

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ ЗАГОТОВОК ИЗ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Верченко А.В.^{1*}, Курская И.А.^{2**}, Чигринец Е.Г.^{1***},
Максимов Д.В.^{1****}, Гейко Ю.С.^{1*****}

¹ Ростовский вертолетный производственный комплекс,
Роствертол, ул. Новаторов, 5, Ростов-на-Дону, 344038, Россия

² Донской государственный технический университет,
ДГТУ, пл. Гагарина, 1, Ростов-на-Дону, 344000, Россия

* e-mail: alex290292@mail.ru

** e-mail: ikurskaya@donstu.ru

*** e-mail: egchigrinets@gmail.com

**** e-mail: d.maximov@rostvert.ru

***** e-mail: y.geiko@rostvert.ru

Статья поступила в редакцию 25.12.2018

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса гидроабразивной резки различных материалов. Произведены теоретические исследования возникновения зоны волнистого и гладкого реза. Разработана математическая модель формирования шероховатости поверхности реза по глубине сечения реза. Разработана методика оптимизации процесса гидроабразивной резки. Проведены испытания методики оптимизации в условиях реального производства.

Ключевые слова: гидроабразивная резка, абразив, подача, шероховатость поверхности реза, скорость резки, подача сопла, зернистость абразива, оптимизация, микростружка, зоны реза, давление режущей струи, критерии оптимизации.

Введение

В настоящее время в авиационной и ракетно-космической промышленности идет активное освоение уже существующих и разработка новых летательных аппаратов (ЛА), к которым предъявляются повышенные эксплуатационные требования, требования по надежности, долговечности и т.д. Разработка новых конструкций изделий авиационной и ракетно-космической промышленности основана на использовании передовых достижений в области материаловедения и технологии изготовления деталей. В конструкциях применяются материалы, позволяющие уменьшить массу ЛА, но при этом отвечающие высоким требованиям к прочности, надежности, износостойкости. При обработке подобных материалов возникают трудности в выборе метода и средств, так как помимо качества, получения размерных характеристик и необходимой шероховатости поверхности надлежит выполнить ряд технологических требований, при этом обеспечив наименьшую себе-

стоимость изготовления. В заготовительном производстве при раскрое данных материалов применение механической обработки нецелесообразно ввиду малой производительности, а использование лазерной или плазменной резки невозможно для некоторых типов материалов. Например, эти виды раскроя нельзя применять для раскроя стальных заготовок, так как на кромке образуется грат и он выступает концентратором напряжений, алюминиевые и титановые сплавы нельзя обрабатывать, так как они имеют высокую отражающую способность, а полимеркомпозиционные материалы (ПКМ) расплавляются. Использование гидроабразивной резки для обработки данных видов материалов позволяет оптимизировать соотношение цена – качество реза.

Для авиационной и ракетно-космической промышленности свойственно мелкосерийное производство, а иногда и единичное. С целью уменьшения производственных затрат, а также расширения производственных возможностей модернизируется парк оборудования оборонно-промышлен-

ного комплекса, а также внедряются прогрессивные технологии производства деталей летательных аппаратов. В единичном и опытном производстве изготовление штампованных и литейных заготовок не является рентабельным, ввиду дороговизны изготовления технологической оснастки: штампов, литейной оснастки и прессформ. Срок проектирования и изготовления оснастки составляет несколько месяцев. Поэтому все чаще используют заготовки в виде поковок или вырезают приближенные по контуру детали из толстолистовых плит.

Один из наиболее современных и перспективных методов раскроя и получения готовых деталей — метод гидроабразивной резки. Широкие диапазоны обрабатываемых толщин материалов, возможность резки практически любых материалов, высокая производительность, получение высокого качества поверхности реза, возможность обработки деталей сложной геометрии делают этот метод обработки наиболее востребованным в условиях современного производства ЛА, судостроения и т. д. Отсутствие термического воздействия на материал, низкая сила резания, эрозионный характер разрушения позволяют избежать развития внутренних напряжений в зоне реза [5]. Гидроабразивная резка дает возможность производить обработку как в 3-, так и в 5-координатных осях, получать как заготовки с минимальным припуском, так и готовые детали, детали с разделкой кромок под дальнейшую сварку.

Процесс гидроабразивной резки сложный, малоизученный, на его результат влияет множество технологических параметров, таких, как давление режущей струи, подача сопла, зернистость,

твердость, расход абразива, расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности, физико-механические характеристики обрабатываемого материала. В России не производят оборудование для гидроабразивной обработки. Одними из ведущих производителей являются такие фирмы, как Flow, Waterjet. Данные производители изготавливают оборудование для гидроабразивной резки с ЧПУ. Процесс резки зависит от мощности насоса высокого давления, который нагнетает давление режущей струи (порядка 6000 бар). Струя воды калибруется через дюзу, и далее, попадая в смешивающую трубку, смешивается с абразивом. Трубка выполняется из твердого сплава, и ее ресурс ограничен. Сложность проектирования технологического процесса резки заключается в выборе оптимальных режимов резания, при которых будет обеспечиваться заданное качество поверхностного слоя детали при наименьших затратах. Производители оборудования приводят рекомендуемые параметры обработки в виде таблиц, где представлены лишь некоторые материалы и качество реза делится на четыре группы: разделительный рез, грубый, качественный и тонкий. В данных таблицах отсутствуют соотношение качества реза и шероховатости поверхности реза, а также зависимость размерных характеристик деталей от параметров обработки [18—21].

Помимо достоинств, есть и недостатки у данной технологии, одним из которых является неравномерность распределения шероховатости поверхности реза по глубине сечения, а также ухудшение качества поверхности при увеличении подачи сопла. Поверхность реза условно разделяют на зону гладкого и волнистого реза (рис. 1).

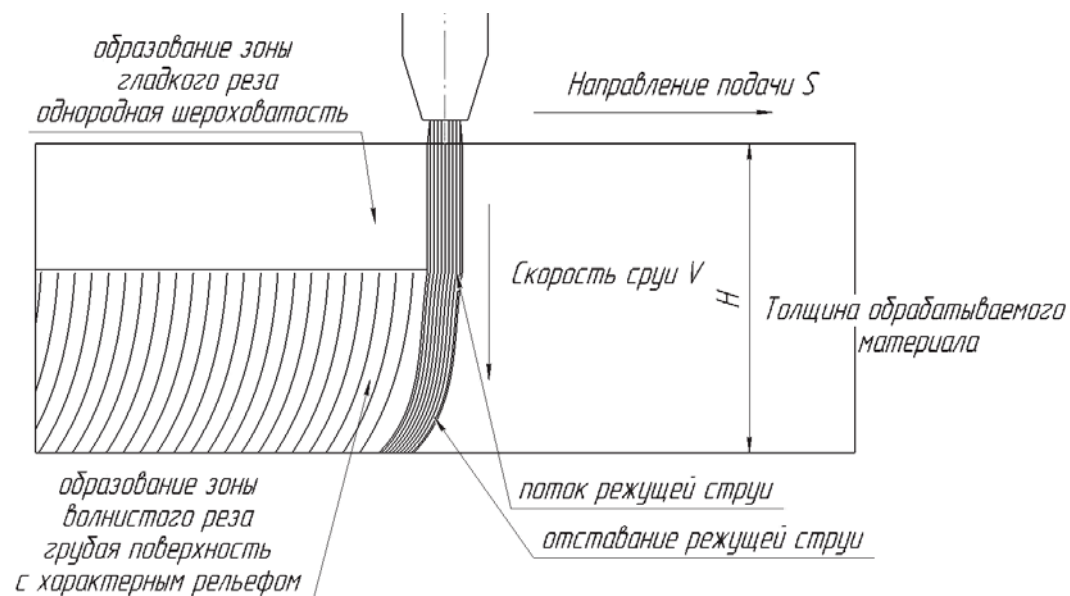


Рис. 1. Схема образования зон гладкого и волнистого реза

У вершины реза образуется гладкая поверхность с равномерной достаточно низкой шероховатостью, а у основания реза образуется поверхность с грубой шероховатостью и волнистостью.

Анализ опубликованных работ показал отсутствие зависимостей шероховатости поверхности реза от основных технологических параметров обработки (давления струи, зернистости, размера, расхода абразива, физико-механических параметров материала и т.д.). Технолог на производстве сталкивается с трудностью определения не только шероховатости поверхности реза, но и размеров зоны гладкого и волнистого реза. Отсутствие адекватных теоретических моделей формирования профиля шероховатости не позволяет оптимизировать процесс резки с учетом требований заданной шероховатости [1, 7, 9—17].

Предлагаемая методика оптимизации процесса резки по заданному значению шероховатости позволяет применять результаты данной работы при разработке технологических процессов на ведущих предприятиях авиастроения, судостроения и общего машиностроения.

Теоретические исследования процесса формирования профиля шероховатости поверхности реза при гидроабразивной резке

На основе методов оптимизации съема металла при единичном взаимодействии абразивного зерна при обработке материала детали свободным абразивом, предложенных М.А. Тамаркиным, а также результатов исследований А.В. Королева по формированию шероховатости при шлифовании получена зависимость формирования профиля шероховатости поверхности реза при гидроабразивной резке [2, 3, 6].

Шероховатость поверхности детали после обработки свободными абразивами представляет

собой совокупность абразивных царапин, оставленных частицами. Неровные края среза (рис. 2) образуются вследствие наложения одной царапины на другую. Если предположить, что частицы абразива оставляют полные срезы, то сумма ширины всех полных срезов на некотором уровне нормального сечения будет равняться 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 АМCD расположатся на одной линии (аналогично процессу шлифования при глубине резания большей H_{yc}).

На уровне, где сумма всех частиц, прошедших через данное сечение детали, равна ширине обрабатываемого участка, расположена средняя линия между вершинами всех неровностей в данном нормальном сечении. Учитывая, что величины $z_{\text{сеч}}$ и $L_{\text{ед}}$ связаны между собой, расчеты произвели на единице длины нормального сечения детали $L_{\text{ед}}$.

