

ting, providing minimal heat generation and accurate cutting with a roughness of the edge surface $R_a = 1,6$ microns. **Keywords:** hydraulic cutting, waterjet treatment, abrasive, cutting jet, modeling.

Технологический процесс (ТП) — это изменение формы, размеров, свойств материала для получения детали в соответствии с ее чертежом. Каждый ТП целесообразно использовать в определенном интервале показателей (свойства материалов детали и инструмента, технологические особенности) [1–5]. Уникальность технологии гидроабразивной резки заключается в том, что с ее помощью можно разрезать практически любые виды материалов и является альтернативой не только механической, но и лазерной, плазменной, а также ультразвуковой резке и в некоторых случаях является единственно возможной.

В современном машиностроении очень часто к качеству реза металлов предъявляют высокие требования, что не дает возможности использовать традиционное оборудование: гильотины или плазменную резку. Резку металла водой применяют с 60-х гг. XIX в. в авиастроительной компании США и считают оптимальной для резки металла и других высокопрочных материалов [6 и 7]. Имеется значительный опыт обработки сложного профиля механическими методами, энергией ультразвука, плазмой, лазером, гидроабразивной струей и др. [2, 4 и 8]. Прогнозируют высокий среднегодовой темп роста мирового рынка гидрорежущего оборудования [9].

При пакетной резке листов в массовом производстве применяют гидроабразивную обработку. Целесообразность применения пакетной резки определяют следующие преимущества: возможность вырезки тонколистовых деталей по любому контуру без оплавления кромок и коробления листов; снижение расхода абразива по сравнению с резкой отдельных листов; высокая производительность; идентичность и точность форм деталей, вырезанных из одного пакета [10].

Несмотря на высокую производительность метод гидроабразивной обработки недостаточно изучен, что в значительной степени сдерживает его применение. Работы [11–14] направлены на изучение данного метода и исследование одного или нескольких технологических параметров: скорость струи, зернистость абразива, угол наклона струи, расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности.

Наиболее распространенной современной технологией раскроя флоат-стекла является резка режущими роликами (рис. 1). Ролики для резки стекла имеют клино-

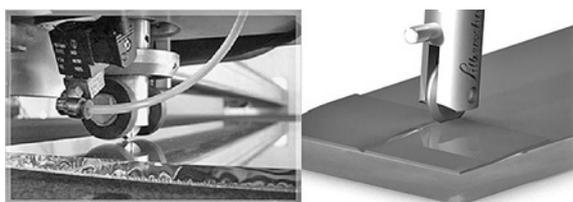


Рис. 1. Автоматическая резка стекла режущим роликом

видное тупоугольное сечение и изготавливают их из твердых сплавов. Угол заточки применяемого ролика зависит от толщины стекла. При этом раскрой проходит в два этапа: сначала делают надрез, т. е. образуют царапину с возникающей под ней цепочкой трещинок, а затем поперек линии реза прикладывают усилие на изгиб. Такая резка — создание в стекле микротрещин под действием режущего ролика, вдоль которых затем происходит его раскол.

Различные факторы, например, тип режущего инструмента, его положение, вид стекла, применяемое давление, скорость, качество поверхности стекла, температура влияют на качество резки. Для выполнения достаточно хорошего реза скорость (до 160 м/мин) движения ролика и его давление на стекло должны быть достаточно большими и постоянными. Эти факторы взаимосвязаны между собой: при увеличении скорости следует уменьшать давление и наоборот. Но основным критерием реза является не столько количество осколков при нанесении царапины и различные дефекты поверхности, сколько создаваемые этими дефектами напряжения в стекле. Решающее значение имеет самая глубокая трещина, которая возникает под действием растягивающего напряжения, создаваемого давлением режущего инструмента.

Сущность гидроабразивной обработки. В современном машиностроении основное влияние на качественные и эксплуатационные показатели деталей оказывают финишные операции [13–17]. Задача повышения качества продукции связана с совершенствованием известных и разработкой новых, эффективных методов финишной обработки, среди которых ведущее место занимают методы абразивной обработки. Абразивная обработка позволяет обеспечить требуемые точность и качество деталей при высокой производительности, а также высокую надежность и долговечность машин в процессе эксплуатации, поэтому роль абразивных операций в современном машиностроении непрерывно возрастает.

