

УДК 621-52

DOI:10.30987/2223-4608-2021-8-25-34

**М.А. Тамаркин**, д.т.н.,  
**Э.Э. Тищенко**, к.т.н.,  
**А.В. Верченко**, к.т.н.

(Донской государственной технической университет,  
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)

E-mail: tehn\_rostov@mail.ru

## **Технологические основы обработки полимеркомпозитных деталей гибким абразивным инструментом**

*Представлены результаты исследований процесса абразивной обработки деталей из полимеркомпозитных материалов. Приведены зависимости для определения шероховатости поверхности при гидроабразивной резке полимеркомпозитного материала. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса гидроабразивной резки. Описана методика их проведения, применяемый инструмент и оснастка. Приведены результаты экспериментальных исследований по подготовке деталей из полимеркомпозитных материалов к склеиванию. Предложена методика проектирования технологического процесса абразивной обработки деталей из полимеркомпозитных материалов.*

**Ключевые слова:** обработка полимеркомпозитных материалов; гидроабразивная резка; обработка лепестковыми кругами; шероховатость поверхности.

**M.A. Tamarkin**, Dr. Sc. Tech.,  
**E.E. Tishchenko**, Can. Sc. Tech.,  
**A.V. Verchenko**, Can. Sc. Tech.

(Don State Technical University, 1, Gagarin Square, Rostov-upon-Don, 344000)

## **Technological fundamentals of polymer-composite parts with flexible abrasive tool**

*There are presented investigation results of polymer-composite parts abrasion. The dependences for the definition of surface roughness at polymer-composite material hydro-abrasive cutting are shown. The results of theoretical and experimental investigations of hydro-abrasive cutting processes are presented. A procedure for their carrying out, tool and equipment used is described. The results of experimental investigations on polymer-composite parts preparation to splicing are shown. A procedure for designing a technological process of polymer-composite parts abrasion is offered.*

**Keywords:** polymer-composite material processing; hydro-abrasive cutting; processing with leaf disks; surface roughness.

В современных условиях машиностроение должно обеспечивать повышение производительности труда и улучшение качества выпускаемой продукции. Для решения этих задач широко применяются новые малоизученные методы обработки, внедрение которых в производство часто требует выполнения комплексных теоретических и экспериментальных исследований. Следует также учитывать,

что значительное повышение качества и эксплуатационных свойств деталей происходит при замене металлов и их сплавов на полимеркомпозитные материалы (ПКМ). Применение ПКМ позволяет значительно повысить физико-механические свойства деталей с одновременным уменьшением их массы.

Поверхностный слой детали из ПКМ обычно состоит из отвержденного связующего ма-

териала. При этом слои основы располагаются ниже. Тонкий поверхностный слой связующего материала может содержать вещества, образующиеся в результате химических реакций отверждения связующего, что может привести к повышенному износу деталей и ПКМ [1, 2].

Применение ПКМ особенно актуально при производстве ответственных деталей машин в производстве летательных аппаратов (рис. 1)



(лопасти несущих и рулевых винтов вертолетов; панели крыла; корпусные детали фюзеляжа; стрингеры; лонжероны и т.п.), приборов (изоляторы; заглушки трубопроводов; предохраняющие фланцы; контакты; разъемы и др.), деталей дорожно-строительной и автомобильной техники (фланцы; ручки; штуцеры и др.). Также детали из ПКМ нашли широкое применение в бытовых приборах и устройствах.



Рис. 1. Корпусные детали из ПКМ

Указанный недостаток обычно исправляют путем механической обработки. При этом имеют место образования таких дефектов, как расслоение, разломачивание волокон, прижоги и разрушение материала. Значительная часть этих дефектов образуется невозможностью использования смазочно-охлаждающих технологических сред в связи с тем, что материал поглощает влагу.

На большинстве предприятий, где производятся детали из полимеркомпозитов, технологический процесс их механической обработки состоит из раскроя листа и дальнейшей механической обработки заготовки. Часто полимеркомпозитные детали подвергают склеиванию, для которого необходима тщательная подготовка поверхностного слоя. В данной работе проведены исследования формирования качества поверхности при гидроабразивной резке ПКМ, а также при подготовке его поверхности к дальнейшему склеиванию.

В настоящее время для раскроя деталей из ПКМ широко применяется гидроабразивная резка листового материала. Она имеет широкие технологические возможности, позволяющие обеспечить высокое качество обрабатываемых поверхностей, значительное повышение производительности труда, обработку деталей сложной формы.

Важными преимуществами гидроабразивной резки является её низкотемпературный характер, малые усилия резания, эрозионный характер разрушения, способствующий отсутствию внутренних напряжений поверхностного слоя. Она также позволяет значительно уменьшить припуск на дальнейшую обработку и обеспечить высокую точность поверхности реза. Однако технологический процесс гидроабразивной резки мало изучен. 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 полимеркомпозита.

При технологическом проектировании значительную сложность представляют выбор оптимальных режимов обработки для обеспечения высокой производительности и требуемого качества поверхностного слоя детали.

