

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ ТОЛСТОЛИСТОВЫХ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Тамаркин М.А.* , Верченко А.В.** , Кишко А.А.***

Донской государственный технический университет,
пл. Гагарина, 1, Ростов-на-Дону, 344000, Россия

* e-mail: tehn_rostov@mail.ru

** e-mail: alex290292@mail.ru

*** e-mail: aleksandr_kishko@mail.ru

Приведены результаты исследований влияния скорости подачи на величину шероховатости поверхности реза при гидроабразивной резке толстолистовых авиационных материалов. Представлены результаты экспериментальных исследований образцов из стали 30ХГСА, алюминиевого сплава Д16 и композитного материала. Разработана теоретическая модель формирования профиля шероховатости поверхности реза в зависимости от величины подачи и глубины реза.

Ключевые слова: гидроабразивная резка, эрозионное разрушение металла, гранатовый абразив (песок), смесь абразивных частиц с водой, зернистость абразива, авиационные материалы, композитные материалы, подача головки режущей струи, давление режущей струи, отставание режущей струи, шероховатость и волнистость поверхности реза, микроразрушение материала, микростружка, сопло установки гидроабразивной резки.

Введение

При производстве летательных аппаратов (ЛА) применяется огромная номенклатура деталей, отличающихся повышенными требованиями к точности и надежности и изготавливаемых из различных материалов, таких, как сталь, алюминий, пластик, композиты. Огромное внимание уделяется разработке новых и совершенствованию старых технологических процессов изготовления деталей.

Большинство деталей получают методом раскроя (резки) плит различных материалов толщиной от 0,5 до 200 мм с последующей механической обработкой или без нее. Это связано с развитием парка металлообрабатывающего оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ), где все чаще используются поковки или фасонные заготовки из толстолиствого материала.

Существует множество различных методов раскроя заготовок, имеющих свои достоинства и недостатки [9], рис. 1.

Наибольшее распространение получили методы механической, лазерной, плазменной и электроэрозионной резки. Но эти методы обеспечивают высокую производительность только в малых диапазонах толщин. Например, при механической резке невозможно получать фигурный профиль заго-

товки, лазерная резка эффективна для толщин материала до 20 мм. При этом нет возможности резать материалы из композитов, токопроводящих и отражающих свет материалов. Плазменная резка обладает высокой производительностью, позволяет осуществлять раскрой металлов толщиной до 300 мм, но качество реза очень грубое, происходит оплавление кромки реза, точность реза невысокая.

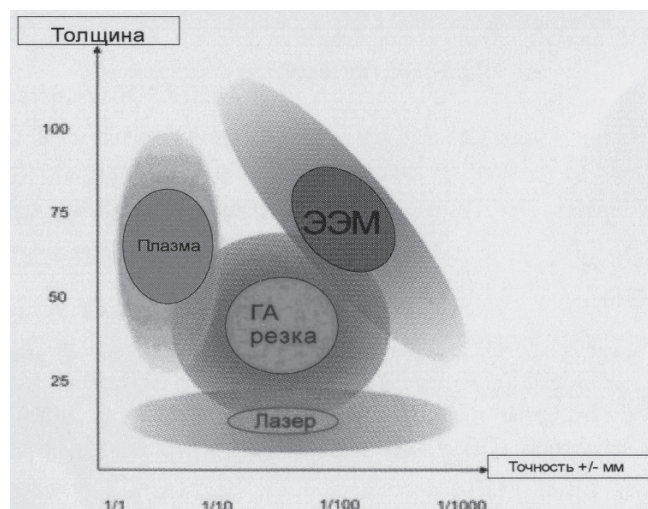


Рис. 1. Сравнение точности различных методов резки

Электроэрозионная обработка дает очень высококачественный и чистый рез, но производительность очень низкая [4].

Рассматриваемая в работе гидроабразивная резка относится к наиболее перспективным методам резки металлов и по сравнению с другими видами обработки имеет следующие преимущества:

- Возможность резки практически любых материалов и их комбинаций (металл, пластмасса, стекло, камень, дерево, композитные материалы).

- Отсутствие термического воздействия, исключая изменение структуры обрабатываемого материала; незначительная механическая нагрузка на деталь.

- Огромный спектр толщин разрезаемого материала. Толщина резки металлов от 0 до 300 мм.

- Резка контуров со сложной 3D-геометрией.

- Высокое качество кромки.

По сравнению с лазерной резкой:

- Нет ограничений по толщине материала.

- Нет проблем с отражающими металлами, такими, как медь, алюминий, титан.

- Нет термического воздействия на металл.

- Возможность резки материалов, чувствительных к нагреву: резина, пластики, композиты, стекло.

По сравнению с плазменной резкой:

- Нет оплавления кромок, и не образуется грат.

- Более широкий диапазон обрабатываемых материалов и толщин.

- Более высокая точность криволинейных профилей.

По сравнению с фрезерованием:

- Более высокая скорость обработки сквозных отверстий и резки по контуру.

- Более качественная обработка тонколистовых деталей.

По сравнению с электроэрозионной обработкой:

- Значительно более высокая скорость резки.

- Возможность резки как токопроводящих, так и токонепроводящих материалов.

- Отсутствие зон термического влияния [3].

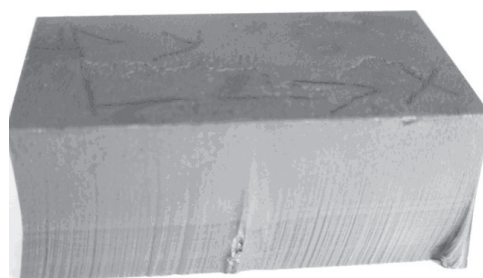
Процесс гидроабразивной резки сложный и малоизученный, на его качество влияет множество параметров. Процесс резания происходит тонкой струей смеси воды с абразивом, выпускаемой с высокой (сверхзвуковой) скоростью под высоким давлением порядка 6000 бар. В качестве абразива используется гранатовый песок с твердостью 7,5–8 (Mohs). Процесс представляет собой эрозионное разрушение под действием рабочей струи, где абразив снимает слои микростружки, а вода эвакуирует их из зоны резания [7, 8]. В работах российских исследователей рассматриваются процессы рез-

ки и параметры, влияющие на точность и качество резки; определены основные дефекты, но диапазон давлений заканчивается 30 Мпа [2, 5, 6].

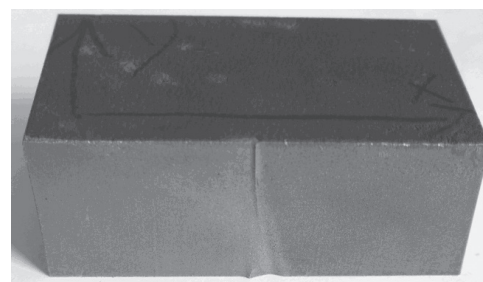
В настоящей статье рассматривается процесс гидроабразивной резки различных авиационных материалов, имеющий научную и практическую значимость для авиакосмической промышленности. Работа выполнялась на производственных мощностях РВПК ПАО «Роствертол» с использованием типовых авиационных материалов, применяемых для изготовления вертолетной техники.