Гидроабразивная обработка является одной из разновидностей обработки деталей свободными абразивами, позволяющей обрабатывать фасонные детали, которые сложно обрабатывать на станках. Процесс недостаточно изучен, на его результат влияет множество технологических параметров: давление режущей струи, подача сопла, зернистость, твердость, расход абразива, расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности, физико-механические характеристики обрабатываемого материала.

Помимо достоинств есть и недостатки у данной технологии, одним из которых является неравномерность распределения шероховатости поверхности реза по глубине сечения, а также ухудшение качества при увеличении подачи сопла [13–18]. На рис. 2 показана схема установки гидроабразивной резки стекла.

Вода, сжатая первым основным компонентом системы (насосом-мультипликатором) до давления более 4000 атм, проходит через водяное сопло, образующее

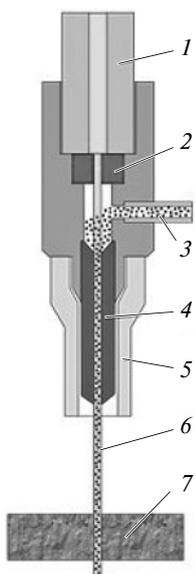


Рис. 2. Схема гидроабразивной обработки: 1 — подвод воды под высоким давлением, 2 — сопло, 3 — подача абразива, 4 — смеситель, 5 — кожух, 6 — режущая струя, 7 — разрезаемый материал

струю диаметром около 0,5 мм, которая попадает в смесительную камеру. В смесительной камере струя воды «подсасывает» абразив (например, гранатовый песок с частицами размером около 0,4 мм) и далее проходит через второе, твердосплавное сопло с внутренним диаметром 1 мм. Из этого сопла струя воды с абразивом выходит со скоростью около 3М (порядка 1200 м/с) и направляется на поверхность разрезаемого материала. После резки этого материала остаточная энергия струи гасится специальной водяной ловушкой. Материал для резки, как правило, располагают на координатном столе.

В процессе гидроабразивной резки расходуют: электричество, воздух, абразив, воду. Расход абразива составляет порядка 300—350 г/мин. В качестве абразивного материала рекомендуют применять только натуральный абразив — гранат, который обладает хорошими показателями по прочности. Размер зерна абразивного материала должен составлять от 200 до 600 микрон. Время службы сопла составляет около 50 ч, а трубки — 100 ч. Ширина реза может быть легко скомпенсирована с помощью числового программного управления. Таким образом она не будет влиять на точность и качество резки [17].

Главное отличие гидроабразивной резки листового металла от остальных способов резки — то, что на материал не оказывают механическое воздействие. Отсутствие трения, нагревания инструмента влияет на качество реза и возможные сферы применения. Гидроабразивную резку металла струей чистой воды или абразивной смеси успешно применяют и для разрезания следующих материалов: мрамор, гранит, камень и другие горные породы; стекло, керамика; стали и металлы (в том числе титан и коррозионно-стойкая сталь); железобетон; пластик, текстолитовые, эбонитовые и паронитовые плиты, резина [7].

Станок гидроабразивной резки мод. Primus 202. Резку осуществляют сверхзвуковой струей воды, которую по-

лучают путем концентрации потока воды через откалиброванное отверстие. В результате скорость гидроабразивной резки примерно в 3 раза больше скорости звука (810 м/с). Резка может быть с использованием абразивного материала и без, в зависимости от типа обрабатываемого материала на станке мод. Primus 202 с одной или двумя трех- или пятиосевыми головами для обеспечения максимальной производительности и непрерывного реза без ущерба гибкости.

Благодаря тому, что стол поделен на две зоны для резки, присутствует возможность работы в маятниковом режиме: разгружать (загружать) заготовки в одной части стола, пока станок работает в другой части [13 и 18]. На рис. 3 показаны образцы изделий, выполненных на станке для гидроабразивной резки стекла.

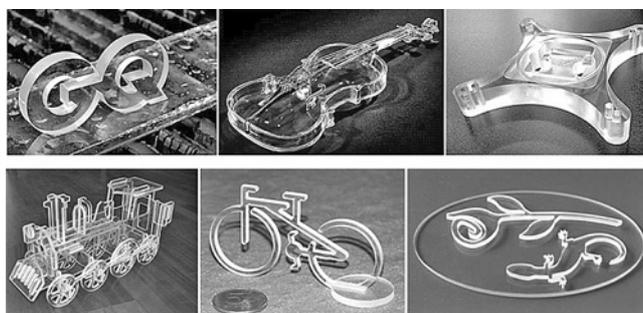


Рис. 3. Образцы изделий

Результаты и обсуждение. Точная фигурная гидроабразивная резка металла позволяет использовать станки при производстве предметов украшения, декоративных элементов и много другого. Качество реза и точность выполнения фигур во многом зависит не от опыта рабочего, а от качества используемого оборудования и программного обеспечения.