Учитывая большое разнообразие сочетаний связующего материала и материала основы при внедрении гидроабразивной резки в производство деталей из ПКМ необходимо провести исследования влияния охлаждающей жидкости на качество поверхности реза. В литературе имеются данные, что сверхзвуковая

струя охлаждающей жидкости с абразивными зёрнами обладает очень высокой энергией и что её воздействие приближается к воздействию твёрдого абразивного инструмента. При этом поглощение воды не происходит, либо значительно снижается [1 – 12].

При использовании гидроабразивной резки для обработки деталей из различных материалов на поверхности реза обычно возникают две отслеживаемые зоны. Первая из них имеет низкую шероховатость поверхности (зона гладкого реза), вторая имеет гораздо более грубую шероховатость (зона волнистого реза.) [3 – 7]. Эти зоны образуются тем, что использование высоких скоростей подачи сопла приводит к возрастанию угла атаки абразивных зёрен. Значительное количество зёрен при этом отражаются от материала в зоне резания и препятствуют проникновению следующих зёрен. При этом в зоне гладкого реза проникновению режущих зёрен не оказывается значительного сопротивления.

При технологическом проектировании технологу очень важно прогнозировать размеры и шероховатость каждой зоны. Такое знание обеспечит либо незначительную величину зоны волнистого реза, либо её полное отсутствие, а также будет способствовать снижению величины припуска на дальнейшую обработку.

Проведенные на кафедре «Технология машиностроения» ДГТУ теоретические исследования процесса обработки детали из ПКМ позволили выявить закономерности влияния

технологических параметров на качество обрабатываемой поверхности и соотношение зон гладкого и волнистого реза. Максимальная глубина внедрения абразивных зёрен описывается следующим соотношением [3 – 7]:

$$h_{\max} = DK_L \sin \alpha \sqrt{\frac{2P_{\text{дин}}\rho_{\text{ч}}}{3c\rho_{\text{см}}k_s\sigma_s}}, \quad (1)$$

где  $\rho_{\text{ч}}$  – плотность материала частиц;  $k_s$  – коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхности детали на площадь фактического контакта;  $P_{\text{дин}}$  – динамическое давление смеси;  $\rho_{\text{см}}$  – плотность рабочей смеси жидкости и частиц;  $\sigma_s$  – предел текучести материала детали;  $D$  – диаметр частицы;  $K_L$  – коэффициент потерь, учитывающий расстояние от сопла до поверхности обрабатываемой детали;  $c$  – коэффициент, оценивающий несущую способность контактной поверхности;  $\alpha$  – угол встречи частицы с поверхностью детали.

Влияние потока абразивных зёрен и охлаждающей жидкости может быть описано законом Пуассона, где  $\lambda$  – интенсивность потока событий. Примем, что  $\lambda$  – это число полезных взаимодействий в единицу времени на площади квадрата упаковки. Тогда через сторону квадрата упаковки  $2R$  будет проходить  $\sqrt{\lambda}$  частиц, а через единичную длину будет проходить  $L_{\text{ед}}/2R$  частиц. При этом среднее арифметическое отклонения профиля установившейся шероховатости может быть определено по зависимости [3 – 7]:

$$Ra = 13,01K_{\alpha}^{Ra} \cdot R \sqrt{K_L \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{дин}}\rho_{\text{ч}}}{\lambda \cdot c \cdot \rho_{\text{см}} \cdot k_s \cdot \sigma_s}}}, \quad (2)$$

где  $K_{\alpha}^{Ra}$  – коэффициент, учитывающий угол падения струи;  $R$  – радиус частицы.

Число соударений, приводящих к микрорезанию  $\lambda$  можно представить как функцию от подачи, расхода абразива, глубины измерения шероховатости  $\lambda = f(S, Q, h)$ . Величину  $\lambda$  сложно описать теоретически, поэтому были выполнены экспериментальные исследования для нахождения комплекса регрессионных зависимостей для её определения.

Проведение экспериментальных исследований производилось на машиностроительном предприятии на пятикоординатном станке для гидроабразивной резки фирмы «Flow». Материал образцов – стеклопластик ВПС-7, армированный титановой фольгой ОТ4-0-0,1×220. В качестве режущей среды использовалась

водяная струя с гранатовым песком.

Шероховатость поверхности контролировалась цифровым профилометром Surtronic 25 фирмы Taylor Hobson. Увлажнение поверхностного слоя исследовалось с использованием дифференциально сканирующего калориметра DSC 200 F3 Maia производства NETZSCH. Результаты экспериментальных исследований прошли статистическую обработку с использованием программы MathCad.

Анализ результатов проведенных исследований влияния увеличения подачи сопла режущей головки от 4 до 500 мм в минуту позволяет установить, что увеличение подачи сопла приводит к ухудшению шероховатости

обрабатываемой поверхности и увеличению зоны волнистого реза.

