^2 y}{R^5} - \frac{m-2}{m} \frac{2y}{R(R+z)^2} \right) + \right. \\ & + S_y \left(\frac{x}{R^3} + \frac{1}{R^3} - \frac{6xy^2}{R^5} \right) + \\ & \left. + 2S_z \left(-\frac{3xyz}{R^5} + \frac{m-2}{m} \frac{xy(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right) \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{yz} = & \frac{1}{2\pi} \left(S_x \left(-\frac{3y^2 x}{R^5} - \frac{3xyz}{R^5} \right) + \right. \\ & + S_y \left(\frac{m-2}{m} \left(\frac{2}{R(R+z)} + \frac{yz(2R+z)}{R^3(R+z)^2} - \frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right) \right) + \\ & \left. + S_z \left(-\frac{6z^2 y}{R^5} + \left(1 + \frac{3(m-2)}{m} \right) \frac{y}{R^3} \right) \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{zx} = & \frac{1}{4\pi} \left(S_x \left(-\frac{3zx^2}{R^5} - \frac{3z^2 x}{R^5} - \frac{m-2}{m} \left(\frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} + \frac{x^3(2R+z)}{R^3(R+z)^3} \right) \right) + \right. \\ & \left. - S_y \frac{6xyz}{R^5} + S_z \left(\left(1 + \frac{m-2}{m} \right) \frac{x}{R^3} - \frac{6xz^2}{R^5} \right) \right) \end{aligned} \quad (6)$$

где R - единичный вектор направления; m - число Пуассона; S_x, S_y, S_z - проекции сосредоточенной силы на оси XYZ, действующей во внутрь полупространства.

При воздействии сосредоточенной силы на слоеный материал происходит поперечное смещение слоев, что приводит к разрушению материала по границе их склейки. На рис. 2 представлены результаты моделирования.