Уникальный способ обработки материала с помощью узконаправленной струи воды под давлением нашел свое место во многих сферах производства и искусства. Одним из основных преимуществ гидроабразивного метода резки является полное отсутствие сколов и нагревания поверхности, присутствующие при обычном разрезании предметов. Благодаря современным технологиям и усовершенствованию станков удалось расширить их функциональные возможности и сферу применения.

Возможность выполнить нестандартную резку материала. Причем изменение наклона реза не влияет на качество разрезания. Точность резки металла под углом позволяет использовать полученные заготовки без дальнейшей обработки [18].

Выполним моделирование и сравнение двух методов обработки прозрачного стекла толщиной 10 мм размером 1 × 1 м: механической резки режущим роликом и гидроабразивной обработки. На рис. 4, а представлена 3D-модель механической резки стекла режущим роликом.

С помощью полученной 3D-модели создаем конечно-элементную сетку и выполняем статический расчет,

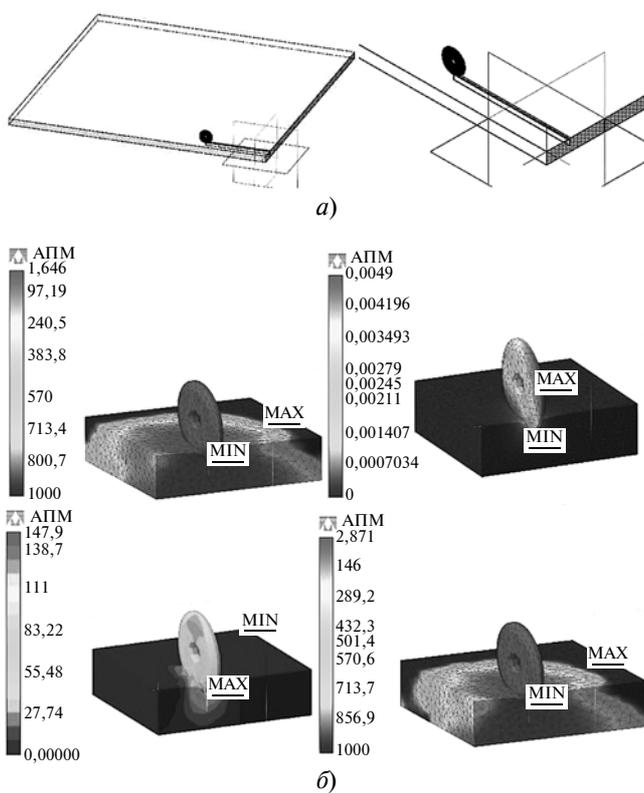


Рис. 4. 3D-модель (а) и результаты статистического расчета (б) механической резки стекла режущим роликом

результаты (эквивалентное напряжение по Мизесу, суммарное линейное перемещение, коэффициент запаса по текучести, коэффициент запаса по прочности) которого показаны на рис. 4, б.

Аналогично выполним статистический расчет гидроабразивной обработки, результаты (эквивалентное напряжение по Мизесу, суммарное линейное перемещение, коэффициент запаса по текучести, коэффициент запаса по прочности) показаны на рис. 5, а и б.

Анализ результатов компьютерного моделирования показал, что при гидроабразивной резке, в стекле образуется меньше напряжений, т.е. более качественный рез и более эффективный и менее бракообразующий способ резки стекла.

Выводы

1. Метод резки водой или гидроабразивная резка позволяют существенно увеличить скорость и качество реза материала. С экономической точки зрения, расход материала и энергии значительно (на 20—30 %) понижается в результате использования при таком методе энергии воды в качестве режущего инструмента. Расходным материалом является только вода и абразивный материал.