Проведены исследования однофакторной и двухфакторной модели для получения регрессионных зависимостей [3, 4] влияния техно-

логических режимов на формирование продольной шероховатости поверхности реза.

$$Ra = 3,538 \cdot 10^{-6} + 4,721 \cdot 10^{-6} \cdot S, \quad (3)$$

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

Для изучения возможности обработки данного типа ПКМ проведены исследования поглощения влаги в поверхностном слое обработанных образцов методом дифференциально сканирующей калориметрии. Измерения производились сразу после обработки и через неделю высыхания образцов. Стружка снималась в зоне 1 мм от поверхности реза. В результате установлено, что спустя неделю по-

верхностный слой воспроизводит исходные характеристики, что позволяет рекомендовать гидроабразивную резку для обработки деталей из исследуемого ПКМ.

Произведено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований формирования поверхности реза путем измерения её шероховатости (2). Расхождение величины  $Ra$  не превышает 15 % (рис. 2).

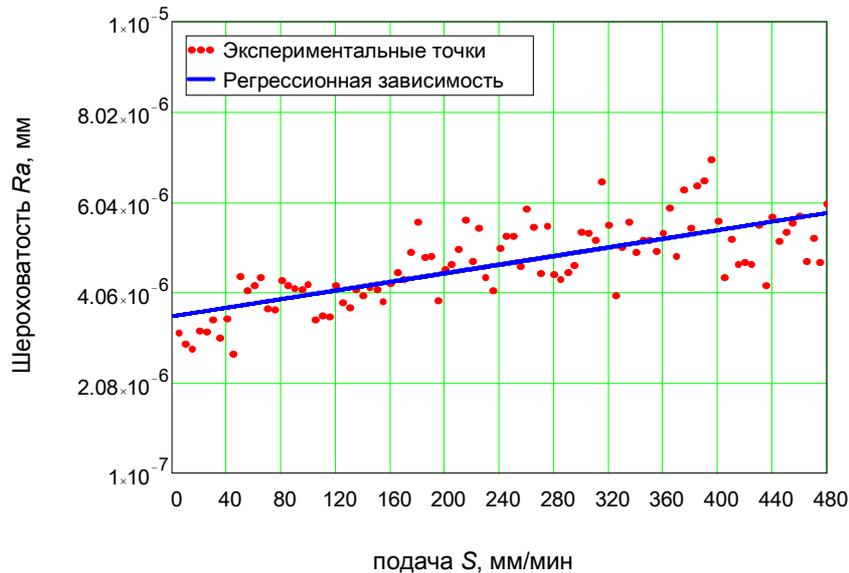


Рис. 2. Формирование шероховатости поверхности реза при измерении вдоль направления подачи для стеклопластика ВПС-7

Разработан алгоритм оптимизации технологических процессов гидроабразивной резки деталей из ПКМ. В качестве исходной информации вводятся начальные значения технологических режимов ( $P_{дин}$ ,  $R$ ,  $\rho_ч$ ,  $h$ ,  $L$ ,  $S$ ,  $Q$ ), затем рассчитывается величина  $\lambda$  и  $Ra$ . Отсеиваются варианты, в которых величина  $Ra$  превышает заданное значение. Для оставшихся вариантов производится расчет себестоимости реза. Оптимальным вариантом считается тот, у которого себестоимость реза будет минимальной.

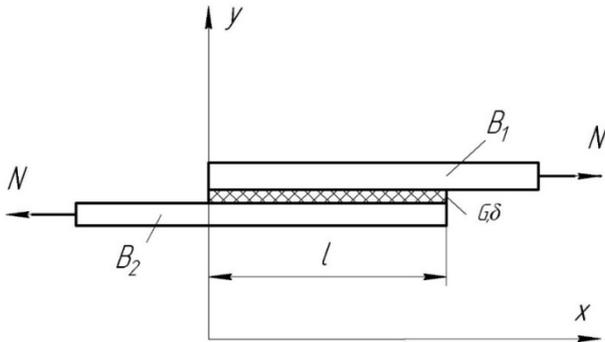
Как отмечалось ранее, полученная заготовка из полимеркомпозитного материала часто подвергается склеиванию. Склеивание позволяет получить неразъемное соединение путем

адгезионного взаимодействия клея (адгезива) и подложки (склеиваемых поверхностей). Клеевое соединение – сравнительно новый вид неподвижных неразъемных соединений, получивших широкое применение. Высокая порочность клеевого соединения и значительное сопротивление усталости, а также возможность соединения разнородных материалов, сделало эту технологию привлекательной для многих отраслей машиностроения.

Для обеспечения качественного склеивания деталей из ПКМ внахлест (рис. 3) проведены исследования возможности механизации операции подготовки деталей под склеивание.

Процесс склеивания позволяет обеспечить

возможность соединения деталей из различных материалов, имеющих различную толщину и жесткость. Обычно клеевой шов испытывает значительные внешние нагрузки, приводящие к формированию напряжения сдвига на границе раздела и в слое клея.



**Рис. 3. Схема клеевого соединения внахлест:**  
 $B_1$  и  $B_2$  – склеиваемые детали из ПКМ;  $G\delta$  – клеевой слой;  $l$  – длина клеевого соединения

Для обеспечения качественного соединения необходимо обеспечить оптимальную величину шероховатости склеиваемых поверхностей. В большинстве случаев производится обработка этих поверхностей шлифовальной шкуркой вручную, что не позволяет обеспечить стабильности качества склеиваемых поверхностей и высокую производительность процесса их финишной обработки.