Условную высоту неровностей обрабатываемой поверхности определили при условии, что именно на этой высоте выполняется равенство

$$z_i = 0,5z_0 \left(\frac{h_i}{H_0} \right)^k \quad \text{при } 0 \leq h_i \leq H_0, \quad (2)$$

где z_i — число лунок на уровне l_i от отпечатка наибольшей глубины h_{max} ; z_0 — номинальное количество взаимодействующих частиц на рассматриваемом участке рабочей среды; H_0 — разность глубин следов; k — показатель распределения глубины отпечатков.

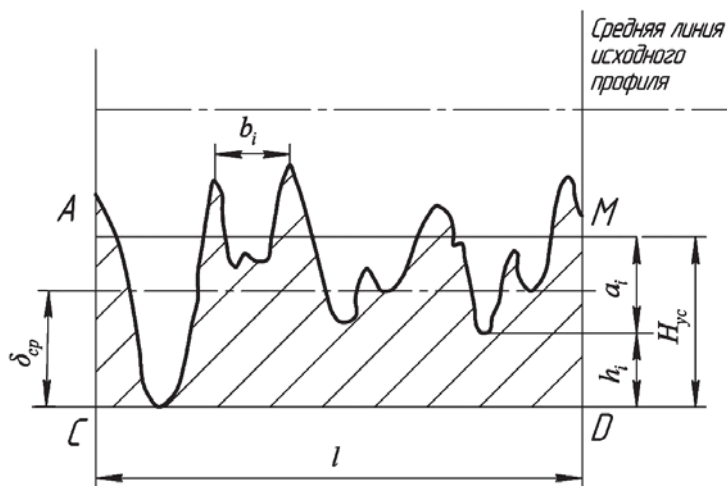


Рис. 2. Схема образования профиля шероховатости поверхности при обработке свободными абразивами

Для расчета шероховатости принимается предельно малый угол внедрения частиц α — до 1° .

Сумма глубин всех царапин, оставленных частицами в нормальном сечении АМСД:

$$\sum_{i=1}^{z_{\text{сеч}}} a_i = h_{\text{max}} \sum_{i=1}^z \left(1 - \frac{h_i}{h_{\text{max}}}\right)^2, \quad (3)$$

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

На уровне АМ $z_{\text{сеч}}$ имеет вид

$$z_{\text{сеч}} = 0,5z_0 \left(\frac{H_{\text{ус}}}{H_0}\right)^k. \quad (4)$$

Величина $H_{\text{ус}}$ определяется зависимостью

$$H_{\text{ус}} = H_0 \sqrt{\frac{L_{\text{ед}}}{0,32h_{\text{max}}z_0}}. \quad (5)$$

Максимальная глубина внедрения частицы описана в работе М.А. Тамаркина, для гидроабразивной резки соответственно примем [6, 8]

$$h_{\text{max}} = DK_L \sin \alpha \sqrt{\frac{2P_{\text{дин}}\rho_{\text{ч}}}{3\rho_{\text{см}}k_s\sigma_s}}, \quad (6)$$

где $\rho_{\text{ч}}$ — плотность материала частиц, кг/м^3 ; k_s — коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхности детали на площадь фактического контакта; $P_{\text{дин}}$ — динамическое давление смеси, Па; $\rho_{\text{см}}$ — плотность рабочей смеси жидкости и частиц, кг/м^3 ; D — диаметр частицы, м; K_L — коэффициент потерь, учитывающий расстояние от сопла до поверхности обрабатываемой детали; c — коэффициент, оценивающий несущую способность контактной поверхности; σ_s — предел прочности материала детали, Па.

Среднее арифметическое отклонение профиля установившейся шероховатости:

$$Ra = \frac{H_0}{3,6} \sqrt{\frac{L_{\text{ед}}}{h_{\text{max}}z_0}}. \quad (7)$$

Экспериментально для гидроабразивной резки значение H_0 невозможно определить. Зернистость абразива, механические свойства обрабатываемого материала и режимы обработки влияют на

H_0 , так же как и на h_{max} . По определению, величина h_{max} выше, чем H_0 . Для гидроабразивной резки приняли:

$$H_0 = \frac{h_{\text{max}}}{2}. \quad (8)$$

Принимается зависимость для расчёта условной высоты и среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости:

$$H_{\text{ус}} = 0,88 \sqrt{\frac{h_{\text{max}}L_{\text{ед}}}{z_0}}, \quad (9)$$

$$Ra = 7,2 \sqrt{\frac{h_{\text{max}}L_{\text{ед}}}{z_0}}. \quad (10)$$

Поскольку вероятность совершения микрорезания частицами в какой-либо фиксированный интервал времени зависит от продолжительности интервала и не зависит ни от начала его отсчета, ни от возможности реализации предыдущих или последующих аналогичных актов, то имеются основания считать рассматриваемый поток событий соответствующим распределению Пуассона. В законе Пуассона λ — интенсивность потока событий. Так как z_0 — число зерен, проходящих через единичную длину в единицу времени, λ — число полезных взаимодействий в единицу времени на площади квадрата упаковки, то через сторону квадрата упаковки $2R$ будет проходить $\sqrt{\lambda}$ частиц, а через единичную длину будет проходить в $\frac{L_{\text{ед}}}{2R}$ больше частиц:

$$H_{\text{ус}} = 1,24 \sqrt{\frac{h_{\text{max}}R}{\sqrt{\lambda}}}, \quad (11)$$

$$Ra = 10,18k_{\alpha}^{Ra} \sqrt{\frac{h_{\text{max}}R}{\sqrt{\lambda}}}, \quad (12)$$

где k_{α}^{Ra} — коэффициент, учитывающий угол падения струи; R — радиус частиц, м.

Формула для определения шероховатости поверхности реза будет иметь вид

$$Ra = 10,18K_{\alpha}^{Ra} \sqrt{2R^2K_L \sin \alpha \sqrt{\frac{2P_{\text{дин}}\rho_{\text{ч}}}{\lambda 3\rho_{\text{см}}K_s\sigma_s}}}. \quad (13)$$

Здесь λ — число полезных взаимодействий в единицу времени на площади квадрата упаковки. Величину λ сложно описать теоретически, поэтому были выполнены экспериментальные исследования. Количество соударений можно представить как функцию от подачи, расхода абразива, глубины измерения шероховатости $\lambda = f(S, Q, h)$.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования выполнялись на базе предприятия РВПК ПАО «Роствертол» на установке 5-координатной гидроабразивной резки «Flow». В качестве абразива использовался гранатовый песок зернистостью 80 мкм.

Измерение шероховатости производили на цифровом профилометре Surtronic 25 фирмы Taylor Hobson. Влияние воздействия воды при резке ПКМ исследовали на дифференциально сканирующем калориметре DSC 200 F3 Maia производства NETZSCH. Для статистической обработки результатов исследований использовалась программа прикладных и научных расчетов MathCad.

В качестве материалов для экспериментальных исследований были выбраны наиболее часто используемые в авиастроении материалы: сталь 30ХГСА в закаленном и незакаленном состоянии (рис. 3 и 4), алюминиевый сплав Д16Т, полимер-

композиционный материал типа «стеклопластик-титан». Исследовалось влияние подачи на шероховатость поверхности реза. Образцы толщиной 30 мм подвергались обработке при ступенчатом увеличении подачи сопла режущей головки от величины 5 мм/мин до того момента, пока не прекратилось сквозное разрезание металла.

Данные экспериментов показывают, что при увеличении подачи сопла ухудшается шероховатость поверхности реза, растет отношение высоты зоны волнистого реза к зоне гладкого реза.

На основании этих данных были выполнены статистическая обработка и регрессионный анализ, в результате чего получены одно- (рис. 5) и двухфакторные уравнения регрессии, которые показывают, как изменяется шероховатость поверхности реза с увеличением подачи сопла S , а также при изменении глубины измерения шероховатости h (рис. 6 и 7).

Однофакторное уравнение регрессии для нахождения величины шероховатости реза на глубине измерения 10 мм в зависимости от подачи S имеет вид

$$Ra_{10} = 2,261 \cdot 10^{-6} + 7,15 \cdot 10^{-9} S + 5,633 \cdot 10^{-11} S^2. \quad (14)$$

Двухфакторное уравнение регрессии для нахождения величины шероховатости поверхности реза в зависимости от подачи S и глубины изме-

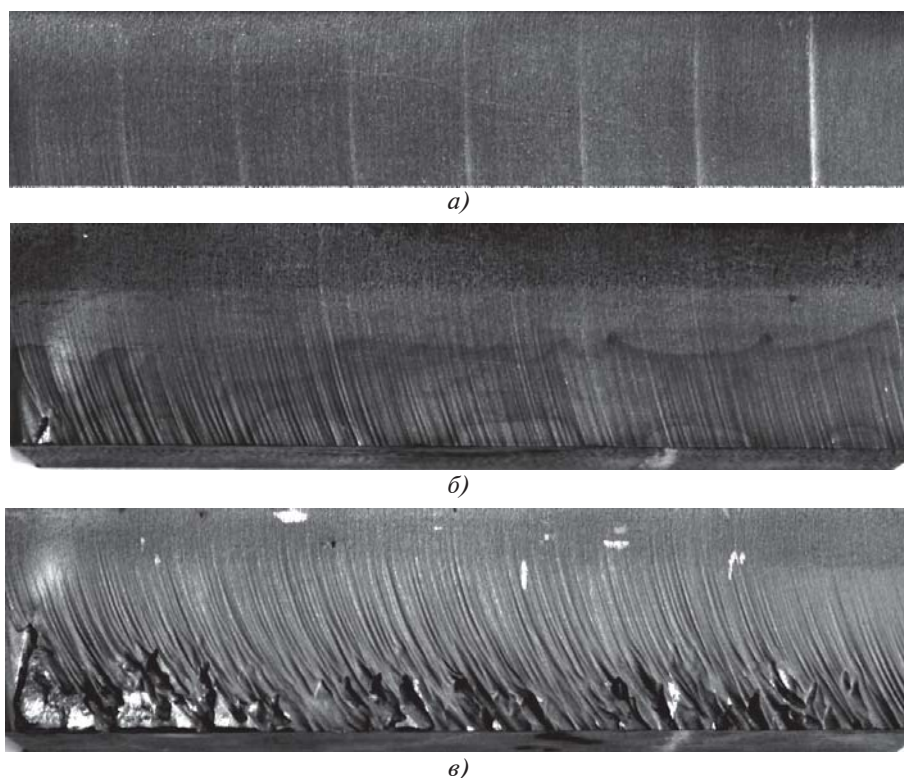


Рис. 3. Поверхность реза образца из стали 30ХГСА толщиной 30 мм при увеличении подачи (справа налево): а — подача от 5 до 40 мм/мин; б — подача от 45 до 80 мм/мин; в — подача от 85 до 120 мм/мин