Характеристика объекта исследования

Несмотря на огромные достоинства гидроабразивная резка имеет и свои недостатки. Наиболее распространёнными дефектами являются: отставание режущей струи, неравномерность шероховатости реза, разделение реза на две характерные зоны — гладкого и волнистого реза, недорез на наружных углах и зарез на внутренних углах, разбивание материала на месте входа-выхода струи (рис. 2). Для определения дефектов проводилась серия экспериментов на примере трех различных материалов тол-



а)



б)



в)

Рис. 2. Дефекты гидроабразивной резки: а — недорез на внешнем углу; б — зарез на входе выходе струи; в — неравномерность шероховатости поверхности реза

шиной 30 мм: сталь 30ХГСА, алюминий Д16Т, участок лонжерона несущего винта вертолета МИ-28 из композиционного материала. Эти материалы широко используются в изготовлении конструкции ЛА [10].

Экспериментальные исследования

Эксперимент производился на установке гидроабразивной резки фирмы Flow на образцах из трех материалов при постоянном давлении 400 МПа гранатовым абразивом зернистостью 80 мкм. В ходе эксперимента менялся диапазон подачи режущей струи от 5 до 120 мм/мин (рис. 3).

Были произведены замеры шероховатости поверхности на профилометре Taylor Hobson на характерных участках глубины реза (рис. 4, 5).

При увеличении подачи увеличивается значение шероховатости поверхности (рис. 6). Также значение шероховатости изменяется и по сечению реза, у вершины реза наблюдается равномерная поверхность, к низу реза образуется волнистая поверхность. Это явление связано с потерей струей режущей способности, в результате чего струя отклоняется от своей начальной траектории в направлении, противоположном направлению подачи.

Были изготовлены и проанализированы образцы из алюминия Д16 и композитного материала (рис. 7).

Из опытов выявлено, что на более мягких материалах, таких, как алюминий, при равных значениях подачи наблюдаются худшие значения шероховатости, чем на более твердых материалах (рис. 8).

Математическая модель зависимости профиля шероховатости поверхности реза от режимов обработки

Опираясь на результаты эксперимента, можно разработать математическую модель изменения значений параметров шероховатости в зависимости от скорости подачи сопла. Для получения такой модели необходимо прежде всего разработать методику расчета установившейся шероховатости для конкретных значений исходных данных (технологических факторов), что позволит определить асимптоту экспоненциальной функции $R_a = f(s)$.

Шероховатость поверхности детали после обработки свободными абразивами представляет собой совокупность абразивных царапин, оставленных частицами. При этом царапины частично накладываются друг на друга и поэтому имеют неровные края (рис. 9), однако, если бы частицы делали только

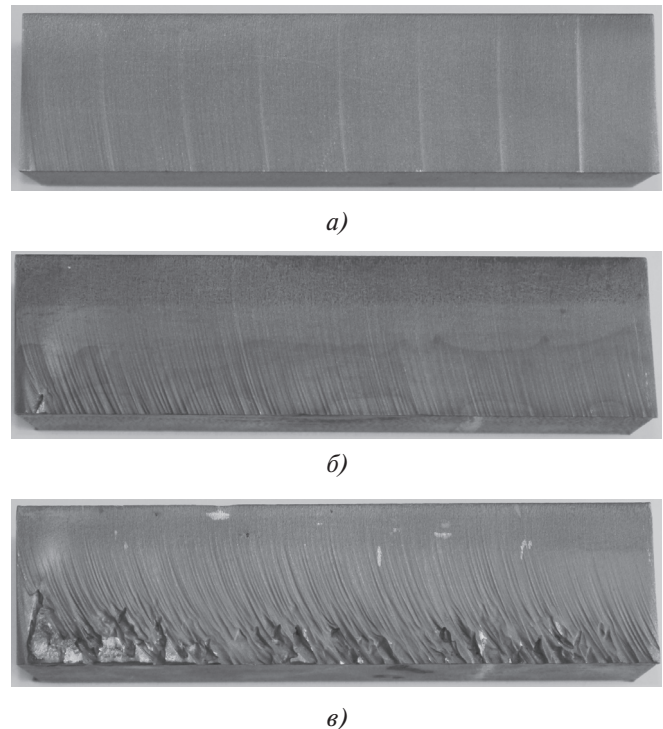


Рис. 3. Поверхность реза на образцах из стали 30ХГСА толщиной 30 мм при увеличении подачи (справа налево): а — подача от 5 до 40 мм/мин; б — подача от 45 до 80 мм/мин; в — подача от 85 до 120 мм/мин

полные срезы, то на некотором уровне нормального сечения детали сумма ширины всех полных срезов была бы равна ширине обрабатываемого участка:

$$\sum_{i=1}^{z_{\text{сеч}}} b_i = L_{\text{ед}}, \quad (1)$$

где $z_{\text{сеч}}$ — количество зерен, оставивших свой след в данном нормальном сечении детали, а вершины всех неровностей в сечении АМСД располагались бы на одной линии (аналогично процессу шлифования при глубине резания, большей H_{yc} [1]).

Средняя линия между вершинами всех неровностей в данном нормальном сечении детали находится на том уровне, где сумма ширины всех частиц, прошедших через данное сечение детали, равна ширине обрабатываемого участка. Дальнейшие расчеты будем производить на единице длины нормального сечения детали, так как величины $z_{\text{сеч}}$ и $L_{\text{ед}}$ связаны между собой.