На многих машиностроительных предприятиях для подготовки поверхности под операцию «склеивание» используют абразивную шлифовальную шкурку (ГОСТ 13344-79, ГОСТ 5009-82 и ГОСТ 10054-82) [4, 5]. Обработка производится вручную до удаления глянца. С поверхности детали снимается тонкий слой сполимеризованного связующего. При этом важно не повредить волокна. Существенным недостатком такой обработки является высокая трудоемкость операции, которая выполняется вручную, что требует больших затрат по времени обработки. Кроме того, при обработке ПКМ шлифовальной шкуркой происходит быстрый износ инструмента вследствие его засаливания. Листы шлифовальной шкурки необходимо менять по мере износа, чтобы они сохраняли свою режущую способность.

Альтернативой зашкурированию может быть применение шлифовальных головок и лепестковых кругов, не повреждающих волокна композита. При этом процесс будет механизирован, что приведет к снижению времени обработки заготовки, а следовательно, общей

трудоемкости изготовления детали.

При решении задачи снижения трудоемкости и доли ручного труда, при одновременном повышении стойкости инструмента и обеспечении стабильных характеристик поверхностей эффективны два подхода: исследование процессов формирования шероховатости поверхности деталей из ПКМ при различных методах обработки (необходимо получить оптимальную для склеивания шероховатость поверхности, а не минимальную как при обработке изделий из металла) и подбор оптимального шлифовального инструмента для механизации процесса зашкурирования. Работы по изучению соответствующих технологических возможностей и процессов проводились на базе машиностроительного предприятия. Исследовались изделия из полимеров, применяемых для производства деталей авиационной техники.

Для механизации процесса шлифования было принято решение о применении эластичных шлифовальных инструментов, конструкция и свойства которых допускают значительное перемещение зерен во время работы от статического положения в направлении нормальной составляющей силы резания [1 – 18]. Это обеспечивает стойкость инструмента, уменьшение напряженности теплового потока, отсутствие микрорастрескиваний поверхностного слоя по сравнению с «жестким» шлифованием шкуркой [9, 10].

Многие изделия из полимерных композиционных материалов (обшивки; оболочки; колпаки и т.п.) имеют малую жесткость. Для них целесообразно применять эластичный шлифовальный инструмент. Упругое основание такого инструмента является своеобразным амортизатором, введенным в технологическую систему, который способен гасить колебания и вибрации, возникающие при абразивной обработке [1 – 21]. Как уже отмечено ранее, большинство полимерных композиционных материалов гигроскопичны, поэтому недопустимо использование охлаждающих жидкостей при обработке. Конструкция инструмента на гибкой основе позволяет применять его в процессе шлифования без применения охлаждающей жидкости.

Проведены теоретические исследования влияния технологических параметров обработки эластичным шлифовальным инструментом на шероховатость поверхности, подлежащей склеиванию.

Для определения шероховатости поверхности была использована методика, разработан-

ная профессором Королевым А.В. [13], для описания формирования профиля шероховатости, примененная при обработке связанным абразивом. На основании исследований, представленных в [8], получена зависимость для определения шероховатости поверхности ПКМ, обработанной гибкими лепестковыми кругами:

$$Ra = 0,9 \sqrt{\frac{t_c \cdot v_s \cdot l_f^3 \cdot L_{ед}}{60 \cdot v_k \cdot L_k}}, \quad (5)$$

где  $t_c$  – толщина слоя материала, снимаемого



Рис. 4. Лепестковый круг фирмы Klingspor мод. ММ 630

Лепестковый круг фирмы Klingspor представляет собой шлифовальную оправку  $\phi 6$  мм, на которой радиально закреплены лепестки шлифовальной шкурки. Каждый лепесток расчленен на 10 равных сегментов. Длина сегмента составляет 50 мм. Лепестки завернуты в одном направлении. Конструкция лепестков и их крепление на оправку позволяет отнести этот круг к очень эластичному инструменту. При проведении исследований использовались лепестковые круги разной зернистости.

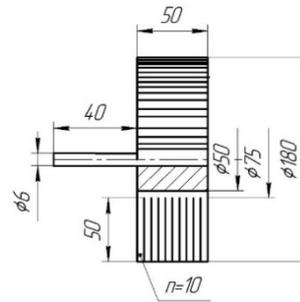
В процессе исследований изменялась скорость вращения круга, скорость подачи и удельное давление лепестков на поверхность детали, зависящая от динамического радиуса  $r_d$  круга, который представляет собой расстояние от центра круга до поверхности соприкосновения лепестков круга с обрабатываемой деталью при выключенном станке.

Для подбора оптимальных режимов обработки гибкий шлифовальный круг был установлен в шпиндель вертикально-фрезерного станка, и с его помощью обработаны образцы из ПКМ. Выбраны диапазоны частоты вращения 450...1400 об/мин; скорости подачи 100...800 мм/мин.