Рис. 4. Поверхность реза образца из закалённой стали 30XГСА толщиной 30 мм при увеличении подачи (справа налево), подача от 5 до 120 мм/мин

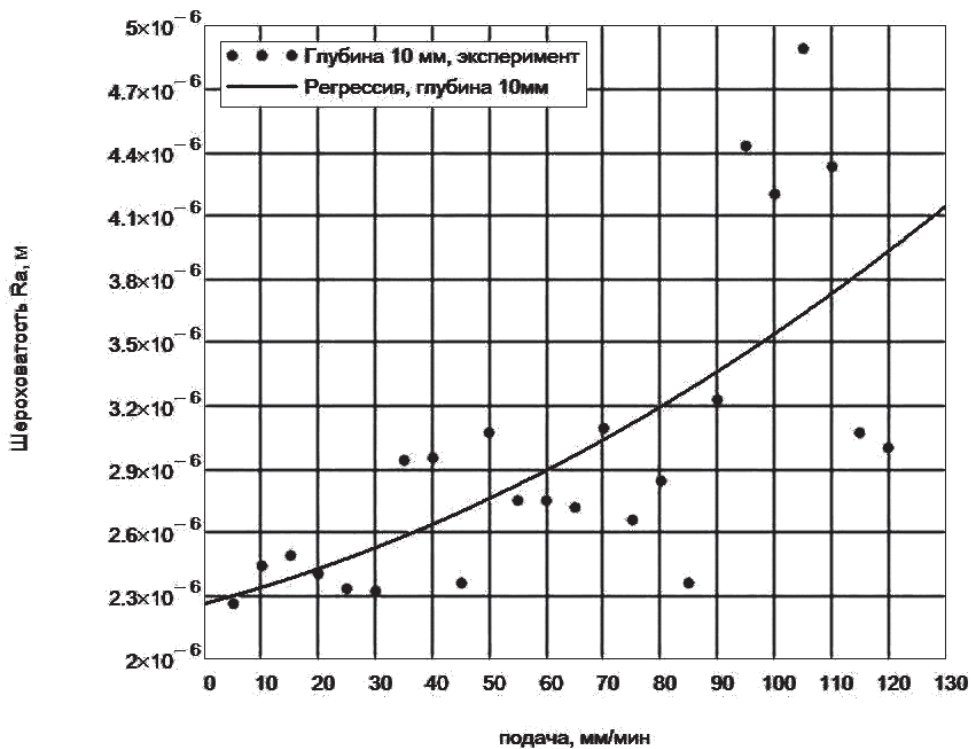


Рис. 5. Зависимость шероховатости поверхности реза стали 30XГСА на глубине 10 мм от подачи

рения шероховатости h для стали 30XГСА в состоянии поставки имеет вид

$$Ra = 3,602 \cdot 10^{-6} - 3,225 \cdot 10^{-8} S - 1,35 \cdot 10^{-7} h - 1,963 \cdot 10^{-9} Sh + 2,439 \cdot 10^{-11} S^2 h +$$

$$+ 9,569 \cdot 10^{-11} Sh^2 + 8,116 \cdot 10^{-10} S^2 + 6,191 \cdot 10^{-11} h^2 - 5,056 \cdot 10^{-12} S^3 - 1,202 \cdot 10^{-10} h^3. \quad (15)$$

Экспериментальные исследования проводили на закаленном материале 30XГСА и алюминиевом

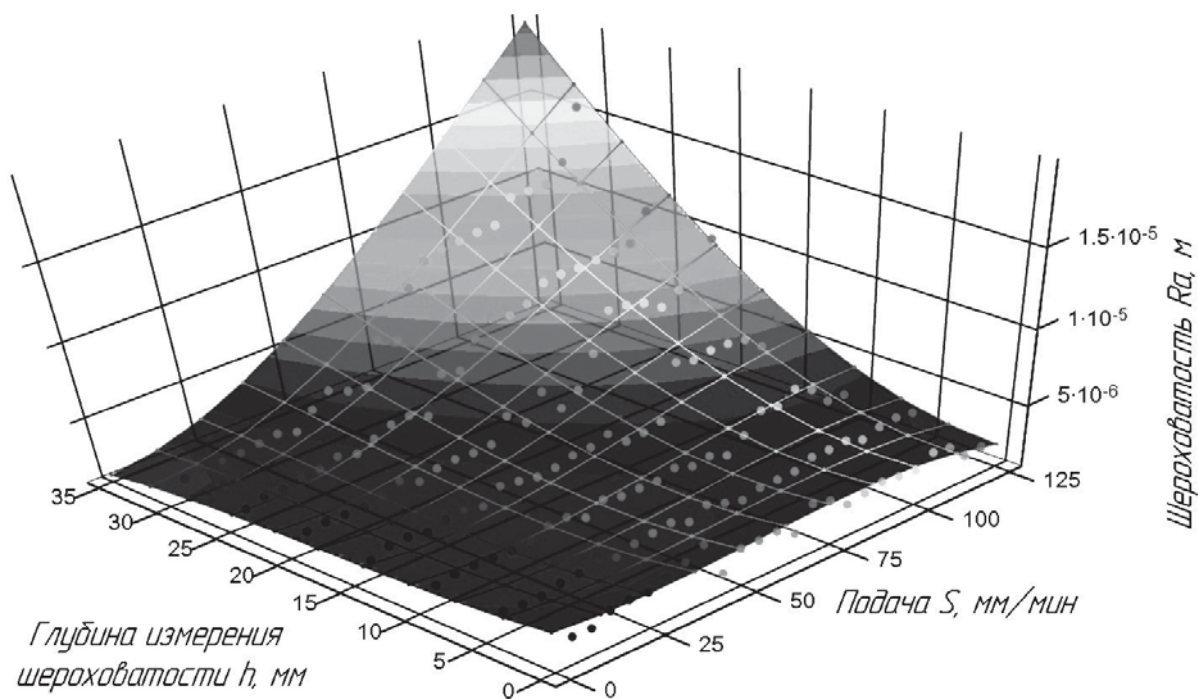


Рис. 6. Зависимость шероховатости поверхности на образце из стали 30ХГСА толщиной 30 мм от подачи сопла и глубины измерения шероховатости

сплаве Д16Т (рис. 7, 8). Установлено, что на более твердых заготовках шероховатость поверхности стремительно возрастает при увеличении подачи, высота зоны волнистого реза преобладает над зоной гладкого реза. На закаленной стали сквозное разрезание материала прекратилось при

более низких значениях подачи, по сравнению с «сырой», нетермообработанной сталью. Такое явление можно описать падением энергетических параметров струи и эффектом «отражения». Соударяясь с более твердым материалом, зерна материала интенсивнее разрушаются, а также боль-

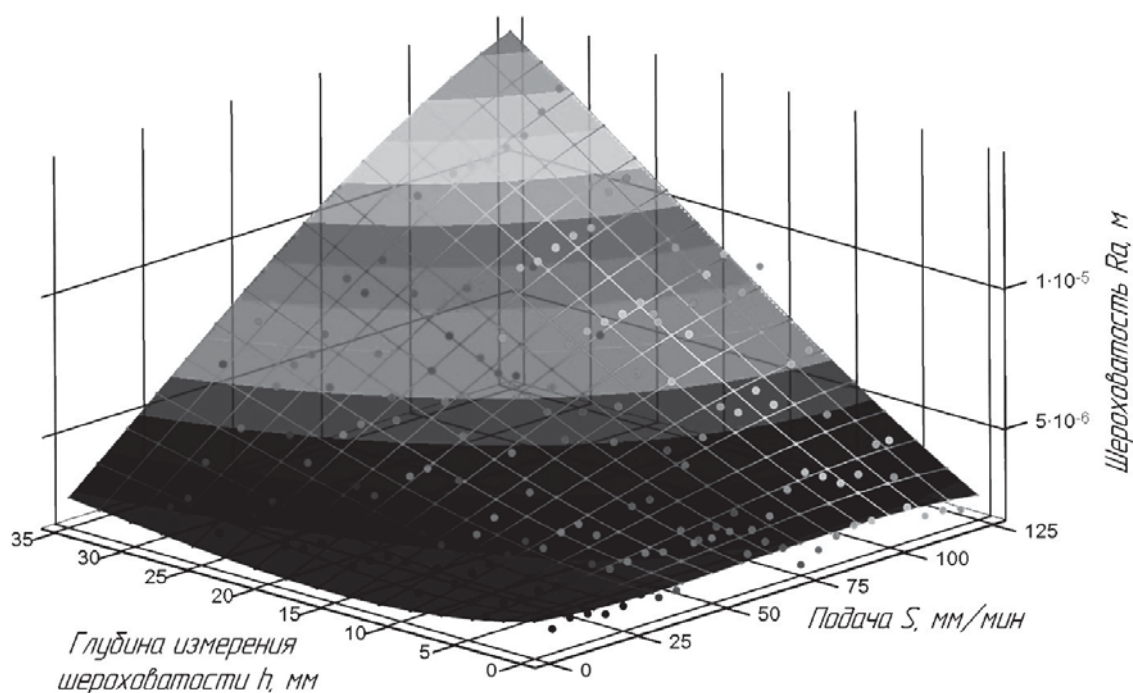


Рис. 7. Зависимость шероховатости поверхности на образце из стали 30ХГСА толщиной 30 мм в термообработанном состоянии от подачи сопла и глубины измерения шероховатости