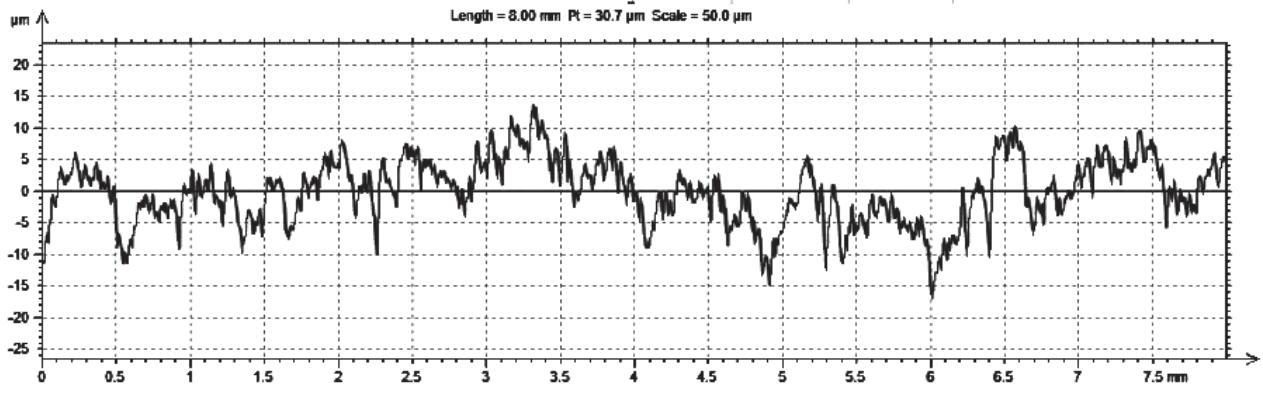
Величину H_{yc} определим при условии, что именно на этой высоте выполняется равенство

$$z_i = 0,5z_0 \left(\frac{h_i}{H_0} \right)^k \quad \text{при } 0 \leq h_i \leq H_0. \quad \text{Для уровня } H_{\text{yc}}$$

можно записать:

Подача 5мм/мин. Глубина 5мм

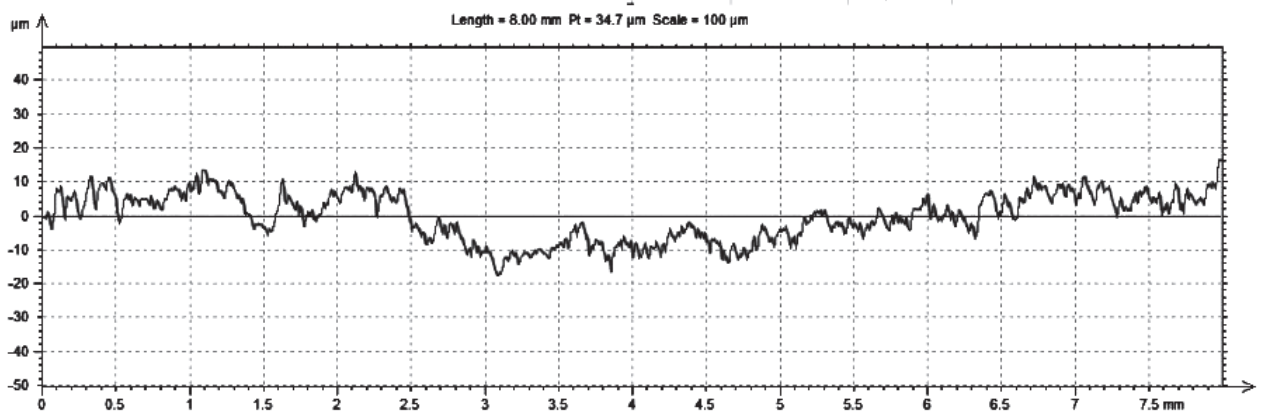
ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rz	14.8	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Ra	2.44	μm	Gaussian filter, 0.8 mm



a)

Подача 5мм/мин. Глубина 15мм

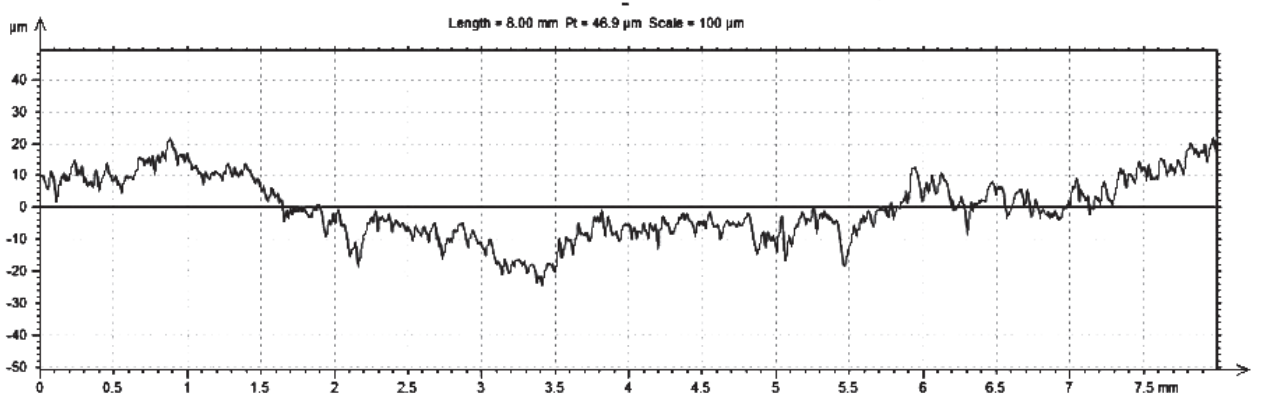
ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rz	12.6	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Ra	2.05	μm	Gaussian filter, 0.8 mm



б)

Подача 5мм/мин. Глубина 30мм

ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rz	14.8	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Ra	2.27	μm	Gaussian filter, 0.8 mm

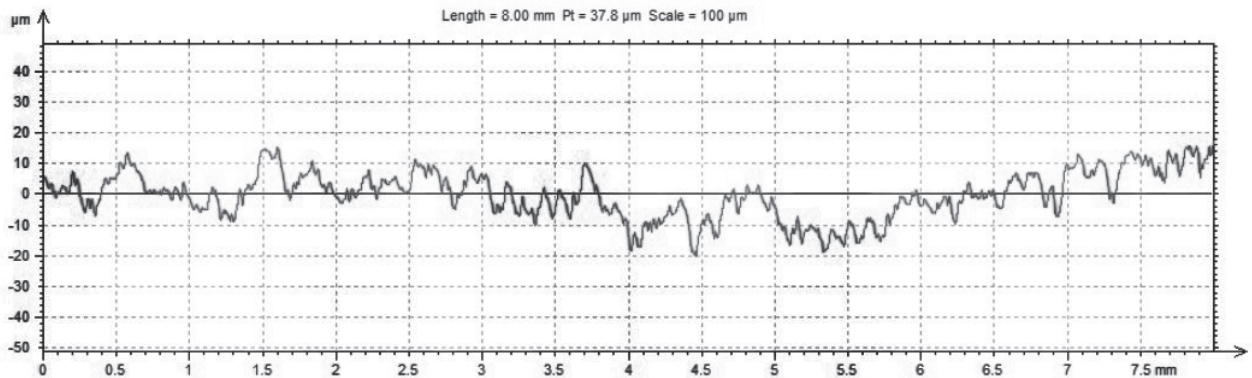


в)

Рис. 4. Профилограмма поверхности реза образца из стали 30ХГСА при подаче 5 мм/мин: а — на глубине реза 5 мм; б — на глубине реза 15 мм; в — на глубине реза 30 мм