Учитывая конструкцию и эластичность круга, обработку производили при трех значениях динамического радиуса:  $r_d$  – 55 мм,

за один проход;  $v_s$  – скорость подачи;  $l_f$  – фактическое расстояние между контактными зернами;  $L_{ед}$  – ширина обрабатываемого участка;  $v_k$  – скорость круга;  $L_k$  – суммарная протяженность лепестков.

Для проверки предложенных теоретических зависимостей проведены комплексные экспериментальные исследования финишной обработки деталей из ПКМ (стеклопластик ВПС-7) гибкими абразивными лепестковыми кругами фирмы Klingspor мод. ММ 630 (диаметр – 180 мм; ширина – 50 мм; зерно – электрокорунд; связка – синтетическая смола) с рассеченными ламелями (рис. 4).



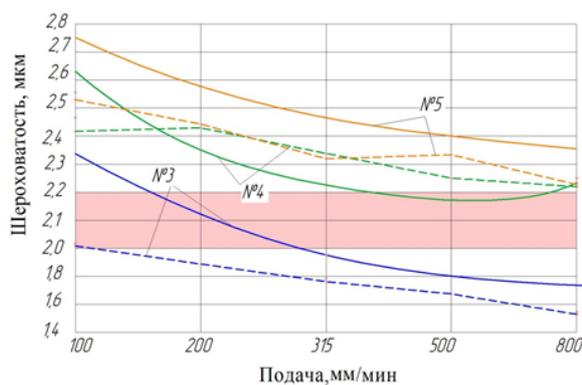
60 мм, 65 мм. Данные значения  $r_d$  приняты с учетом максимальной, средней и минимальной площади контакта лепестков с обрабатываемой поверхностью при выключенном станке. Образцы устанавливались в специальных ложементы и были закреплены при помощи прижимных планок.

Анализ результатов проведенных исследований позволяет установить, что образцы, обработанные лепестковым кругом, имеют равномерную, матовую, без глянца поверхность. Нарушений целостности волокон не наблюдается.

На рис. 5 и рис. 6 представлено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований.

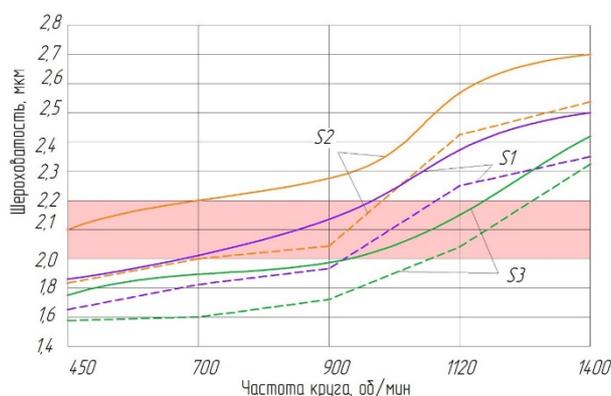
Параметры шероховатости рассчитаны по формуле (5). Построены зависимости при различных режимах обработки. Сплошными линиями показаны теоретические зависимости, пунктиром – результаты экспериментальных исследований. Сплошной сектор на графиках – рекомендуемая шероховатость поверхности.

Наблюдается хорошая сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований. Расхождение не превышает 20 %. Проведена проверка адекватности теоретической зависимости по критерию Фишера. Установлена адекватность предложенных теоретических зависимостей.



**Рис. 5. Шероховатость  $R_a$  поверхности деталей из ПКМ в зависимости от подачи лепесткового круга с размером зерна по FERA 180:**

№3 – 900 об/мин; №4 – 1120 об/мин; №5 – 1400 об/мин



**Рис. 6. Шероховатость  $R_a$  поверхности деталей из ПКМ в зависимости от частоты вращения лепесткового круга с размером зерна по FERA 180:**

S1 – 100 мм/мин; S2 – 200 мм/мин; S3 – 500 мм/мин

Для осуществления сравнения прочности клеевых соединений исследованы эталонные поверхности образцов, используемые при сравнительном контроле качества зашкуривания деталей. Они представляют собой фрагмент стеклопластикового изделия, поверхность которого обработана по действующей на предприятии технологии: обработка проводилась вручную шлифовальной шкуркой до удаления глянца и дефектов без повреждений волокон композита. Эталонный образец имеет матовую поверхность с видимыми следами прохода отдельных абразивных зерен.

Визуально видно, что на всех образцах, обработанных шлифовальной шкуркой, имеются зоны недошлифованности и чрезмерного сошкуривания полимера. Это объясняется различным нажимом руки рабочего на шлифовальную шкурку во время обработки. По результатам экспериментальных исследований по определению среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости, сделаны следующие выводы:

1) При увеличении зернистости шлифовальной шкурки увеличиваются и параметры шероховатости обработанной поверхности.

2) На обработанной поверхности имеются ярко выраженные царапины, шероховатость поверхности имеет отчетливую направленность.

3) На качество обработанной поверхности влияет не только зернистость шлифовальной шкурки, но и степень ручного нажима на неё, а также интенсивность зашкуривания.