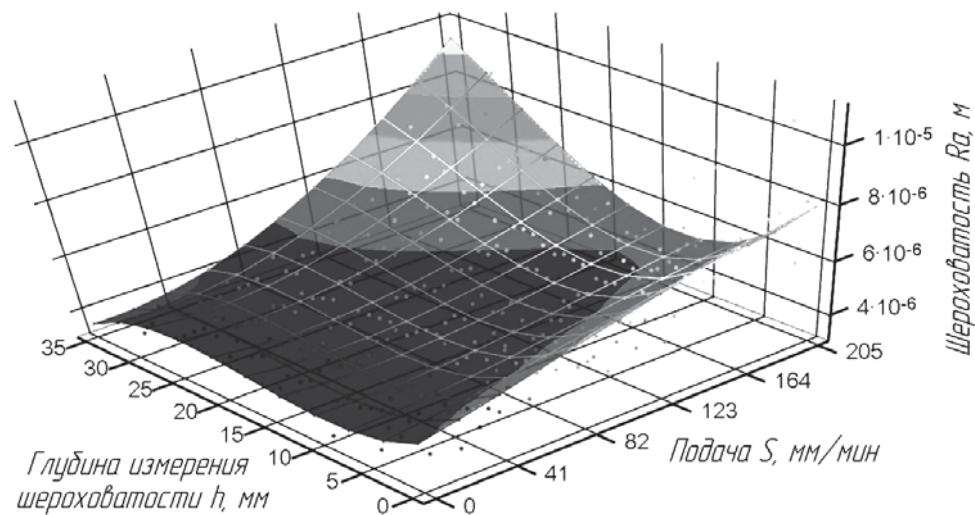


Рис. 8. Зависимость шероховатости поверхности на образце из алюминиевого сплава Д16Т толщиной 30 мм от подачи и глубины измерения

шее количество зерен отскакивает в обратном направлении, не вызывая полезного взаимодействия, тем самым мешая следующим зернам попасть в зону резания.

Двухфакторное уравнение регрессии для нахождения величины шероховатости поверхности реза в зависимости от подачи S и глубины измерения шероховатости h для стали 30ХГСА в термообработанном состоянии имеет вид

$$Ra = 3,091 \cdot 10^{-6} - 1,819 \cdot 10^{-8} S - 1,429 \cdot 10^{-7} h + 4,101 \cdot 10^{-9} Sh - 6,565 \cdot 10^{-12} S^2 h - 1,456 \cdot 10^{-11} Sh^2 + 3,491 \cdot 10^{-10} S^2 + 6,054 \cdot 10^{-9} h^2 - 1,852 \cdot 10^{-12} S^3 - 6,222 \cdot 10^{-11} h^3; \quad (16)$$

$$Ra = 4,882 \cdot 10^{-6} - 1,412 \cdot 10^{-8} S - 1,983 \cdot 10^{-7} h - 2,233 \cdot 10^{-9} Sh + 4,112 \cdot 10^{-12} S^2 h + 5,087 \cdot 10^{-11} Sh^2 + 4,118 \cdot 10^{-11} S^2 + 1,455 \cdot 10^{-8} h^2 - 1,821 \cdot 10^{-13} S^3 - 2,856 \cdot 10^{-10} h^3. \quad (17)$$

Результаты эксперимента показывают, что у вершины реза шероховатость поверхности хуже на материале Д16Т, на ней имеются более глубокие царапины. С увеличением глубины шероховатость поверхности улучшается. Поток частиц стабилизируется, рассеяние частиц уменьшается. При увеличении подачи падает количество взаимодействий частиц с материалом, поэтому шероховатость поверхности ухудшается, остаются глубокие царапины на поверхности реза. Алюминиевый сплав более мягкий материал, и на малых значениях подачи наблюдается образование более глу-

боких царапин по сравнению с обработкой более твердых материалов. Это следствие того, что единичным частицам, которые отклоняются от траектории движения вдоль реза, легче вступить во взаимодействие с материалом. Но при этом процесс резания проходит интенсивнее, металл сильнее поддается абразивному износу, а значит, рост зоны волнистого реза менее стремительный.

Полученная регрессионная модель позволяет определить шероховатость поверхности реза в любой точке по глубине реза, а также определить ширину зоны гладкого и волнистого реза.

Предложен механизм образования зоны волнистого реза.

При увеличении подачи увеличивается угол внедрения частиц в материал детали за счет большего отставания режущей струи. При малых углах внедрения происходит сьем металла, образование равномерной поверхности. С ростом угла количество отраженных частиц растет, уменьшается количество полезных взаимодействий с материалом (рис. 9).

Отраженные частицы препятствуют процессу резания и являются преградой для вновь поступающих в зону резания частиц. При этом происходит непрерывное движение струи в направлении подачи. Угол внедрения растёт, и при достижении определенного отклонения струи процесс сквозного пробития материала возобновляется. При этом частицы, соударяясь друг с другом, отскакивают в сторону и продвигаются в направлении обработанной поверхности, тем самым образуя глубокие борозды. При движении режущей струи по направлению подачи струя отклоняется, угол взаимодействия растёт и пробитие материала повто-

