



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя стекловолоконных композитов при концевом фрезеровании

Андрей Марков ^a, Вячеслав Некрасов ^b, Цзянь Су ^c, Азхар Салман ^d, Сергей Гайст ^e,
 Михаил Андреев ^{f,*}

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, пр. Ленина, 46, г. Барнаул, 656038, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0002-3101-9711>,  andmarkov@inbox.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0002-8122-4641>,  sla44@mail.ru,
^c  <https://orcid.org/0000-0001-5120-3623>,  278507234@qq.com, ^d  <https://orcid.org/0000-0002-6584-1439>,  azharmansoor76@gmail.com,
^e  <https://orcid.org/0000-0001-8697-6263>,  sergei-gaist@mail.ru, ^f  <https://orcid.org/0000-0002-3660-3343>,  m194@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.914.1

История статьи:

Поступила: 29 сентября 2020
 Рецензирование: 29 октября 2020
 Принята к печати: 15 ноября 2020
 Доступно онлайн: 15 декабря 2020

Ключевые слова:

Фрезерование
 Расслоение
 Композиционный материал
 Режимы резания

АННОТАЦИЯ

Введение. На сегодняшний день стеклопластик является одним из наиболее распространенных композиционных материалов, поэтому его механическая обработка продолжает быть объектом исследований. Во многих работах установлено влияние режимов резания и конструктивно-геометрических параметров инструмента на шероховатость обработанной поверхности, силы резания и износ режущего инструмента. Предметом данного исследования является качество поверхности. **Цель работы** – исследование влияния режимов обработки на расслоение и шероховатость стекловолоконных композитов при концевом фрезеровании, а также проверка гипотезы о влиянии крутящего момента на расслоение. Актуальность работы обусловлена тем, что расслоение, наряду с шероховатостью, оказывает существенное влияние на качество обработки и последующей сборки готового изделия. Предлагается критерий для оценки величины расслоения композиционных материалов при их механической обработке. Приводятся результаты экспериментальных исследований крутящего момента на фрезе, относительного коэффициента расслоения и шероховатости поверхности от режимов резания. **Методы исследования.** Создана экспериментальная установка с использованием пьезоэлектрического датчика динамического крутящего момента компании China Botong Electric, который способен фиксировать крутящий момент, действующий на вращающуюся фрезу в процессе механической обработки. Проведен ряд опытов с целью установления связи крутящего момента, относительного коэффициента расслоения и шероховатости поверхности. **Результаты и обсуждения.** Сравнительный анализ полученных зависимостей показал, что крутящий момент напрямую связан с расслоением. Для уменьшения расслоения следует уменьшать глубину резания, а с целью обеспечения заданной производительности – увеличивать подачу и частоту вращения фрезы. Представленные результаты подтверждают перспективность развиваемого подхода, направленного на обработку новых классов композиционных материалов.

Для цитирования: Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя стекловолоконных композитов при концевом фрезеровании / А.М. Марков, В.Н. Некрасов, Ц. Су, А.М. Салман, С.В. Гайст, М.В. Андреев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 31–40. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-31-40.

Введение

Стеклопластик – один из наиболее широко применяемых видов композиционных материалов [1–4]. Как правило, изделия из армированной стекловолокном смолы изготавливаются близки по форме к готовым деталям. Обработке под-

вергаются либо исполнительные поверхности, либо поверхности, по которым осуществляется сопряжение деталей. Для этого производится контурное фрезерование, фрезерование поверхностей и конструктивных элементов (пазов, окон, плоскостей и уступов), точение и шлифование, применяются раскройные операции и обработка отверстий [5–7]. Немеханические методы формообразования, такие как гидравлическая струйная или лазерная резка, вследствие технологических особенностей имеют ограниченное применение. Механическая обработка

*Адрес для переписки

Андреев Михаил Витальевич, к.т.н., доцент
 Алтайский государственный технический университет
 им. И.И. Ползунова,
 пр. Ленина, 46,
 656038, г. Барнаул, Россия
 Тел.: +7 (960) 962-73-11, e-mail: m194@mail.ru

также сопряжена с рядом трудностей. При механической обработке композиционные материалы с волокнистой однонаправленной структурой подвержены расслоению. Это обусловлено ярко выраженной анизотропией свойств, низкой адгезионной связью наполнителя со связующим и низкой прочностью самого связующего. Расслоение материала существенно влияет на качество обработки и последующей сборки готового изделия. Для предотвращения подобных дефектов технологи в соответствии с действующими нормативами и справочными материалами вынуждены назначать «мягкие» режимы резания. Однако это снижает производительность обработки и влияет на стоимость изготовления. Отсутствие единого критерия для количественной оценки величины расслоения, а также функциональной зависимости расслоения от режимов обработки требует от технологов проведения поисковых экспериментов при проектировании технологий и не дает возможности автоматизировать процесс обработки [8–14].