Далее образцы обрабатывались лепестковыми кругами фирмы Klingspor. Выполнен визуальный анализ обработанных поверхностей, по результатам которого сделаны следующие выводы:

1) Все образцы имеют однородную матовую поверхность. Царапины от абразивных зёрен менее выражены по сравнению с образцами, обработанными шлифовальной шкуркой.

2) При обработке образцов с применением пневмоинструмента лепестковые круги пока-

зали себя с положительной стороны. Обработку возможно производить под различным углом наклона оси инструмента к обрабатываемой поверхности (от 0° до 60°). Мобильность пневмоинструмента и эластичность шлифовального круга дают возможность обрабатывать крупногабаритные и объемные детали (фюзеляжи; корпуса; емкости и т.п.), а также использовать при ремонтных работах непосредственно на собранном изделии.

3) Как и в случае обработки шлифовальной шкуркой, увеличение зернистости лепесткового круга приводит к увеличению параметров шероховатости обработанной поверхности.

4) С увеличением скорости резания силы резания монотонно возрастают, соответственно возрастает и режущая способность лепестков круга, что приводит к увеличению шероховатости поверхности.

5) Уменьшение динамического радиуса круга положительно сказывается на качестве

обработанной поверхности. За счет увеличения площади контакта лепестков возрастает суммарная протяженность рабочих участков лепестков и за счет нивелирования разновысотных зерен увеличивается число одновременно работающих зерен.

б) Уменьшение скорости подачи приводит к практически пропорциональному увеличению толщины слоя материала, снимаемого за рабочий ход и тем самым увеличению шероховатости обработанных участков.

Для оценки качества клеевых соединений деталей из ПКМ были изготовлены контрольные образцы клеевых соединений и проведено их испытание на прочность. Результаты испытаний образцов, обработанных лепестковыми кругами Klingspor, приведены в табл. 1. Аналогичные испытания проводились и для образцов, обработанных вручную шлифовальной шкуркой.

1. Результаты испытаний образцов клеевых соединений деталей из ПКМ, обработанных лепестковыми кругами Klingspor

Вид соединения	Ra, мкм	Зернистость круга по FERA	Прочность на разрыв						Характер разрушения
			На сдвиг, кг/см <sup>2</sup>			На отрыв, кг/см <sup>2</sup>			
			1	2	3	1	2	3	
Образец № 1	2,61	120	169	170	164	5,3	5,2	5,1	Смешанный: Разрушение по клею с частичным разрушением субстрата
	2,46	180	181	184	182	5,8	6,1	6,3	Смешанный: Разрушение по клею с частичным разрушением субстрата
	1,49	240	168	168	167	3,2	3,3	3,5	Смешанный: Разрушение по клею с частичным разрушением субстрата
Образец № 2	2,43	120	179	177	176	5,9	5,8	6,1	Смешанный: Разрушение по клею с частичным разрушением субстрата
	2,23	180	184	182	181	6,3	6,2	6,6	Смешанный: Разрушение по клею с частичным разрушением субстрата
	1,22	240	163	163	165	3,3	3,8	3,6	Смешанный: Разрушение по клею с частичным разрушением субстрата
Образец № 3	2,24	120	179	178	177	6,3	6,6	6,2	Смешанный: Разрушение по клею с частичным разрушением субстрата
	1,89	180	185	186	185	6,7	6,4	6,0	Смешанный: Разрушение по клею с частичным разрушением субстрата
	1,07	240	164	163	165	3,3	3,6	4,0	Смешанный: Разрушение по клею с частичным разрушением субстрата

Анализируя результаты экспериментальных исследований контрольных образцов клеевых соединений, обработанных вручную шлифовальной шкуркой, можно сделать следующие выводы:

1) Образцы клеевых соединения без обра-

ботки испытания не выдержали и показали низкие значения прочности как на сдвиг, так и на отрыв.

2) Прочность клеевого соединения зависит от параметров шероховатости склеиваемых поверхностей и меняется при обработке инст-

рументом разной зернистости. Лучшие показатели у соединений, обработанных шлифовальной шкуркой №6, затем шлифовальной шкуркой №8 и №12.

3) Определен характер изменения прочности клеевых соединений шероховатых стеклопластиковых поверхностей с ростом шероховатости.

Анализируя результаты экспериментальных исследований контрольных образцов клеевых соединений, обработанных лепестковыми кругами фирмы Klingspor, можно сделать следующие выводы:

1) Образцы с величиной шероховатости 1,8...2,5 мкм по  $Ra$ , показали максимальную прочность соединения.

2) Определен характер изменения прочности клеевых соединений с ростом шероховатости.

3) Прочность адгезионного соединения зависит не только от параметров шероховатости поверхности, но и от равномерности обработки.

Выбор зернистости абразивного круга осуществляется в зависимости от необходимой шероховатости изделия для обеспечения прочности клеевого соединения. Для тонкостенных изделий желателен применять шлифовальные круги, имеющие зернистость по FERA 240, 220, 180, 150. Для изделий, имеющих значительную величину слоя связующего материала, следует использовать шлифовальные круги зернистостью по FERA 40, 80, 100, 120. Для сошкуривания поверхностных дефектов (наплывов, шагреней, перепадов и т.п.) с одновременной подготовкой поверхности к склеиванию рекомендуется зашкуривание производить шлифовальными лепестковыми кругами зернистостью по FERA 80, 100, 120, что будет более производительно по сравнению с кругами меньшей зернистостью.