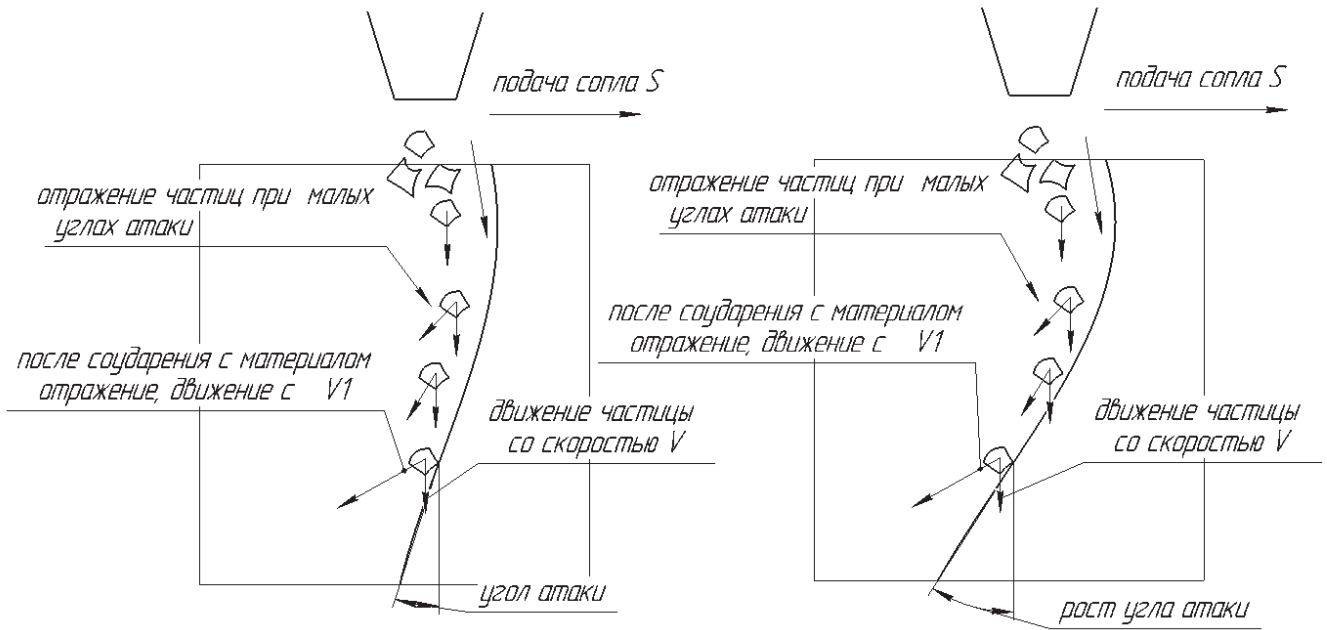


Рис. 9. Схема возникновения зоны волнистого реза

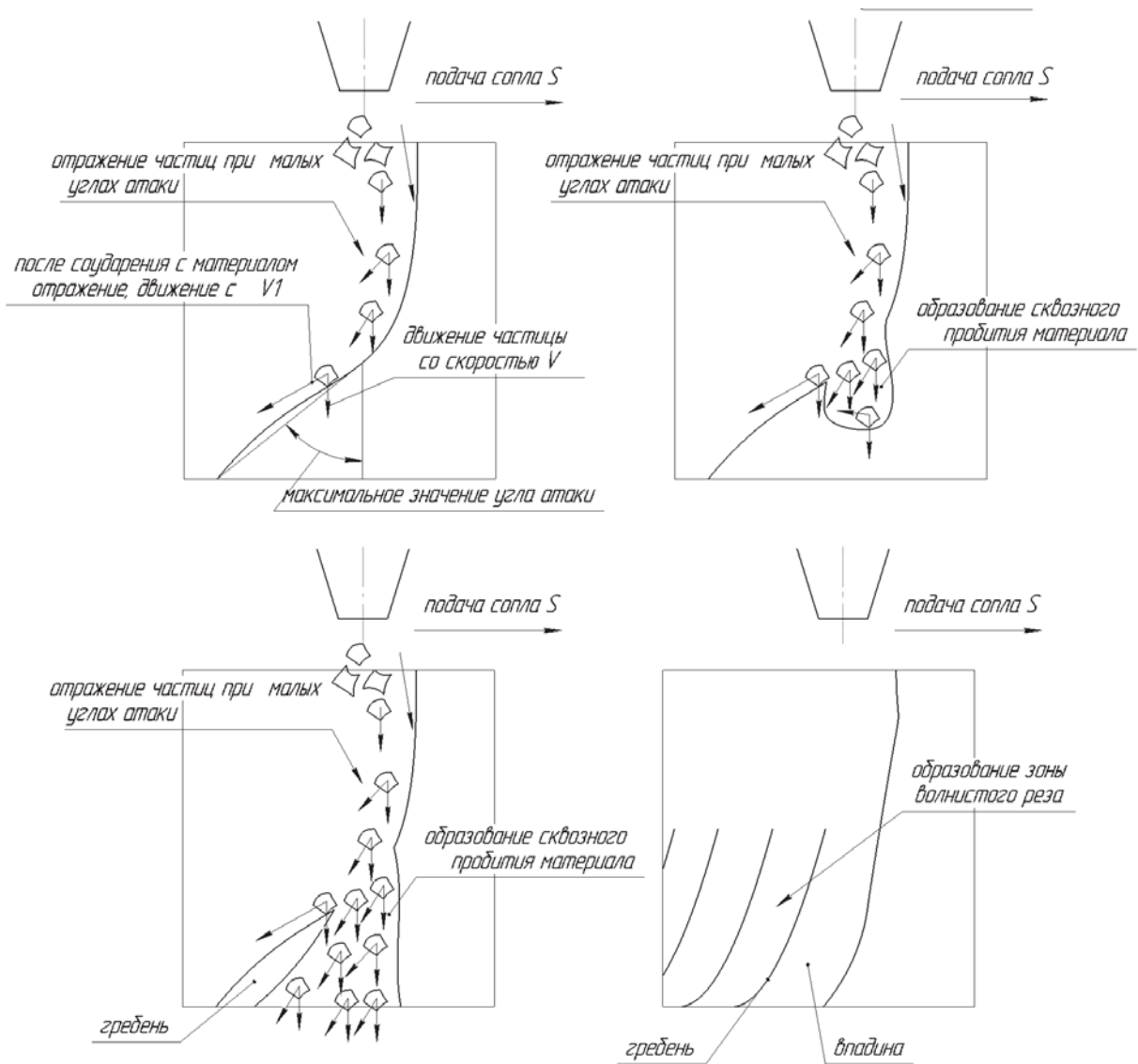


Рис. 10. Схема образования зоны волнистого реза

ряется снова. В результате образуется зона волнистого реза, рельеф которой, состоящий из впадин и гребней, похож на волны (рис. 9 и 10).

В следующих экспериментах провели исследования влияние расхода абразива на шероховатость поверхности реза (рис. 11).

Двухфакторное уравнение регрессии для нахождения величины шероховатости поверхности реза в зависимости от расхода абразива Q и глубины измерения шероховатости h имеет вид

$$Ra = 1,213 \cdot 10^{-4} - 1,222 \cdot 10^{-6} Q + 4,961 \cdot 10^{-6} h - 3,65 \cdot 10^{-8} Qh + 8,78 \cdot 10^{-11} Q^2 h - 2,136 \cdot 10^{-10} Qh^2 + 4,62 \cdot 10^{-19} Q^2 + 3,627 \cdot 10^{-8} h^2 - 7,589 \cdot 10^{-12} S^3 +$$

$$+ 9,706 \cdot 10^{-10} h^3 + 1,233 \cdot 10^{-13} Q^2 h^2 - 6,703 \cdot 10^{-14} Q^3 h + 2,089 \cdot 10^{-12} Qh^3 + 4,572 \cdot 10^{-15} Q^4 + 2,089 \cdot 10^{-12} h^4. \quad (18)$$

Так как все чаще при изготовлении деталей ЛА используются композиционные материалы, провели исследование влияния подачи на шероховатость поверхности реза при обработке ПКМ (рис. 12 и 13). Композиционные материалы трудно поддаются механической обработке, при сверлении или фрезеровании наблюдается расслоение материала, разломачивание краев, что нередко приводит к браку изготавливаемых деталей. Экс-

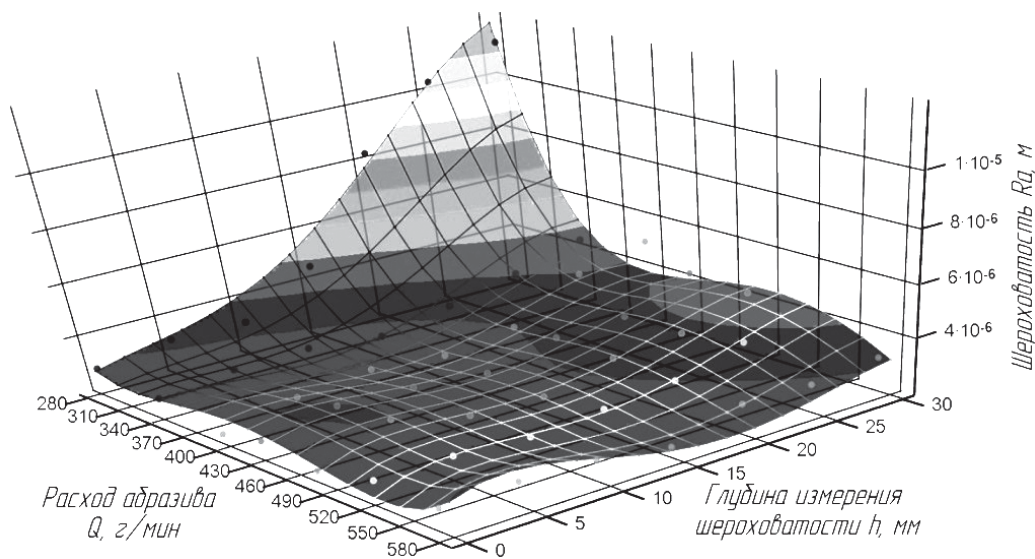


Рис. 11. Зависимость шероховатости поверхности на образце из стали 30ХГСА толщиной 30 мм от расхода абразива и глубины измерения шероховатости

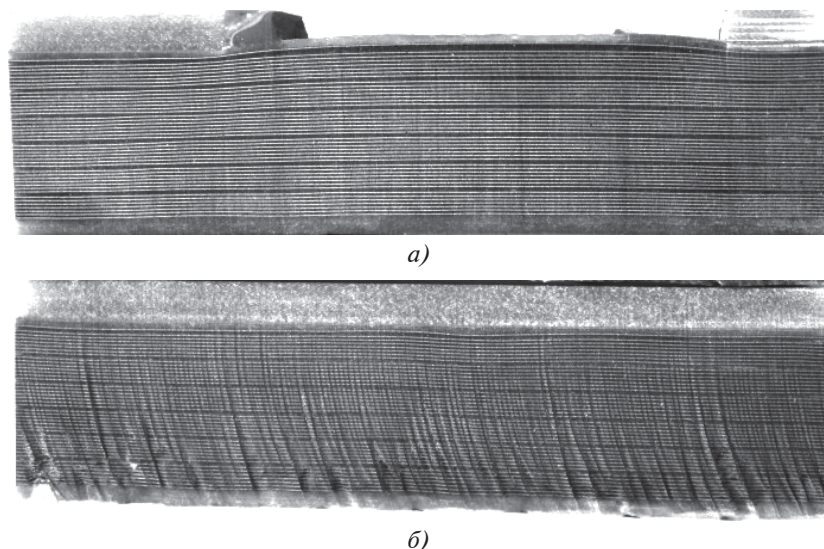


Рис. 12. Поверхность реза образцов из композитного материала типа стеклопластик—титан при увеличении подачи: а — от 5 до 40 мм/мин; б — от 440 до 480 мм/мин

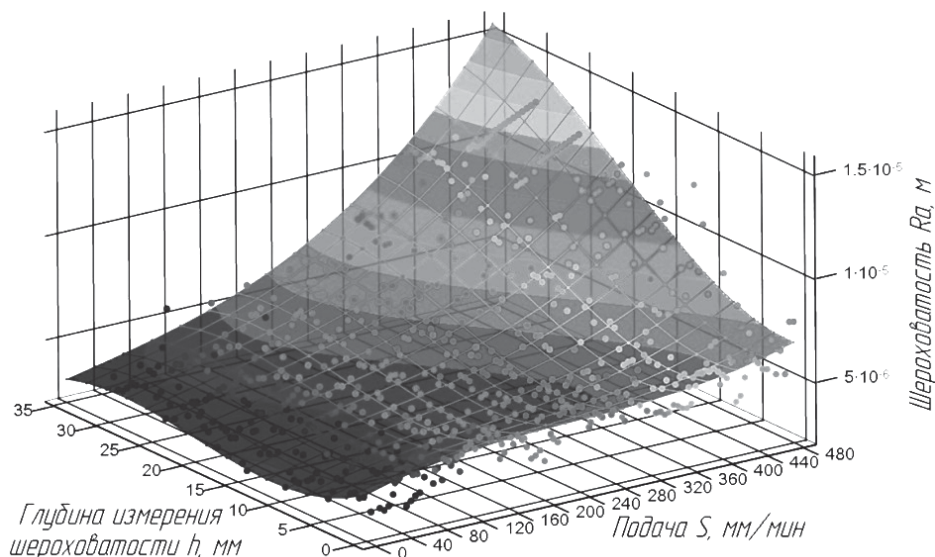


Рис. 13. Двухфакторная модель формирования шероховатости поверхности реза в зависимости от подачи сопла и глубины измерения шероховатости

периментальные исследования проводились на концевой части несущего винта вертолета Ми-28, которая состоит из пакета усиления металлом типа стеклопластик—титан. При гидроабразивной резке расслоения обнаружены лишь в месте техприпуска при пробитии режущей струи материала насквозь.