Подача 80мм/мин. Глубина 5мм

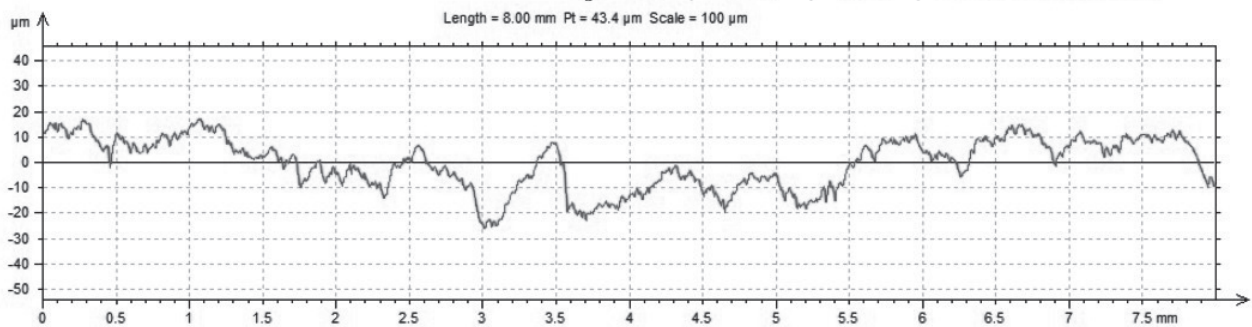
ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rz	15.9	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Ra	2.96	μm	Gaussian filter, 0.8 mm



a)

Подача 80мм/мин. Глубина 15мм

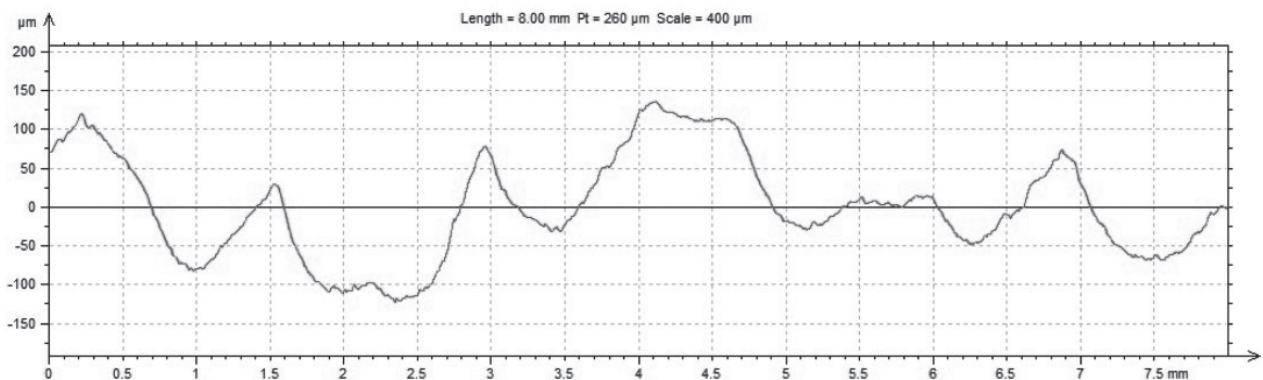
ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rz	15.5	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Ra	2.76	μm	Gaussian filter, 0.8 mm



b)

Подача 80мм/мин. Глубина 30мм

ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rz	42.3	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Ra	10.4	μm	Gaussian filter, 0.8 mm



в)

Рис. 5. Профилограмма поверхности реза образца из стали 30ХГСА при подаче 80 мм/мин: а — на глубине реза 5 мм; б — на глубине реза 15 мм; в — на глубине реза 30 мм

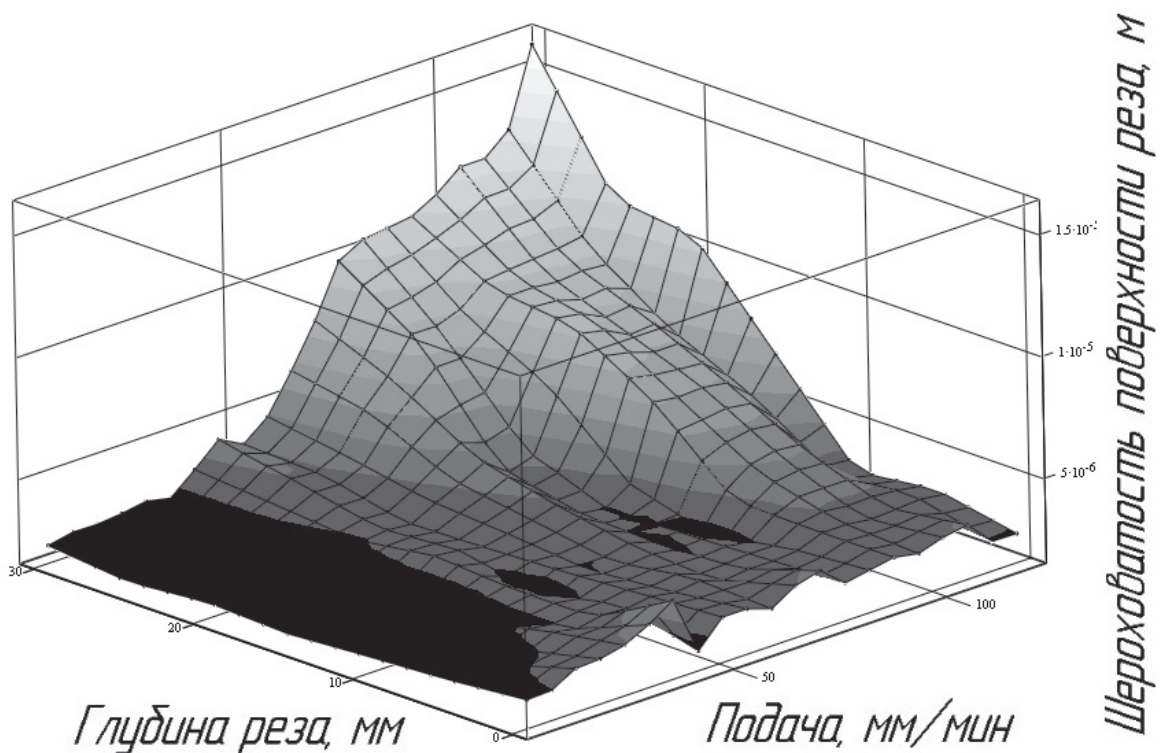


Рис. 6. Зависимость шероховатости поверхности реза от подачи резания и глубины измерения по сечению реза