После окончания обработки поверхность детали подлежит очистке от продуктов зашкуривания. Очистку необходимо проводить чистой хлопчатобумажной салфеткой или щёткой-сметкой с мягкой щетиной, убирая стеклопластиковую пыль, не поднимая её в воздух.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tamarkin, M., Tishchenko, E., Azarova, A., Butenko, V. Surface quality formation at polymer composite details' abrasive processing // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 918. – 9 p. – Article Number 012114.
2. Tamarkin, M.A., Butenko, V.I., Isaev, A.N., Murugova, E.V. Optimization of the flat stock cutting process by hydroabrasive jet // MATEC Web of Conferences. – 2018. – p. 226.
3. Тамаркин, М.А., Тищенко, Э.Э., Верченко, А.В., Новокрещенов, С.А. Формирование качества поверхностного слоя при гидроабразивной резке // Вестник машиностроения. – 2020. – № 3. – С. 53-57.
4. Тамаркин, М.А., Тищенко, Э.Э., Верченко, А.В., Троицкий, В.М. Формирование качества поверхностного слоя при абразивной обработке полимеркомпозитных материалов // Advanced Engineering Research. – 2020. – №3. – С. 235-242.
5. Тищенко, Э.Э., Тамаркин, М.А., Верченко, А.В., Коханюк, А.Г. Обеспечение шероховатости поверхности детали при гидроабразивной резке заготовок // Главный механик. – 2020. – №4. – С. 59-63.
6. Тамаркин, М.А., Верченко, А.В., Кишко, А.А. Повышение эффективности гидроабразивной резки толстолистовых авиационных материалов // Вестник МАИ. – 2017. – Т.24. – №2. – С. 104-114.
7. Тамаркин, М.А., Тищенко, Э.Э., Верченко, А.В. Оптимизация процесса гидроабразивной резки листового проката // Автоматизация. Современные технологии. – 2019. – Т. 73. – №6. – С. 263-269.
8. Тамаркин, М.А., Верченко, А.В., Кишко, А.А. Повышение качества гидроабразивной резки деталей из авиационных материалов // Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева. – 2017. – №2 (41). – С. 88-96.
9. Тамаркин, М.А., Верченко, А.В. Исследование шероховатости поверхности реза при гидроабразивной резке // Вестник ДГТУ. – 2017. – №2 (89). – С. 116-130.
10. Тамаркин, М.А., Козулько, Н.В., Верченко, А.В. Механизация процесса абразивной обработки деталей из композиционных материалов // Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева. – 2017. – №2 (41). – С. 75-82.
11. Тамаркин, М.А., Козулько, Н.В. Механизация процесса абразивной обработки деталей из композиционных материалов // Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева. – 2017. – №2 (41). – С. 75-82.
12. Козулько, Н.В. Механизация абразивной обработки деталей из полимерных композитных материалов под операцию «склеивание» // Вестник ДГТУ. – 2018. – №18(2). – С. 179-189.
13. Козулько, Н.В., Семиниченко, К.В. Исследование процесса окончательной абразивной обработки деталей из полимерных композиционных материалов (ПКМ) // Научно-технический вестник Поволжья. – 2019. – №1. – С. 55-59.
14. Тамаркин, М.А., Тищенко, Э.Э. Основы оптимизации процессов обработки деталей свободным абразивом. – Saarbrücken. – Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015.
15. Тищенко, Э.Э., Тамаркин, М.А. Современное состояние и перспективы развития методов обработки в гранулированных рабочих средах // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2020. – №9 (111). – С. 12-20.

16. **Королёв, А.В.** Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 191 с.

17. **Hamouda, K., Bournine, H., Tamarkin, M., Babichev, A., Saidi, D., Amrou, H.E.** Effect of the Velocity of Rotation in the Process of Vibration Grinding on the Surface State // *Materials Science*. – 2016. – №52 (2). – PP. 216-221.

18. **Hamouda, K., Bournine, H., Amrou, H.E., Tamarkin, M.A., Babichev, A.P., Saidi, D.** Effect of the velocity of rotation in the process of vibration grinding on the surface state // *Materials Science*. – 2016. – Т. 52. – №2. – PP. 216-221.

19. **Solovev, A.N., Van, T.N., Tamarkin, M.A., Panfilov, I.A., Wang, J.P.** Modeling contact abrasive interactions in centrifugally rotary processing by finite element method // *Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications (PHENMA 2018)*. Abstracts & Schedule., 2018. – PP. 34-336.

20. **Tamarkin, M.A., Tishchenko, E.E., Chukarina, I.M., Sosnitskaya, T.S.** Part Processing Technology in Transport Engineering // *Proceedings of the VIII International Scientific Siberian Transport Forum*. – TransSiberia. – 2019. – Vol. 1.