Двухфакторное уравнение регрессии для нахождения величины шероховатости поверхности реза в зависимости от подачи S и глубины измерения шероховатости h для ПКМ стеклопластик-титан имеет вид

$$Ra = 2,706 \cdot 10^{-13} Sh - 3,157 \cdot 10^{-10} h + 1,886 \cdot 10^{-8} h^2 - 3,062 \cdot 10^{-7} h - 1,301 \cdot 10^{-10} Sh + 1,469 \cdot 10^{-12} S^2 h + 4,288 \cdot 10^{-6} + 1,324 \cdot 10^{-8} S - 5,142 \cdot 10^{-11} S^2 + 7,308 \cdot 10^{-14} S^3. \quad (19)$$

ПКМ на основе стеклопластика очень чувствительны к поглощению влаги, поэтому, для того чтобы убедиться в возможности обработки данного типа материала гидроабразивным способом, применяли метод дифференциально сканирующей калометрии. Для этого сравнивали сухой материал со слоем материала, где происходил контакт с гидроабразивной струей. Исследования проводили как сразу после резки, так и спустя неделю, после высыхания образцов. Слой стружки снимался в зоне 1 мм от края реза.

Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что в процессе резки происходит поглощение воды близлежащими к гидроабразивной струе слоями материала. Об этом свидетельствует изме-

нение температуры перехода материала в другое фазовое состояние. Однако спустя неделю после высыхания материал вновь принимает исходные характеристики (рис. 14). Таким образом, можно считать, что технологию гидроабразивной резки можно применять к ПКМ.

Результатом экспериментальных исследований стало нахождения числа полезных взаимодействий частиц в единицу времени λ , которое рассчиты-

валось по соотношению $\lambda = \frac{Ra_{\text{теор}}}{Ra_{\text{эксп}}}$, так как зна-

чение сложно описать теоретически (рис. 15). В результате исследований были получены функциональные зависимости λ от изменения физико-механических свойств материала, подачи сопла, расхода абразива и изменения высоты измерения шероховатости поверхности реза.

Двухфакторная зависимость λ от подачи S и глубины измерения шероховатости h для стали 30ХГСА в состоянии поставки:

$$\lambda = 9,657 \cdot 10^{-3} Sh^2 + 0,017h^3 - 1,711h^2 + 49,435h - 0,7Sh + 2,214 \cdot 10^{-3} S^2 h + 237,124 - 6,54S + 0,104S^2 - 4,761 \cdot 10^{-4} S^3. \quad (20)$$

Двухфакторная зависимость λ от расхода абразива Q и глубины измерения шероховатости h для стали 30ХГСА в состоянии поставки:

$$\lambda = 7,111 \cdot 10^{-3} Qh - 0,093h^2 - 8,785h - 132,855 + 1,661Q - 1,511 \cdot 10^{-3} Q^2. \quad (21)$$



Рис. 14. Термограмма ПКМ до и после гидроабразивной резки

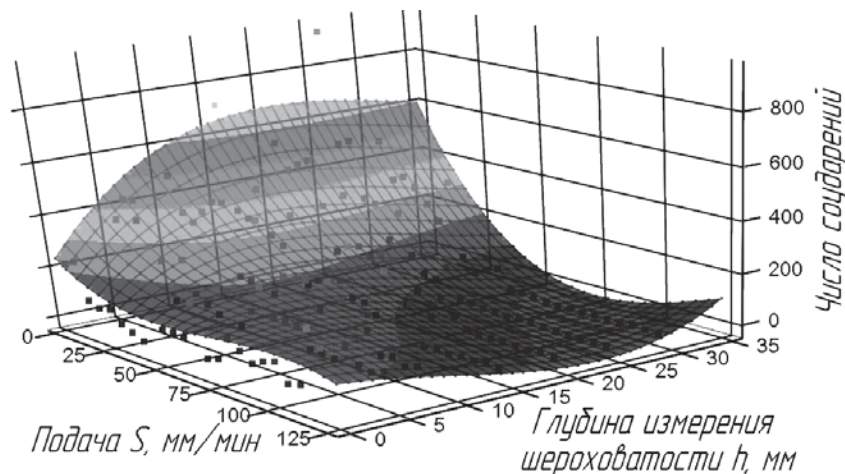


Рис. 15. Определение λ при изменении подачи и изменении глубины измерения шероховатости для материала 30ХГСА твердостью 20HRC

Двухфакторная зависимость λ от подачи S и глубины измерения шероховатости h для стали 30ХГСА в закаленном состоянии:

$$\lambda = 8,613 \cdot 10^{-3} S h^2 + 2,624 \cdot 10^{-3} h^3 - 0,439 h^2 + 7,746 h - 0,352 S h + 4,977 \cdot 10^{-4} S^2 h + 288,04 - 3,655 S - 0,044 S^2 - 1,262 \cdot 10^{-4} S^3. \quad (22)$$

Полученные зависимости позволяют качественно оценить характер взаимодействия абразивных частиц при воздействии на различный материал заготовки при изменении режимов об-

работки и подтверждают вышеупомянутые положения о характере формирования шероховатости поверхности реза.

Приведены расчетные данные по определению шероховатости поверхности реза согласно теоретической модели (рис. 16 и 17).

Полученные теоретические зависимости адекватно описывают процесс формирования шероховатости поверхности. Появляется возможность определить шероховатость поверхности реза на различной глубине, определить, при каких режимах резания отсутствует зона волнистого реза, а при ее появлении определить ее ширину. Разница в результатах теоретических и экспериментальных исследований не превышает 15%.

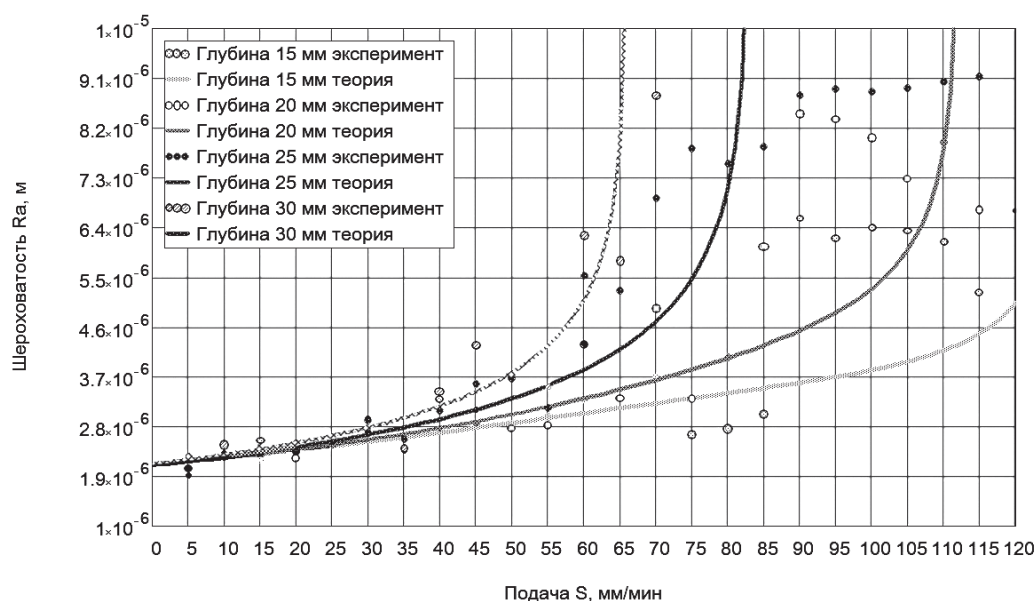


Рис. 16. Шероховатость поверхности реза материала сталь 30ХГСА

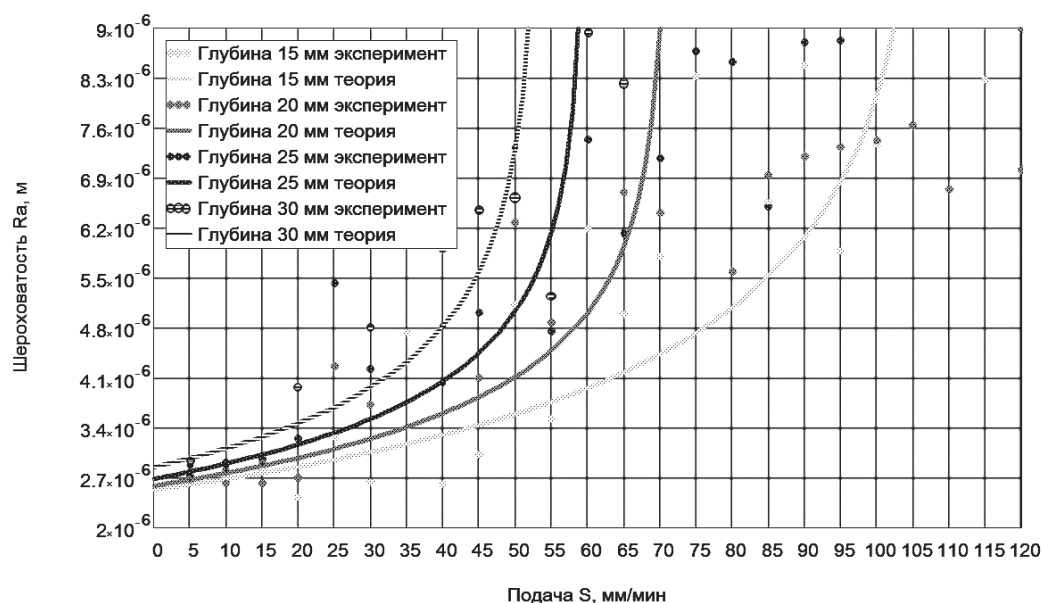


Рис. 17. Шероховатость поверхности реза материала закаленная сталь 30ХГСА при изменении подачи сопла