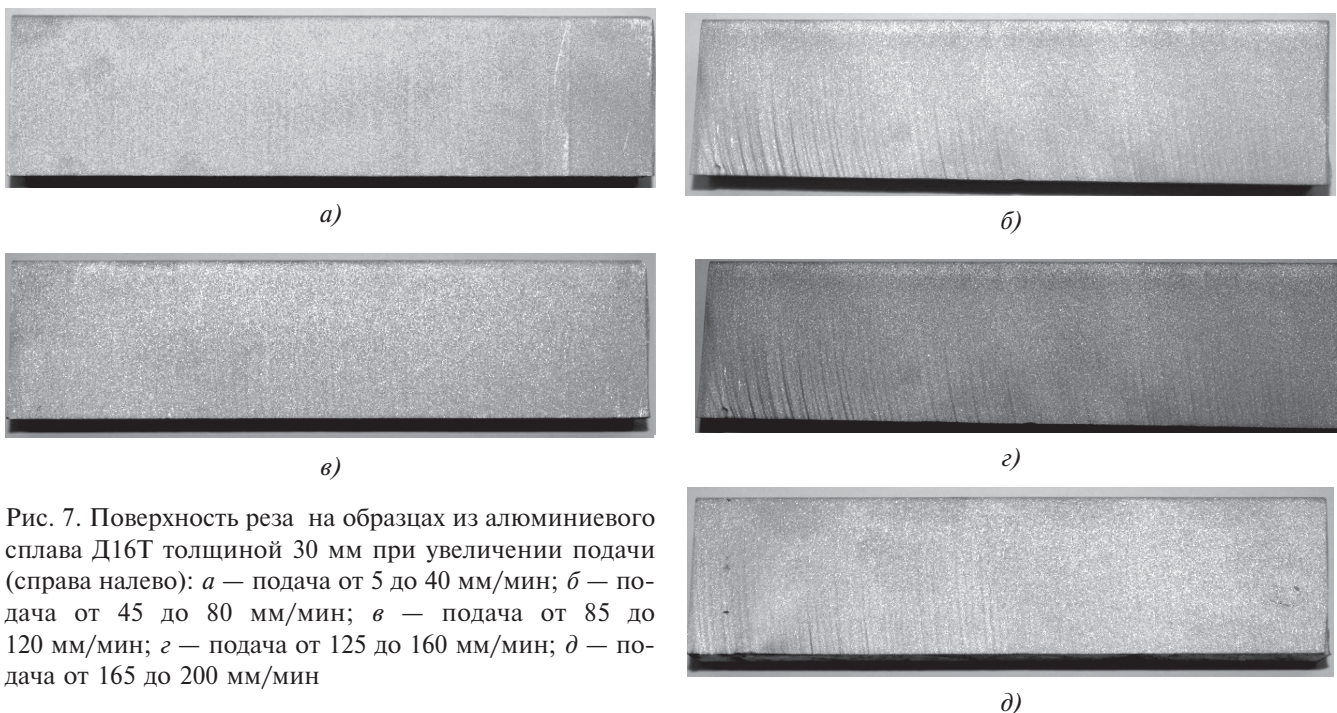


Рис. 7. Поверхность реза на образцах из алюминиевого сплава Д16Т толщиной 30 мм при увеличении подачи (справа налево): а — подача от 5 до 40 мм/мин; б — подача от 45 до 80 мм/мин; в — подача от 85 до 120 мм/мин; г — подача от 125 до 160 мм/мин; д — подача от 165 до 200 мм/мин

$$\sum_{i=1}^{z_{\text{сеч}}} b_i = \sum_{i=1}^{z_{\text{сеч}}} 3,8a_i = 3,8 \sum_{i=1}^{z_{\text{сеч}}} a_i = L_{\text{ед}} \quad (2)$$

Для нахождения глубины царапины a_i в рассматриваемом нормальном сечении детали обратимся к форме единичного следа при обработке свободными абразивами (рис. 10).

За расчетную глубину внедрения частицы можно взять произведение максимально возможной глубины ($h_{\text{max}} - h_i$) на вероятность $P_{\text{вн}}$ внедрения частицы с этой глубиной. Исходя из геометрической вероятности случайного события, искомая вероятность равна отношению площади, ограниченной продольной траекторией данной частицы при ее внедрении, к площади, ограниченной продольной

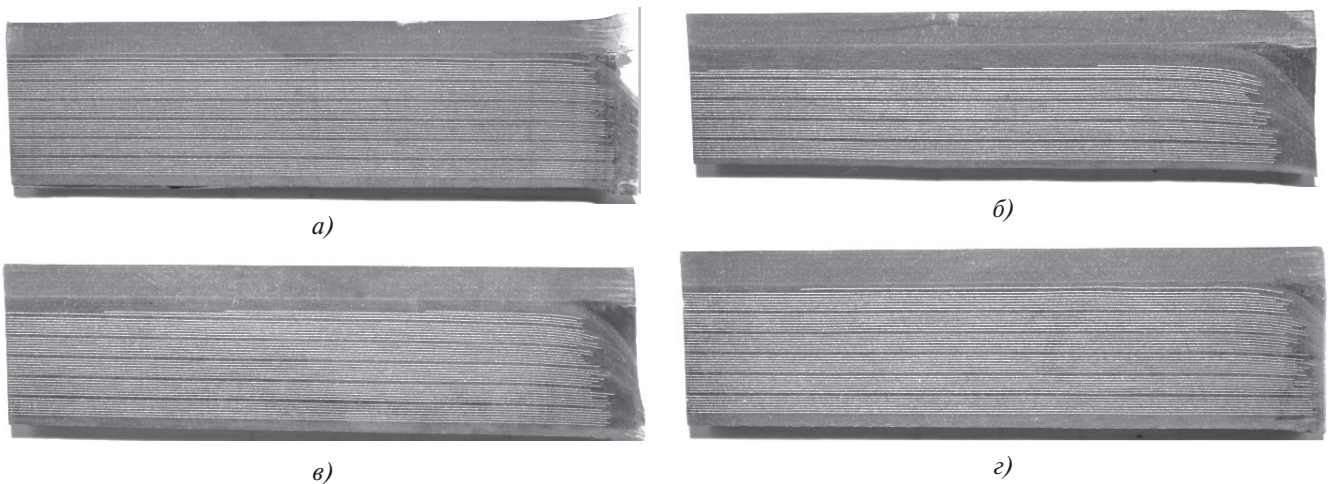


Рис. 8. Поверхность реза на образцах из композитного материала (титановая фольга — стеклопластик) толщиной 30 мм при увеличении подачи (справа налево): а — подача от 5 до 40 мм/мин; б — подача от 45 до 80 мм/мин; в — подача от 85 до 120 мм/мин; г — подача от 125 до 160 мм/мин