21. **Tamarkin, M. A., Tikhonov, A. A.** Metal removal in hydroabrasive machining // *Russian Engineering Research*. – 2014. – Vol. 34. – Is. 3. – PP. 175-177.

## REFERENCES

1. Tamarkin, M., Tishchenko, E., Azarova, A., Butenko, V. Surface quality formation at polymer composite details' abrasive processing // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 918. – 9 p. – Article Number 012114.

2. Tamarkin, M.A., Butenko, V.I., Isaev, A.N., Murugova, E.V. Optimization of the flat stock cutting process by hydroabrasive jet // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – p. 226.

3. Tamarkin, M.A., Tishchenko, E.E., Verchenko, A.V., Novokreschenov S.A. Quality formation in surface layer at hydro-abrasive cutting // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2020. No.3. – pp. 53-57.

4. Tamarkin, M.A., Tishchenko, E.E., Verchenko, A.V., Troitsky, V.M. Formation of surface layer quality at polymer-composite parts abrasion / *Advanced Engineering Research*. – 2020. – No.3. – pp. 235-242.

5. Tishchenko, E.E., Tamarkin, M.A., Verchenko, A.V., Kokhanyuk, A.G. Surface roughness support in parts at billet hydro-abrasive cutting // *Chief Mechanic*. – 2020. – No.4. – pp. 59-63.

6. Tamarkin, M.A., Verchenko, A.V., Kishko, A.A. Effectiveness increase at hydro-abrasive cutting of plate aircraft materials // *Bulletin of MAI*. – 2017. – Vol.24. – No.2. – pp. 104-114.

7. Tamarkin, M.A., Tishchenko, E.E., Verchenko, A.V. Optimization of sheet products hydro-abrasive cutting // *Au-*

*tomation. Modern Technologies*. – 2019. – Vol.73. – No.6. – pp. 263-269.

8. Tamarkin, M.A., Verchenko, A.V., Kishko, A.A. Quality increase in hydro-abrasive cutting of aircraft material parts // *Bulletin of Soloviyov RSATU*. – 2017. – No.2 (41). – pp. 88-96.

9. Tamarkin, M.A., Verchenko, A.V. Roughness investigation of cut surface at hydro-abrasive cutting // *Bulletin of DSTU*. – 2017. – No.2 (89). – pp. 116-130.

10. Tamarkin, M.A., Kozulko, N.V., Verchenko, A.V. Mechanization of composite parts abrasion // *Bulletin of Soloviyov RSATU*. – 2017. – No.2 (41). – pp. 75-82.

11. Tamarkin, M.A., Kozulko, N.V. Mechanization of composite parts abrasion // *Bulletin of Soloviyov RSATU*. – 2017. – No.2 (41). – pp. 75-85.

12. Kozulko, N.V. Mechanization of polymer-composite parts abrasion for “splicing” operation // *Bulletin of DSTU*. – 2018. – No.18 (2). – pp. 179-189.

13. Kozulko, N.V., Seminichenko, K.V. Investigation of polymer-composite parts finishing abrasion // *Science-Technical Bulletin of Volga Area*. – 2019. – No.1. – pp. 55-59.

14. Tamarkin, M.A., Tishchenko, E.E. *Fundamentals of Optimization of Parts Processing with Free Abrasive*. – Saarbrücken. – Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015.

15. Tishchenko, E.E., Tamarkin, M.A. Current state and outlooks in development of working methods in granulated working environment // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2020. – No.9 (111). – pp. 12-20.

16. Korolyov, A.V. *Investigation of Tool and Detail Surface Formation at Abrasion*. – Saratov: Saratov University Publishers, 1975. – p. 191.

17. Hamouda, K., Bournine, H., Tamarkin, M., Babichev, A., Saidi, D., Amrou, H.E. Effect of the Velocity of Rotation in the Process of Vibration Grinding on the Surface State // *Materials Science*. – 2016. – №52 (2). – PP. 216-221.

18. Hamouda, K., Bournine, H., Amrou, H.E., Tamarkin, M.A., Babichev, A.P., Saidi, D. Effect of the velocity of rotation in the process of vibration grinding on the surface state // *Materials Science*. – 2016. – Т. 52. – №2. – PP. 216-221.

19. Solovev, A.N., Van, T.N., Tamarkin, M.A., Panfilov, I.A., Wang, J.P. Modeling contact abrasive interactions in centrifugally rotary processing by finite element method // *Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications (PHENMA 2018)*. Abstracts & Schedule., 2018. – PP. 34-336.

20. Tamarkin, M.A., Tishchenko, E.E., Chukarina, I.M., Sosnitskaya, T.S. Part Processing Technology in Transport Engineering // *Proceedings of the VIII International Scientific Siberian Transport Forum*. – TransSiberia. – 2019. – Vol. 1.

21. Tamarkin, M. A., Tikhonov, A. A. Metal removal in hydroabrasive machining // *Russian Engineering Research*. – 2014. – Vol. 34. – Is. 3. – PP. 175-177.

Рецензент д.т.н.  
Сергей Геннадьевич Бишутин