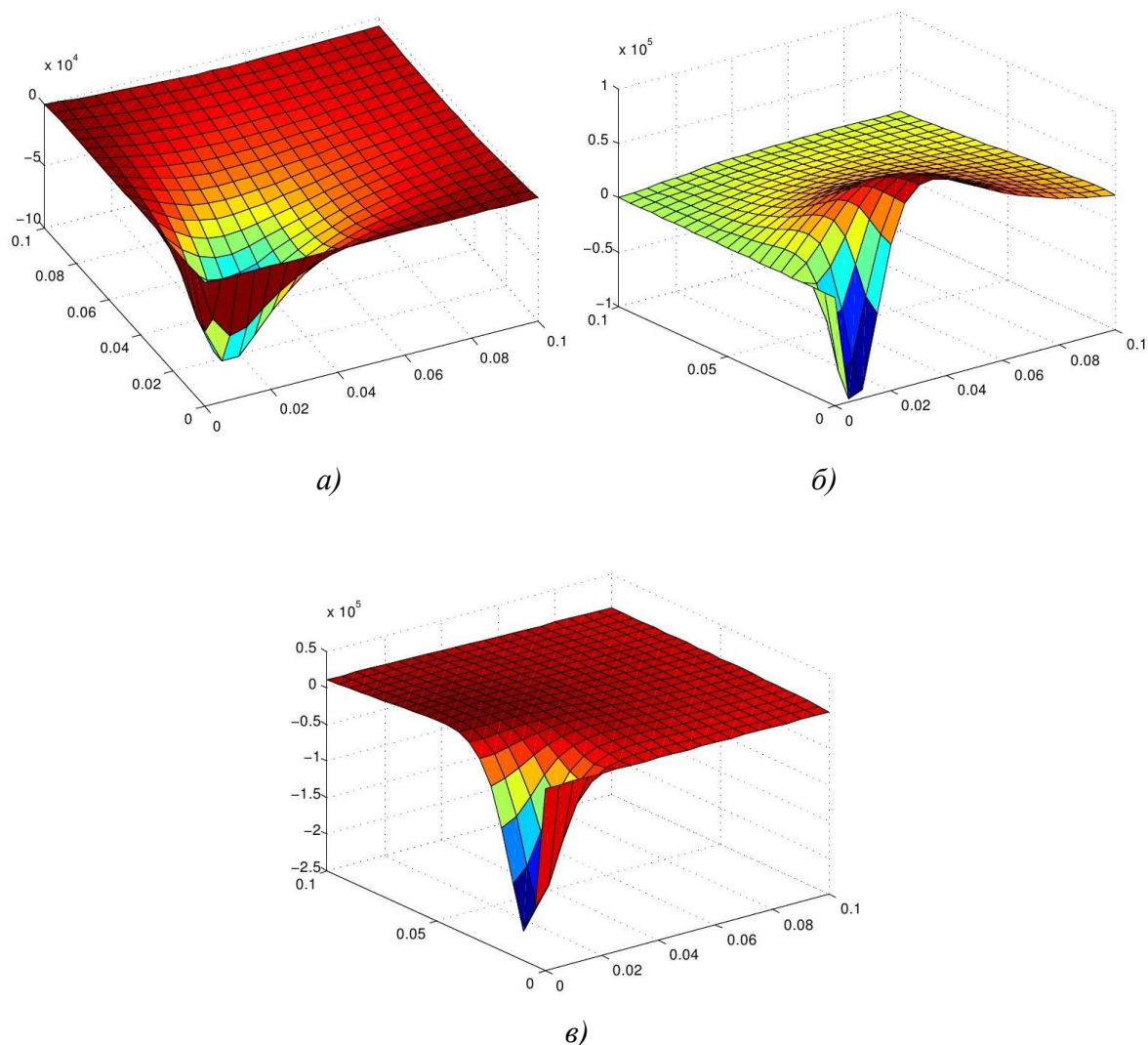


Рис. 2. Касательные напряжения в зоне проникания гидроабразивной струи в слоистый материал:

$$a - xy; \quad б - zy; \quad в - xz$$

Анализ полученных зависимостей показывает, что слои стеклопластика при проникании гидроабразивной струи стремятся не только оторваться друг от друга, но и сдвинуться одна относительно другой. Установлено, что в момент врезания в слоистый материал именно касательные напряжения достигают максимальных значений и разрушают клеевое соединение между слоями путем сдвига. Разрушение происходит на глубине 2 – 5 слоя, что подтверждается проведенными ранее экспериментальными исследованиями [3].

В соответствии с этим при назначении режимов резания стеклопластиков гидроабразивной струей с учетом возможного расслоения, на первом плане выступают создаваемые касательные напряжения, которые должны быть меньше предельных значений для применяемого материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барзов, А.А. Технология ультраструйной обработки и диагностики материалов [Текст] / А.А. Барзов, А.Л. Галиновский. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 246 с.
2. Степанов, Ю.С. Современные технологии гидро- и гидроабразивной обработки заготовок [Текст] / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, Е.Г. Алюшин // Научно-технические проблемы в машиностроении. – 2012. – № 6 – С. 15- 20.
3. Барсуков, Г.В. Исследование влияния технологических режимов гидроабразивного резания на расслоение поверхности деталей из стеклотекстолита [Текст] / Г.В. Барсуков, Т.А. Журавлева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – № 4. - 2013.
4. Тихомиров, Р.А. Гидрорезание неметаллических материалов [Текст] / Р.А. Тихомиров, В.С. Гуенко. – Киев: Техніка, 1984. – 150 с.
5. Momber, A.W. Principles of Abrasive Water Jet Machining Momber [Text] / A.W. Kovacevic R.. – Springer, 1998. – 394 p.
6. Buchcz, A. Definition of abrasive water jet cutting capacity taking into account abrasive grain properties [Text] / A. Buchcz, G.V. Barsukov, Y.S. Stepanov, A.V. Mikheev // Selected Engineering Problems. – 2013. - № 4. – P. 157 – 162.
7. Галиновский, А.Л. Минимизация технологической себестоимости гидроабразивного резания с учетом стоимостных и технологических параметров процесса обработки [Текст] / А.Л. Галиновский, В.А. Тарасов, В.М. Елфимов // Известия высших учебных заведений «Машиностроение». - 2011. - №4. - с. 46-54.
8. Барсуков, Г.В. Определение производительности гидроабразивного резания с учетом характеристик абразивного зерна [Текст] / Г.В. Барсуков, А.В. Михеев // Справочник. Инженерный журнал. - 2008. - № 1. - С. 9 – 14.
9. Барсуков, Г.В. Управление качеством и дискретное регулирование технологической системы гидрорезания [Текст] / Г.В. Барсуков // Справочник. Инженерный журнал, 2004. № 7. С. 53 - 57.
10. Барсуков, Г.В. Разработка специальных технологических приемов, обеспечивающих исключение влияния расслоений на качество деталей из стеклотекстолита при гидроабразивной резке [Текст] / Г.В. Барсуков, Т.А. Журавлева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – № 3. - 2014. – С. 76 – 85.