2. Практика показывает, что данный метод экономичен, экологичен, имеет ряд преимуществ: минимальное тепловыделение обеспечивает точный рез материалов;

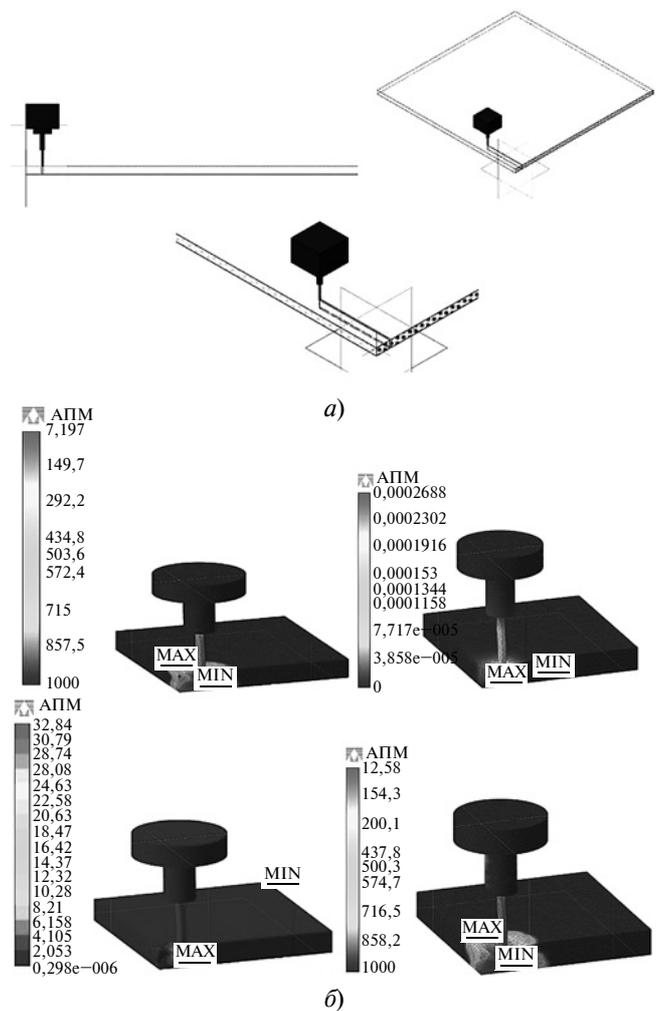


Рис. 5. 3D-модель (а) и результаты статистического расчета (б) гидроабразивной обработки стекла

скорость резания может достигать 30 000 мм/мин; точность и полное соответствие готовой продукции; возможность выреза деталей сложной формы; в качестве рабочей жидкости можно использовать обычную воду либо с небольшой долей содержания абразивных частиц; отсутствие термического воздействия на материал (температура в зоне реза 60—90 °С); широкий спектр разрезаемых материалов и толщин (до 200—300 мм и более); отсутствие оплавления и пригорания материала на кромках обработанных деталей и в прилегающей зоне; экологическая чистота и полное отсутствие вредных газовыведений; высокое качество реза (шероховатость кромки $R_a = 1,6$ мкм).

Список литературы

1. Попелюх А. И., Тюрин А. Г., Плотникова Н. В. Перспективные способы обработки материалов: Учеб. пособие. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2014. — 49 с.

2. **Mechanical Properties of Products after Electric-Discharge Machining** / T. R. Abyaz, V. E. Vil'deman, K. R. Muratov et al. // *Russian Engineering Research*. — 2018. — Vol. 39. — Is. 10. — P. 892—894.

3. **A New Pass-Through Lathe Cutter** / N. S. Dudak, G. T. Itybaeva, Zh. K. Musina et al. // *Russian Engineering Research*. — 2014. — Vol. 34. — Is. 11. — P. 705—707.

4. **Laser Machining of Tool Steels** / V. V. Zvezdin, R. M. Khisamutdinov, V. A. Grechishnikov et al. // *Russian Engineering Research*. — 2018. — Vol. 38. — Is. 12. — P. 1038—1041.

5. **Face Turning of Holes** / R. B. Mukanov, A. Z. Kasenov, G. T. Itybaeva et al. // *Russian Engineering Research*. — 2019. — Vol. 39. — Is. 1. — P. 75—78.

6. **El-Hofy H.** Advanced machining processes. Nontraditional and Hybrid machining processes // *The McGraw-Hill Companies*. — 2005. — P. 32—46.

7. **Мендалиева С. И., Косатбекова Д. Ш., Акулович Л. М.** Технология и оборудование гидрорезки и гидроабразивной обработки в современном машиностроении // *Вестник науки Казахстана агротехнического университета имени С. Сейфуллина*. — 2016. — № 2 (89). — С. 144—153.