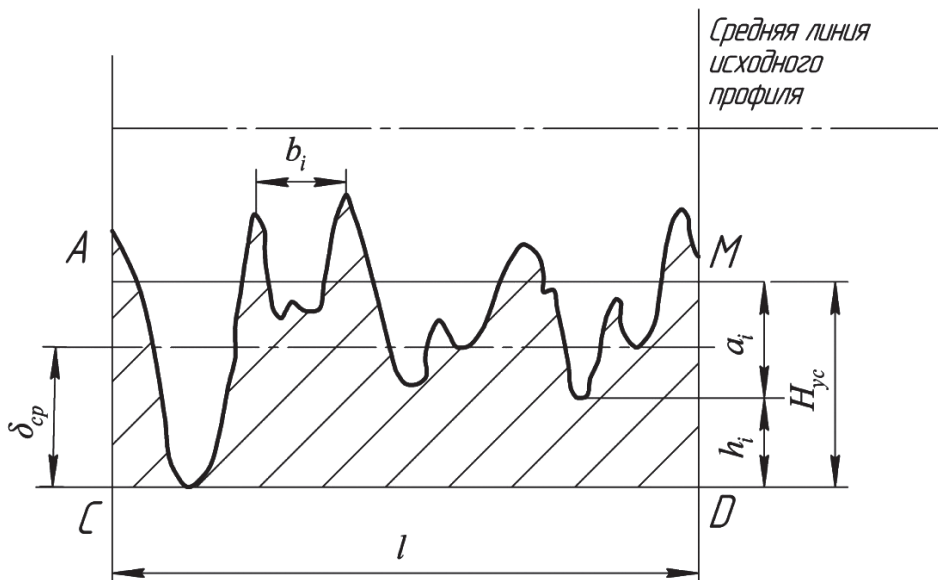


Рис. 9. Схема образования профиля шероховатости поверхности при обработке свободными абразивами

траекторией движения частицы с максимальной глубиной внедрения:

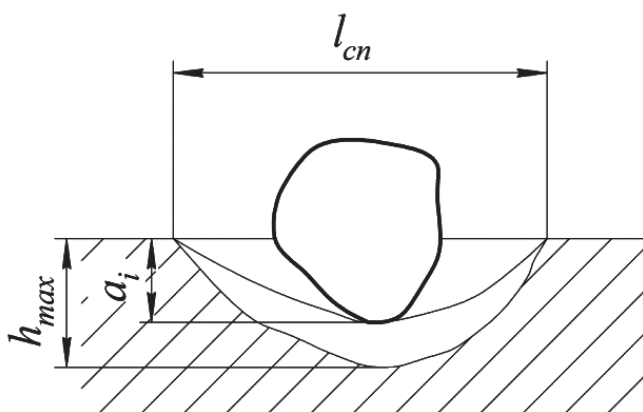


Рис. 10. Схема продольного сечения единичного следа абразивной частицы

$$P_{\text{вн}} = \frac{L_{\text{сп}} (h_{\text{max}} - h_i)}{L_{\text{сл}} h_{\text{max}}} = \frac{h_{\text{max}} - h_i}{h_{\text{max}}};$$

$$a_i = \frac{(h_{\text{max}} - h_i)^2}{h_{\text{max}}} = h_{\text{max}} \left(1 - \frac{h_i}{h_{\text{max}}} \right)^2. \quad (3)$$

Тогда сумма глубин всех царапин, оставленных частицами в нормальном сечении АМСД,

$$\sum_{i=1}^{z_{\text{сеч}}} a_i = h_{\text{max}} \sum_{i=1}^{z_{\text{сеч}}} \left(1 - \frac{h_i}{h_{\text{max}}} \right)^2, \quad (4)$$

где $z_{\text{сеч}}$ — общее число всех зерен, контакт которых возможен с данным нормальным сечением детали.

При достаточно большом значении $z_{\text{сеч}}$ (при прохождении нескольких частиц через данное нормальное сечение детали) от суммирования можно перейти к интегрированию. Для этого выразим величину h_i через соответствующее число зерен z_i , контакт которых возможен с сечением АМСД на глубине h_i . После преобразований получим:

$$h_i = H_0 \left(2 \frac{z_i}{z_0} \right)^{\frac{1}{k}}; \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{z_{\text{сеч}}} \left(1 - \frac{h_i}{h_{\text{max}}} \right)^2 = \int_0^1 \left(1 - \frac{H_0}{h_{\text{max}}} \left(2 \frac{z_i}{z_0} \right)^{\frac{1}{k}} \right)^2 dz_i. \quad (6)$$

Проведем замену:

$$\frac{H_0}{h_{\text{max}}} \left(2 \frac{z_i}{z_0} \right)^{\frac{1}{k}} = \psi, \quad (7)$$

где z_0 — число зерен, проходящих через единичную длину в единицу времени.

После соответствующих преобразований получим:

$$\sum_{i=1}^{z_{\text{сеч}}} \left(1 - \frac{h_i}{h_{\text{max}}} \right)^2 = kz_{\text{сеч}} \int_0^1 (1 - \psi) \psi^{k-1} d\psi. \quad (8)$$

Интеграл представляет собой бэта-функцию. Выразим ее через гамма-функцию:

$$\sum_{i=1}^{z_{\text{сеч}}} \left(1 - \frac{h_i}{h_{\text{max}}} \right)^2 = kz_{\text{сеч}} \frac{\Gamma(3)\Gamma(k)}{\Gamma(k+3)} = 2kz_{\text{сеч}} \frac{\Gamma(k)}{\Gamma(k+3)}. \quad (9)$$

Подставив выражение (9) в (4), получим

$$\sum_{i=1}^{z_{\text{сеч}}} a_i = 2kz_{\text{сеч}} h_{\text{max}} \frac{\Gamma(k)}{\Gamma(k+3)}. \quad (10)$$

С учетом ранее полученных зависимостей имеем

$$\sum_{i=1}^{z_{\text{сеч}}} b_i = 7,6kz_{\text{сеч}} h_{\text{max}} \frac{\Gamma(k)}{\Gamma(k+3)} = L_{\text{ед}}. \quad (11)$$

При этом на уровне АМ (см. рис. 9) определится $z_{\text{сеч}}$ следующим образом:

$$z_{\text{сеч}} = 0,5z_0 \left(\frac{H_{\text{yc}}}{H_0} \right)^k. \quad (12)$$

Подставим полученное выражение в (11):

$$3,8kz_0 \left(\frac{H_{\text{yc}}}{H_0} \right)^k \frac{\Gamma(k)}{\Gamma(k+3)} = L_{\text{ед}}. \quad (13)$$

Учитывая, что значения показателя степени для всех видов абразивной обработки лежат в пределах $1 \leq k \leq 3$ [1], сделаем допущения, что при гидроабразивной резке можно принять $k = 2$. При этом получим

$$7,6z_0 \left(\frac{H_{\text{yc}}}{H_0} \right)^2 \frac{\Gamma(2)}{\Gamma(5)} h_{\text{max}} = L_{\text{ед}}. \quad (14)$$