Практическое применение. Оптимизация гидроабразивной резки деталей

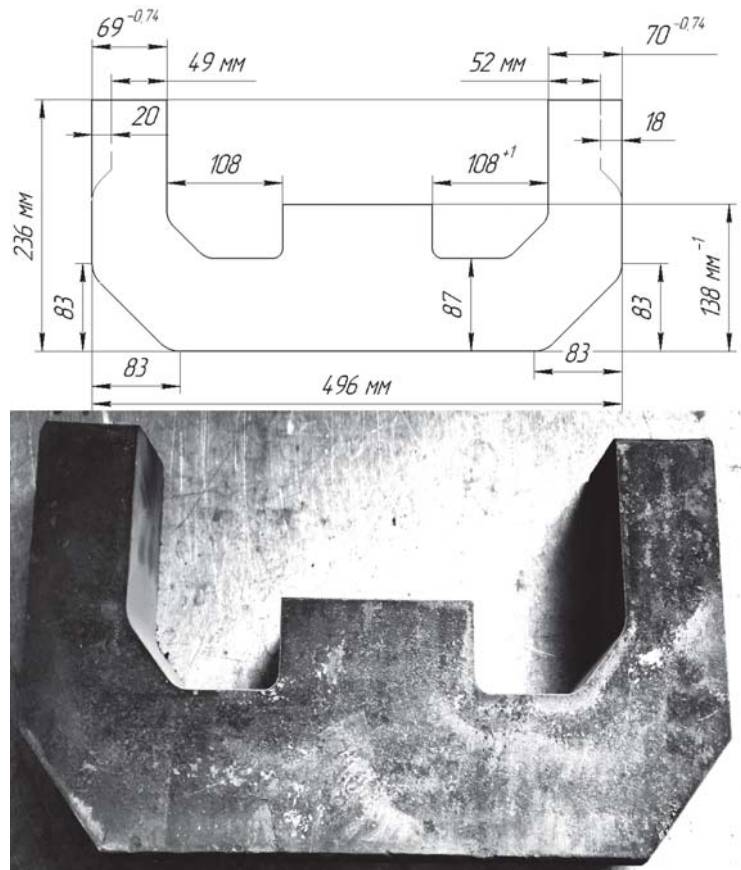
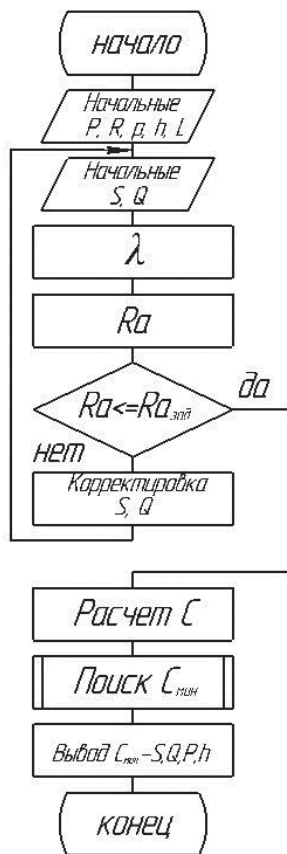
На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований разработана методика проектирования и оптимизации технологических процессов гидроабразивной резки, при учете заданной шероховатости поверхности реза и необходимости минимизации себестоимости реза. Расчет производится по математическим зависимостям, представленным в работе [4]

Оптимизация проводится по критерию наименьшей себестоимости реза. Задавая начальные условия, рассчитывается величина λ , затем Ra .

Отсеиваются те значения параметров обработки, при которых не обеспечивается условие $Ra \leq Ra_{\text{зад}}$. Затем производится расчет себестоимости реза и выбираются те значения параметров обработки, при которых себестоимость будет минимальной (рис. 18,а):

$$C_{\text{реза}} = C_{\text{ам}} + C_{\text{эл.эн}} + C_{\text{возд}} + C_{\text{обсл}} + C_{\text{абр}} + C_{\text{вод}} + C_{\text{н.ч.раб}} \quad (23)$$

Приведен пример оптимизации технологического процесса гидроабразивной резки детали



а)

б)

Рис. 18. Блок-схема алгоритма оптимизации (а); пример обрабатываемой заготовки (б)

Сравнение режимов гидроабразивной резки детали «Скоба» до и после оптимизации процесса

	Исходные данные	Результаты расчета
Обработка до оптимизации согласно серийной технологии	Материал – сталь 30ХГСА, σ_s - 490 МПа; исх. шероховатость R_a – 6,3 мкм; диаметр частиц D – 0,08 мм; давление струи P – 405,3 МПа; расход абразива $Q=395$ г/мин; длина реза $L= 1717$ мм; глубина измерения $h = 30$ мм	Шероховатость: R_a – 2,6 мкм; подача S – 25 мм/мин, время реза $T_{реза}$ – 0,907ч, стоимость реза $C_{реза}$ - 2126руб
Обработка по режимам, предложенным после оптимизации ТП	Материал – сталь 30ХГСА, σ_s - 490 МПа; исх. шероховатость R_a – 6,3 мкм; диаметр частиц D – 0,08 мм; давление струи P – 405,3 МПа; расход абразива $Q=395$ г/мин; длина реза $L= 1717$ мм; глубина измерения $h = 30$ мм	Шероховатость: R_a – 6,126 мкм; подача S – 63 мм/мин, время реза $T_{реза}$ – 0,36ч стоимость реза $C_{реза}$ – 843,51руб

«скоба» вертолета Ми-28, результатом которого являются данные, представленные на рис.18,б.

Выводы

После оптимизации параметров гидроабразивной резки можно сделать следующий вывод: значительно снижается трудоемкость изготовле-

ния детали $T_{\text{реза}}$, а именно в 2,5 раза. Себестоимость обработки детали «скоба» составляет $C_{\text{реза}} = 843,51$ руб., что позволяет предприятию экономить 1286 руб. при изготовлении каждой детали. Применение методики оптимизации технологических процессов гидроабразивной резки прошло промышленные испытания в ц.35 Механического завода РВПК ПАО «Роствертол», что подтверждается наличием акта промышленных испытаний.

Согласно техническим требованиям на изготовление лопасти несущего винта, а также полученным результатам, показана возможность применения гидроабразивной резки для удаления технологического припуска в комлевой части лонжерона несущего винта вертолета Ми-28 как альтернативы черновому фрезерованию. Применение подачи резки в интервале 160—240 мм/мин позволяет сократить трудоемкость на 80% при требуемых показателях качества. В настоящее время разрабатываются мероприятия по внедрению предложенной технологии в серийное производство Лопастного завода ПАО «Роствертол».

Применение разработанной теоретической модели формирования профиля шероховатости по сечению реза позволяет прогнозировать качество обработки в любой точке сечения реза. Технолог имеет возможность прогнозировать высоту зон гладкого или волнистого реза, выбирая величину припуска под дальнейшую чистовую обработку. Теоретические модели подтверждаются результатами экспериментальных исследований. Помимо металлов, показана возможность применения технологии гидроабразивной резки для обработки полимеркомпозиционных материалов, например на основе стеклопластика. Разработанный алгоритм оптимизации технологических процессов гидроабразивной резки позволяет достичь наименьшей себестоимости реза при обеспечении заданных параметров качества поверхности детали.

Библиографический список

1. Барсуков Г.В. Повышение эффективности гидроабразивного резания на основе дискретного регулирования технологической системы: Дисс. ... канд. техн. наук. — Орел, 2006. — 411 с.
2. Билик Ш.М. Абразивно-жидкостная обработка металлов. — М.: Машгиз, 1960. — 198 с.
3. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. — Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. — 191с.

4. Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах: Учеб. пособие. — 2-е изд., испр. — М.: Высш. шк., 2005. — 544 с.
5. Силантьева Е.А. Ключевые аспекты инновационного развития предприятий оборонно-промышленного комплекса // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 2. С. 195-199.
6. Тмаркин М.А. Технологические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами: Дисс. ... доктора технических наук. — Ростов-на-Дону, 1995. — 310 с.
7. Тихомиров Р.А., Бабнин В.Ф., Петухов Е.Н., Стариков И.Д., Ковалев В.А. Гидрорезание судостроительных материалов. — Л.: Судостроение, 1987. — 164 с.
8. Tamarkin M.A. The optimization of theological processes of details processing by free abrasives // Key Engineering Materials. 2005. Vol. 291-292, pp. 319-322.
9. Zeng J., Munoz J.P. Intelligent Automation of Abrasive Water Jet Cutting for Efficient Production // Proceedings of the 12th International Symposium on Jet Cutting Technology (BHRA, Rouen, France), 1994, pp. 401 – 408.
10. Чигринец Е.Н. Оптимизация процесса сверления армированного титаном стеклопластикового лонжерона лопасти несущего винта вертолета // Вестник Московского авиационного института. 2016, Т.23, №1, С. 177-188.
11. Вернадский В.Н. Гидроабразивная разделительная резка // Сварщик. 2000. №3. С. 23-26.
12. Иващенко А.А. Технология гидроабразивной резки // Оборудование и инструмент для профессионалов. 2002. № 8. С. 20-21.
13. Тихомиров Р.А. Высокопроизводительное резание полимерных материалов сверхзвуковыми струями жидкости: Автореферат дисс... д-ра техн. наук. — Владимир: ВГТУ, 1989. — 27 с.
14. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Lebedenko V.G. Surface-layer quality in shot treatment // Russian Engineering Research. 2010. Vol. 30. No. 2, pp. 144-148. DOI: 10.3103/S1068798X10020115
15. Tamarkin M.A., Tikhonov A.A., Tishchenko E.E. Metal removal in hydroabrasive machining // Russian Engineering Research. 2014. Vol. 34. No. 3, pp. 175-177.
16. Степанов Ю.С., Барсуков Г.В. Формирование качества поверхностного слоя деталей при резании сверхзвуковой струей жидкости // СТИН. 2003. №10. С. 15 -17.
17. Тмаркин М.А., Верченко А.В., Кишко А.А. Повышение эффективности гидроабразивной резки толстолистовых авиационных материалов // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 2. С. 104-114.
18. Новиков С.В. Разработка системы показателей успешности реализации целей и задач стратегии предприятия // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 3. С. 192-199.