8. **Галиновский А. Л., Тарасов В. А., Елфимов В. М.** Минимизация технологической себестоимости гидроабразивного резания с учетом стоимостных и технологических параметров процесса обработки // *Известия высших учебных заведений «Машиностроение»*. — 2011. — № 4. — С. 46—54.

9. **Степанова Е. Ю., Кожус О. Г., Барсуков Г. В.** Инновационные технологии резания сверхзвуковой струей жидкости: экономика, рынок, состояние и перспективы развития // *Вестник Брянского государственного технического университета*. — 2017. — № 1 (54). — С. 243—253.

10. **Степанов Ю. С., Барсуков Г. В., Алюшин Е. Г.** Современные технологии гидро- и гидроабразивной обработки заго-

товок // *Наукоёмкие технологии в машиностроении*. — 2012. — № 6. — С. 15—20.

11. **Тихонов А. А.** Повышение эффективности процесса гидроабразивной обработки: дис. ... канд. техн. наук. — Ростов-на-Дону, 2011. — 156 с.

12. **Верченко А. В., Тамаркин М. А., Кишко А. А.** Исследование шероховатости поверхности реза при гидроабразивной резке // *Advanced Engineering Research*. — 2017. — № 2 (89). — С. 116—130.

13. **Смирнов М. И., Спиридонов Ю. А., Карапетян А. Р.** Современные технологии резки листового стекла // *Стекло и керамика*. — 2011. — № 1. — С. 6—10.

14. **Galinovskiy A. L., Izotov N. A.** An experimental study of hydroerosion of surface of a chill metal under the influence of an abrasive-liquid ultra-jet // *AIP Conference Proceedings*. — 2021. — Vol. 2318. — Art. no 150013.

15. **Multi-flute drill-broach for precision machining of holes** / N. Dudak, G. Itybaeva, A. Kasenov et al. // *Scientia Iranica*. — 2019. — Vol. 26. — Is. 3. — P. 1415—1426.

16. **Popov V., Yanyushkin A., Arkhipov P.** Combined electric diamond grinding of materials prone to adhesive diffusive interaction // *Materials Today: Proceedings* this link is disabled. — 2019. — № 11. — P. 36—41.

17. **Шпилев В. В.** Повышение эффективности процесса гидроабразивной резки листовых деталей путем оптимизации режимов обработки и параметров струи рабочей жидкости: дис. ... канд. техн. наук. — Саратов, 2012. — 147 с.

18. **Молчанова Е. С., Бычков Н. А., Черняев С. И.** Сравнение плазменного, гидроабразивного и лазерного способов резки и прошивки конструкционных материалов в радиоэлектронной промышленности // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. — 2013. — № 6 (302). — С. 58—62.

Поступила в редакцию 21.11.2021; после доработки 21.11.2021; принята к публикации 21.11.2021.

УДК 621.9.048.4

Морфологическое пространство проектных решений инструментального обеспечения сварки трением перемешиванием в производстве авиационной техники

к.т.н. Д. Н. Курицын, д.т.н. М. В. Силуянова, к.т.н. В. В. Курицына

// ФГБОУ ВО Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); Россия, г. Москва;

E-mail: tpdla@mail.ru

Аннотация. Представлена методика формирования облика инструмента для сварки трением перемешиванием с применением подхода морфологического анализа. Электронно-графический каталог пространства альтернатив конструктивных элементов рабочей части инструмента в сочетании с алгоритмом логического вывода технологических решений обеспечивает сокращение цикла проектирования и возможность определения перспективных концепций инструментального обеспечения. **Ключевые слова:** сварка трением перемешиванием (СТП), авиационная и ракетно-космическая техника, инструмент для сварки трением перемешиванием, морфологический анализ, морфологическая матрица.

Abstract. The technique of forming the appearance of a tool for welding by friction mixing using the approach of morphological analysis is presented. The electronic graphic catalog of the space of

alternatives to the structural elements of the working part of the tool in combination with the algorithm of logical inference of technological solutions provides a reduction in the design cycle and the ability to identify promising concepts of tool support. **Keywords:** mixing friction welding (STP), aviation and rocket and space technology, mixing friction welding tool, morphological analysis, morphological matrix.

Возможность производства перспективных и конкурентоспособных образцов авиационной техники определяется уровнем технологичности конструкции, с одной стороны. С другой стороны, на ведущий план выходят задачи наукоёмкого технологического проектирования, разработки методов и средств изготовления компонентов изделия, обладающих высокими эксплуатационными