После соответствующих преобразований имеем следующую зависимость:

$$H_{\text{yc}} = H_0 \sqrt[3]{\frac{L_{\text{ед}}}{0,32h_{\text{max}}z_0}}. \quad (15)$$

Максимальная глубина внедрения частицы

$$h_{\text{max}} = DK_L \sin \alpha \sqrt[3]{\frac{2P_{\text{дин}} \rho_{\text{ч}}}{3c_{\text{р см}} k_s \sigma_s}}. \quad (16)$$

Так как z_0 — это число зерен, проходящих через единичную длину в единицу времени, а λ — это число взаимодействий в единицу времени на площади квадрата упаковки, то через сторону квадрата упаковки $2R$ будет проходить $\sqrt{\lambda}$ частиц, а через единичную длину — в $\frac{L_{\text{ед}}}{2R}$ больше:

$$H_{\text{yc}} = 0,84 \sqrt[3]{\frac{h_{\text{max}} R}{\sqrt{\lambda}}}; \quad (17)$$

$$Ra = 0,13k_{\alpha}^{Ra} \sqrt[3]{\frac{h_{\text{max}} R}{\sqrt{\lambda}}}, \quad (18)$$

где k_{α}^{Ra} — коэффициент, учитывающий угол падения струи.

Для анализа влияния размеров обрабатываемой среды, динамического давления пульпы и механических свойств материала детали на величину Ra при гидроабразивной резке произведем расчеты по зависимости (18).

Таким образом, шероховатость поверхности реза по уровню можно записать в виде зависимости

$$Ra(\lambda) = 2.2 \cdot 10^{-6} + 0.533 \cdot 10^{-10} \cdot K_{\alpha} \times \sqrt{\left[\frac{2(D \cdot K_L \cdot \sin(\alpha) \cdot R)}{\sqrt{\lambda}} \right] \cdot \sqrt{\frac{(9 \cdot P_{\text{дин}} \cdot \rho_x)}{2 \cdot c \cdot \rho_{\text{см}} \cdot K_S \cdot \sigma_S}}} \quad (19)$$

Построим график зависимости шероховатости поверхности от величины подачи режущей струи (рис. 11).

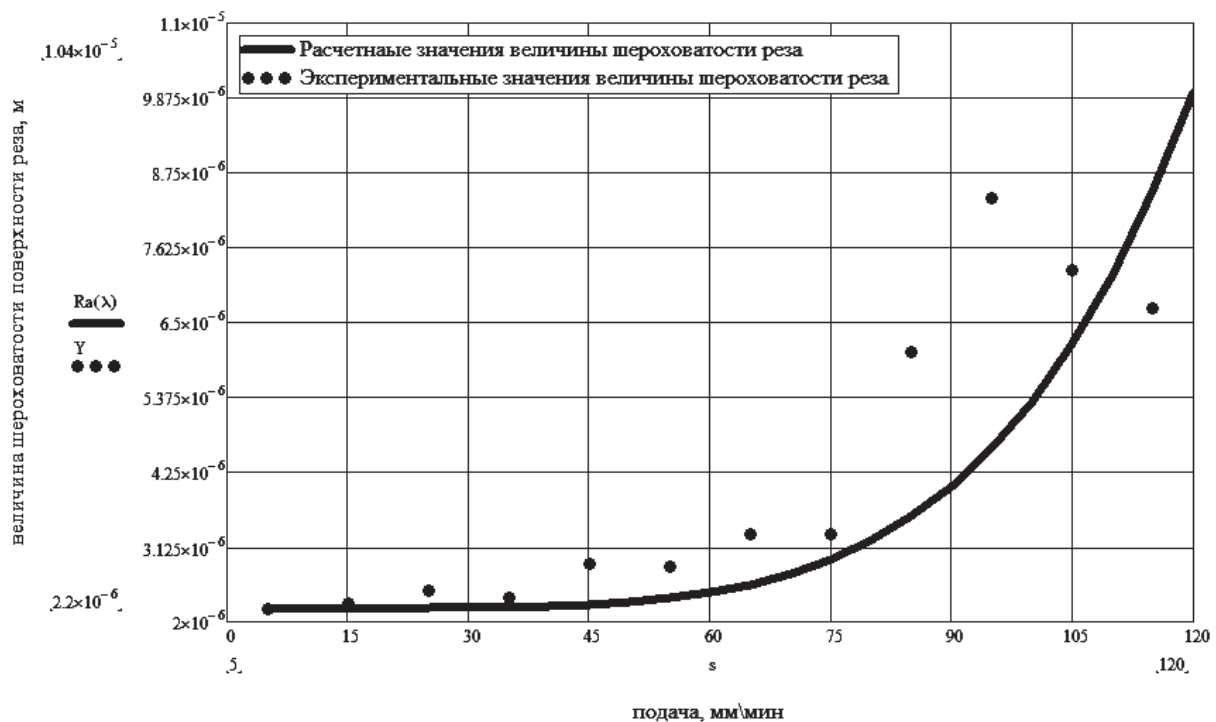


Рис. 11. Зависимость величины шероховатости поверхности реза от величины подачи (линия — теоретическая зависимость, точки — экспериментальные значения)

Выводы

Полученные экспериментальные данные и теоретические зависимости позволяют прогнозировать качество поверхности реза при гидроабразивной резке. Эти данные предоставляют возможность выбора наиболее оптимального режима гидроабразивного резания либо исключения определенного вида дефектов. Возможна оптимизация режимов резания путем замедления подачи в местах образования дефектов, недорезов или неравномерности шероховатости.

Библиографический список

1. *Королев А.В.* Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. — Саратов: СГУ, 1975. — 191 с.
2. *Барсуков Г.В.* Повышение эффективности гидроабразивного резания на основе дискретного регулирования технологической системы: Дисс. ... д-ра техн. наук. — Орел, 2006. — 411 с.

3. *Zeng J., Munoz J.P.* Intelligent Automation of AWJ Cutting for Efficient Production // Proceedings of the 12th International Symposium on Jet Cutting Technology (BHRA, Rouen, France), 1994, pp. 401-408.
4. *Пантелеев А.В., Летова Т.А.* Методы оптимизации в примерах и задачах: Учебное пособие. — М.: Высшая школа, 2005. — 544 с.
5. *Тихомиров Р.А., Бабнин В.Ф., Петухов Е.Н., Стариков И.Д., Ковалев В.А., Тихомиров Р.А.* Гидрорезание

судостроительных материалов. — Л.: Судостроение, 1987. — 164 с.