Gennady Barsukov

State University-Education-Science-Production Complex
Russia, Orel
E-Mail: awj@list.ru

Aleksandr Mikheev

State University-Education-Science-Production Complex
Russia, Orel
E-Mail: pr_uchastok@mail.ru

Tatiana Zhuravleva

State University-Education-Science-Production Complex
Russia, Orel
E-Mail: awj@list.ru

Modeling of stress state of the laminate under the influence of a supersonic jet waterjet

Abstract. Currently, the production of layered materials is one of the fastest growing industries. Among the per-promising separation processes such materials should include pressure water cutting (AWJT). The main problem of handling laminates by GAR is the appearance of the bundles in the field flashing material. However, existing practical recommendations aimed mainly at ensuring the process of separation of the material and do not always take into account the structure of the cut material, which leads to the loss of processing quality laminates. In order to predict the bundle fiberglass operations AWJT the authors simulated the stress-strain state of the material under the action of the waterjet stream. We proceeded from the assumption that if the voltage generated across the thickness is more than the limit of penetration of bonding strength, then this place will be a bundle. Stochastic factors affecting the bonding strength is not taken into account. It has been established that at the infeed laminate is tangential stress reaches the maximum value and destroy the adhesive connection between layers by shifting. Accordingly, the appointment of waterjet cutting conditions fibreglasses jet with the possibility of separation, in the foreground are the shear stresses generated, which must be less than the limits for the material used.

Keywords: Supersonic interaction; destruction; penetration; indentation; abrasive water jet cutting; volumetric ablation; particle simulation; obstruction; supersonic speed.

REFERENCES

1. Barzov, A.A. Tekhnologiya ul'trastruynoy obrabotki i diagnostiki materialov [Tekst] / A.A. Barzov, A.L. Galinovskiy. – M.: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Bauman, 2009. – 246 s.
2. Stepanov, Yu.S. Sovremennye tekhnologii gidro- i gidroabrazivnoy obrabotki zagotovok [Tekst] / Yu.S. Stepanov, G.V. Barsukov, E.G. Alyushin // Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii. – 2012. – № 6 – S. 15- 20.
3. Barsukov, G.V. Issledovanie vliyaniya tekhnologicheskikh rezhimov gidroabrazivnogo rezaniya na rassloenie poverkhnosti detaley iz steklotekstolita [Tekst] / G.V. Barsukov, T.A. Zhuravleva // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – № 4. - 2013.
4. Tikhomirov, R.A. Gidrorezanie nemetallicheskih materialov [Tekst] / R.A. Tikhomirov, V.S. Guenko. – Kiev: Tekhnika, 1984. – 150 s.
5. Momber, A.W. Principles of Abrasive Water Jet Machining Momber [Text] / A.W. Kovacevic R.. – Springer, 1998. – 394 p.
6. Buchcz, A. Definition of abrasive water jet cutting capacity taking into account abrasive grain properties [Text] / A. Buchcz, G.V. Barsukov, Y.S. Stepanov, A.V. Mikheev // Selected Engineering Problems. – 2013. - № 4. – R. 157 – 162.
7. Galinovskiy, A.L. Minimizatsiya tekhnologicheskoy sebestoimosti gidroabrazivnogo rezaniya s uchetom stoimostnykh i tekhnologicheskikh parametrov protsessa obrabotki [Tekst] / A.L. Galinovskiy, V.A. Tarasov, V.M. Elfimov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy «Mashinostroenie». -2011.-№4.- s. 46-54.
8. Barsukov, G.V. Opredelenie proizvoditel'nosti gidroabrazivnogo rezaniya s uchetom kharakteristik abrazivnogo zerna [Tekst] / G.V. Barsukov, A.V. Mikheev // Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal. - 2008. - № 1. - S. 9 – 14.
9. Barsukov, G.V. Upravlenie kachestvom i diskretnoe regulirovanie tekhnologicheskoy sistemy gidrorezaniya [Tekst] / G.V. Barsukov // Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal, 2004. № 7. S. 53 - 57.
10. Barsukov, G.V. Razrabotka spetsial'nykh tekhnologicheskikh priemov, obespechivayushchikh isklyuchenie vliyaniya rassloeniy na kachestvo detaley iz steklotekstolita pri gidroabrazivnoy rezke [Tekst] / G.V. Barsukov, T.A. Zhuravleva // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – № 3. - 2014. – С. 76 – 85.