19. Трошин А.Н., Сёмина Л.В., Николенко Т.Ю. Особенности организации инновационной деятельности на примере авиационного предприятия // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 2. С. 200-207.
20. Степанова Н.В. Модель комплексной реализации концепции импортозамещения в инновационной среде (на примере авиационного двигателестроения) // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 3. С. 146-153.
21. Бологов Д.В., Прокопенко А.В., Сутормин А.Ю., Фетисов Г.П. Финишное плазменное упрочнение инструмента, штампов и пресс-форм // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 2. С. 115-120.

WATER-JET CUTTING PROCESS OPTIMIZATION OF WORK PIECES FROM AIRCRAFT MATERIALS

Verchenko A.V.^{1*}, Kurskaya I.A.^{2}, Chigrinets E.G.^{1***},
Maksimov D.V.^{1****}, Geiko Yu.S.^{1*****}**

¹ Rostvertol Helicopter factory,
Rostvertol, 5, Novatorov str., Rostov-on-Don, 344038, Russia

² Don State Technical University,
DSTU, 1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, Russia

* e-mail: alex290292@mail.ru

** e-mail: ikurskaya@donstu.ru

*** e-mail: egchigrinets@gmail.com

**** e-mail: d.maximov@rostvert.ru

***** e-mail: y.geiko@rostvert.ru

Abstract

Single and small batch production is predominant in parts production for aerospace industry. Stamped blanks and castings manufacturing with small batches is not cost-effective due to the high cost of tooling. Thus, forgings or billet plates made of thick plates that are close to the part's shape are used in increasing frequency as work pieces.

One of the most up-to-date and promising method of cutting and obtaining finished parts is the method of water-jet cutting. It ensures wide ranges of processed material thickness, the ability to cut almost any material, high performance, obtaining high quality cutting surface, the ability to process complex geometry. All this makes this method of processing the most popular in conditions of modern aircraft building, shipbuilding, etc. The absence of thermal impacts on the material, low cutting force, the erosional nature of the destruction do not contribute to the development of internal stresses in the cut zone.

The process of water-jet cutting is complex, poorly understood, which result is affected by many technological parameters such as cutting pressure, nozzle feed, grain, hardness, abrasive consumption, distance from nozzle to the surface being processed, physical and mechanical characteristics of the material

being processed. The design complexity of the cutting technological process consists in selection of optimal cutting conditions, which will ensure the specified quality of the part surface layer at the minimum cost. The production technologist faces the difficulty of determining not only the cutting surface hardness, but the size of the smooth and wavy cut zone as well.

The goal of the work consists in improving the efficiency of the waterjet cutting process by optimizing processing modes based on the development of an adequate theoretical model for the formation of surface roughness at different depths of the cut section.

To achieve this goal the following tasks were solved:

1) Theoretical and experimental studies of the cut surface roughness profile formation depending on the processing parameters;

2) Theoretical studies of the wavy cut zone formation depending on the technological parameters of the process;

3) Development of methods for predicting the quality of the cut surface;

4) Development of methods for optimizing the process of water-jet cutting.

The paper presents the results of theoretical and experimental studies of the surface roughness profile

formation while water jet cutting of various materials, such as 30HGSA steel, hardened 30HGSA steel, D16T aluminum alloy, fiberglass-titanium composite material. A theoretical model for the roughness profile formation of the cut surface was obtained, which shows the dependence of roughness on the main technological parameters of the process (nozzle feed, particle radius, mixture pressure, etc.) depending on the depth measurement of the cut surface roughness. It reflects thereby the distribution of the ratio of the smooth and wavy cut zone. Statistical processing of the studies results was performed using MathCad. The experimental studies result was the obtained dependencies of the number of the particles' useful encounters with a material on the magnitude of the nozzle feed, abrasive consumption, and section depth. One and two-factor regression equations describe the effect of abrasive consumption, nozzle feed, thickness of the material being processed, section depth on the cut surface roughness.

A two-factor regression model for the formation of the roughness profile of the cut from the nozzle feed rate and the roughness measurement depth while polymeric composite materials (PCM) processing of the fiberglass-titanium type was obtained. The material layering and shagging while cutting were not detected, the cut quality was high. To assess the water impact while cutting fiberglass-based PCM, an analysis was performed using differential scanning calorimetry, which resulted in the conclusion that the waterjet cutting technology can be used for PCM processing.

Based on the theoretical and experimental studies results, a for designing and optimizing the technological processes of water-jet cutting technique has been developed, with account for the specified cut surface roughness ensuring and obtaining the minimum cutting costs.

The optimization of the technological process of water-jet cutting of the "Bracket" part of the Mi-28 helicopter was performed, which resulted in a 2.5 times reduction in labor intensity, a cost cut of 843.51 rubles, which allowed the company to save 1286 rubles while each part production. The technique for the water-jet cutting technological process optimization application was undergone industrial tests at the Rostverol plant.

According to the technical requirements for rotor blade manufacturing, as well as the results obtained by the authors, the possibility of hydro-abrasive cutting application for removing the technological allowance in the basis part of Mi-28 helicopter main rotor spar as an alternative to the rough milling was demonstrated. Application of cutting feed within the 160-240 mm / min range min reduces the labor intensity by 80% with the required quality indicators.

At present, measures for the suggested technology introduction into batch production are under development at the PJSC Rosvertol Blade plant

Keywords: waterjet cutting, abrasive, feed, cut surface roughness, cutting speed, nozzle feed, abrasive grit, optimization, microchips, cutting zones, cutting jet pressure, optimization criteria.

References

1. Barsukov G.V. *Povyshenie effektivnosti gidroabrazivnogo rezaniya na osnove diskretnogo regulirovaniya tekhnologicheskoi sistemy* (Improving waterjet cutting efficiency based on the technological system discrete regulation). Doctor's thesis, Orel, Orlovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2006, 411 p.
2. Bilik Sh.M. *Abrazivno-zhidkostnaya obrabotka metallov* (Abrasive-liquid metals processing), Moscow, Mashgiz, 1960, 198 p.
3. Korolev A.V. *Issledovanie protsessov obrazovaniya poverkhnostei instrumenta i detali pri abrazivnoi obrabotke* (The study of the formation processes of the tools surfaces and parts while abrasive machining), Saratov, Saratovskii universitet, 1975, 191 p.
4. Panteleev A.V., Letova T.A. *Metody optimizatsii v primerakh i zadachakh* (Optimization methods in examples and tasks), Moscow, Vysshaya shkola, 2005, 544 p.
5. Silant'eva E.A. Key aspects of defense industry complex enterprises innovative development. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no. 2, pp. 195-199.
6. Tamarkin M.A. *Tekhnologicheskie osnovy optimizatsii protsessov obrabotki detalei svobodnymi abrazivami* (Technological basics for optimizing parts processing by free abrasives). Doctor's thesis, Rostov-na-Donu, Donskoi gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 1995, 310 p. The theoretical basis for optimizing the processing of parts with free abrasives.
7. Tikhomirov R.A., Babnin V.F., Petukhov E.N., Starikov I.D., Kovalev V.A. *Gidrozrezanie sudostroitel'nykh materialov* (Hydro cutting of shipbuilding materials), Leningrad, Sudostroenie, 1987, 164 p.
8. Tamarkin M.A. The optimization of theological processes of details processing by free abrasives. *Key Engineering Materials*, 2005, vol. 291-292, pp. 319-322.
9. Zeng J., Munoz J.P. Intelligent Automation of Abrasive Water Jet Cutting for Efficient Production. *Proceedings of the 12th International Symposium on Jet Cutting Technology (BHRA, Rouen, France)*, 1994, pp. 401-408.
10. Chigrinets E. G. Titanium-reinforced glass fiber plastic main rotor blade beam drilling process optimization. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 177-188.
11. Vernadskii V.N. *Svarshchik*, 2000, no. 3, pp. 23-26.
12. Ivashchenko A.A. *Oborudovanie i instrument dlya professionalov*, 2002, no. 8, pp. 20-21.
13. Tikhomirov P.A. *Vysokoproizvoditel'noe rezanie polimernykh materialov sverkhzvukovymi struyami*

- zhidkosti* (High-performance cutting of polymeric materials for supersonic liquid jets). Doctor's thesis, Vladimir, VGTU, 1989, 27 p.
14. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Lebedenko V.G. Surface-layer quality in shot treatment. *Russian Engineering Research*, 2010, vol. 30, no. 2, pp. 144-148. DOI: 10.3103/S1068798X10020115
 15. Tamarkin M.A., Tikhonov A.A., Tishchenko E.E. Metal removal in hydroabrasive machining. *Russian Engineering Research*, 2014, vol. 34, no. 3, pp. 175-177.
 16. Stepanov Yu.S., Barsukov G.V. *STIN*, 2003, no. 10, pp. 15 -17.
 17. Tamarkin M.A., Verchenko A.V., Kishko A A. Heavy-plate materials waterjet cutting effectiveness improvement. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 2, pp. 104-114.
 18. Novikov S. V. Business strategy goals and problems realization indices system development. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no. 3, pp. 192-199.
 19. Troshin A. N., Semina L. V., Nikolenko T. Y. Innovative activities organization specifics on the example of the aviation company. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no. 2, pp. 200-207.
 20. Stepanova N.V. Model of complex realization of the concept of import substitution in innovative environment (by the example of aviation engine building). *Aerospace MAI Journal*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 146-153.
 21. Bologov D.V., Prokopenko A.V., Sutormin A.Yu., Fetisov G. P. Finishing plasma strengthening of tools, dies and molds. *Aerospace MAI Journal*, 2015, vol. 22, no. 2, pp. 115-120.