6. *Билик Ш.М.* Абразивно-жидкостная обработка металлов. — М.: Машгиз, 1960. — 198 с.
7. *Димов Ю.В.* Управление качеством поверхностного слоя детали при обработке абразивными гранулами: Дисс. ... д-ра техн. наук. — Минск, 1987. — 543 с.
8. *Дунин-Барковский И.В., Карташова А.Н.* Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. — М.: Машиностроение, 1978. — 232 с.
9. *Силантьева Е.А., Тихонов А.И.* Ключевые аспекты инновационного развития предприятий оборонно-промышленного комплекса // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 2. С. 195-199.
10. *Чигринцев Е.Г.* Оптимизация процесса сверления армированного титаном стеклопластикового лонжерона лопасти несущего винта вертолета // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 1. С. 177-188.

HEAVY-PLATE MATERIALS WATERJET CUTTING EFFECTIVENESS IMPROVEMENT

Tamarkin M.A. *, Verchenko A.V. **, Kishko A.A. ***

*Don state technical university,
1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, Russia*

** e-mail: tehn_rostov@mail.ru*

*** e-mail: alex290292@mail.ru*

**** e-mail: aleksandr_kishko@mail.ru*

Abstract

A voluminous assortment of parts, characterized by higher requirements to accuracy and reliability, is used while aircraft manufacturing. They are fabricated from various materials, such as steel, aluminum, plastics and composites. Special attention is paid to developing new methods of the parts manufacturing and improvement of conventional technologies.

The majority of the parts is produced by pattern cutting of various materials of 0.5 to 200 mm thickness, followed by their machining or without it. It is interlinked with the development of CNC metalworking Machinery Park, where forged pieces or form workpieces are used in increasing frequency. The main question consists in productivity and quality of cutting blanks. There is a great variety of pattern cutting methods, distinguished by productivity and principles, with peculiar advantages and disadvantages. The authors consider the hydro-abrasive cutting, which is the newest and prospective metal cutting methods.

Hydro-abrasive cutting is the most up-to-date and efficient method for obtaining either blanks or parts from plate aviation materials. The cutting process is carried out by the thin water jet with abrasive grains mixture, emitted at high (supersonic) speed under high pressure up to 6000 bar. Garnet sand with 7.5-8 hardness is used as an abrasive material. The process represents erosion destruction under impact of working jet, where the abrasive cuts the chip's microlayers, while water takes them away from the cutting zone. The main advantages of hydro-abrasive cutting are high productivity ensured for high cutting speed (steel up to 300 mm), the absence of residual strains at the cut edge, the possibility of cutting practically any metal and non-metal as well as the ability of cutting figured profile and irregular shape parts.

Nowadays the process of hydro-abrasive cutting is poorly studied. Theoretical dependencies accounting for all technological parameters effects for the cut ruggedness and corrugation determination, and dependencies reflecting the value of cutting jet lagging.

The quality of hydro-abrasive cutting depends on the feed rate, the thickness and type of cutting material. It was found, that feed increase reduces the quality of cutting, increases ruggedness, and the area of smooth cutting reduces, while the corrugation and obliquity of the cut increases. Defects caused by jet lag cutting, such as formation of a burr on the sharp outer corners, forming holes in the inner corners, overcut and undercut at the beginning of the cut are also found.

The goal of this study was to explore the effect hydro-abrasive cutting modes, namely the feed effect on the cut roughness.

After a row of experiments the samples made of three different materials with 30 mm thickness, namely, steel 30HGSA, aluminum D16, multi-layer polymer composite such as titanium-fiberglass were obtained.

When cutting the feed was changed stepwise from 5 mm/min to 120 mm/min for a sample of steel, to 200 mm/min for samples of D16, and to 160 mm/min for a sample of the composite. The ruggedness of these samples was measured at the specific areas of the cutting section.

Analysis of ruggedness dynamics allowed suggest a mathematical model of cutting surface ruggedness profile forming. The ruggedness is formed by free abrasives, which remove repeatedly the micro-chip layers. The mathematical model is proved by experimental data, as indicated by a graph of the cutting ruggedness dependence from the cutting head feed.

The experimental data and theoretical curves allow predict the cut quality of the hydro-abrasive cutting. Based on this data, the possibility arises to select the most optimal hydro-abrasive cutting mode cutting, or a certain type of defects elimination. The cutting rate optimization is possible by slowing down the feed in areas of defects formation, or ruggedness unevenness.

Keywords: hydro-abrasive cutting, metal erosion destruction, garnet abrasive (sand), abrasive particles with water mixture, abrasive grit, aviation materials, composites, jet cutting head feed, cutting jet pressure, jet cutting lag, cut surface roughness and waviness,

material micro-fracturing, microchip, waterjet nozzle installation.

References

1. Korolev A.V. *Issledovanie protsessov obrazovaniya poverkhnostei instrumenta i detali pri abrazivnoi obrabotke* (The processes of surfaces formation of the tool and the workpiece during abrasive machining study), Saratov, SGU, 1975, 191 p.
2. Barsukov G.V. *Improving the efficiency of waterjet cutting based on the discrete regulation of technological systems* (Improving the efficiency of hydro-abrasive cutting based on discrete regulation of technological systems). Doctor's thesis, Orel, 2006, 411 p.
3. Zeng J., Munoz J.P. Intelligent Automation of AWJ Cutting for Efficient Production. *Proceedings of the 12th International Symposium on Jet Cutting Technology (BHRA, Rouen, France)*, 1994, pp. 401-408.
4. Panteleev A.V., Letova T.A. *Metody optimizatsii v primerakh i zadachakh* (Optimization Methods in examples and problems), Moscow, Vysshaya shkola, 2005, 544 p.
5. Tikhomirov R.A., Babnin V.F., Petukhov E.N., Starikov I.D., Kovalev V.A., Tikhomirov R.A. *Gidrorezanie sudostroitel'nykh materialov* (Shipbuilding materials hydrocutting), Leningrad, Sudostroenie, 1987, 164 p.
6. Bilik Sh.M. *Abrazivno-zhidkostnaya obrabotka metallov* (Waterjet metal processing), Moscow, Mashgiz, 1960, 198 p.
7. Dimov Yu.V. *Upravlenie kachestvom poverkhnostnogo sloya detali pri obrabotke abrazivnymi granulami* (Quality management of a part surface layer while processing with abrasive granules), Doctor's thesis, Minsk, Belorusskii politekhnicheskii institut, 1987, 543 p.
8. Dunin-Barkovskii I.V., Kartashova A.N. *Izmereniya i analiz sherokhovatosti, volnistosti i nekruglosti poverkhnosti* (Measurement and analysis of roughness, waviness and the out-of-roundness of the surface), Moscow, Mashinostroenie, 1978, 232 p.
9. Silant'eva E.A., Tikhonov A.I. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 2, pp. 195-199.
10. Chigrinets E.G. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 177-188.