На сегодняшний день большая часть работ, связанных с обработкой стеклопластиков, посвящена изучению влияния режимов резания и конструктивно-геометрических параметров инструмента на силы резания, износ режущего инструмента и шероховатость обработанной поверхности [15–22]. Устанавливаются пути повышения эффективности производства изделий из полимерных композитов [23, 24]. На основании анализа процесса стружкообразования стекловолоконных композитов нами было сделано предположение о влиянии сил резания и, как следствие, крутящего момента на расслоение. Так как при фрезеровании зубья фрезы контактируют с обрабатываемым материалом циклически, непосредственное измерение сил резания, особенно при высоких скоростях, сопряжено со значительными трудностями. При этом крутящий момент вполне может дать необходимую информацию о степени силового воздействия инструмента на обрабатываемый материал. **Целью данной работы является** исследование влияния режимов обработки на расслоение и шероховатость стекловолоконных композитов при концевом фрезеровании, а также проверка гипотезы о влиянии крутящего момента на расслоение.

Задачи исследований: 1) установление зависимостей крутящего момента на фрезе, шеро-

ховатости обработанной поверхности и относительного коэффициента расслоения от режимов обработки; 2) установление зависимости относительного коэффициента расслоения от крутящего момента на фрезе.

Методика исследований

Для проведения экспериментальных исследований фрезерования стекловолоконных композитов на базе фрезерного станка модели ГФ2171С5 была создана экспериментальная установка, принципиальная схема которой приведена на рис. 1.

Для проведения экспериментальных исследований использовались образцы размерами 500×80×5 мм из стеклотекстолита марки 3240 на основе эпоксидно-фенольной смолы. Этот материал обладает хорошими электроизоляционными свойствами, поэтому он широко применяется при изготовлении изоляционных устройств и компонентов электрических изделий. В табл. 1 приведены некоторые основные свойства стеклотекстолита.

В качестве инструмента использовалась фреза концевая четырехзубая из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром 10 мм. Инструмент из быстрорежущей стали уступает по своим рабочим характеристикам инструменту из сверхтвердых материалов, однако невысокая стоимость и возможность перетачивания обеспечивают его широкое применение на производстве.

Обязательным условием при проведении экспериментальных исследований являлся контроль остроты режущих кромок инструмента с использованием микроскопа ММИ-2. На рис. 2 показан внешний вид рабочей части фрезы перед началом экспериментов (рис. 2, а) и после окончания периода приработки (рис. 2, б).

Для измерения крутящего момента использовался пьезоэлектрический датчик динамического крутящего момента компании China Botong Electric, способный фиксировать крутящий момент, воспринимаемый вращающимся валом в процессе работы. Диапазон измерения датчика 0...50 Н·м, погрешность измерения 0,5 %. Шероховатость Ra контролировалась на профилографе-профилометре модели HOMMEL TESTER W55. Ширина отслоившейся области измерялась с использованием микроскопа ММИ-2.



Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки
 Fig. 1. Schematic diagram of the experimental assembly

Таблица 1
 Table 1

Свойства стеклотекстолита
Fiberglass Properties

Свойство / Property	Значение / Value	Единица измерения / Unit of measurement
Плотность	1700...1900	кг/м ³
Термостойкость	200	°C
Разрушающее напряжение при изгибе перпендикулярно слоям, в условиях T = 15...35 °C, влажность 45...75 %, не менее	340	МПа
Ударная вязкость по Шарпи параллельно слоям на образцах с разрезом, не менее	33	кДж/м ²

В результате экспериментальных исследований необходимо получить зависимости крутящего момента на фрезе M (Н·м), шероховатости поверхности Ra (мкм) и относительного коэффициента расслоения δ (%) как функции режимов резания:

$$M = a_M t^{x_M} S_o^{y_M} n^{z_M}; \tag{1}$$

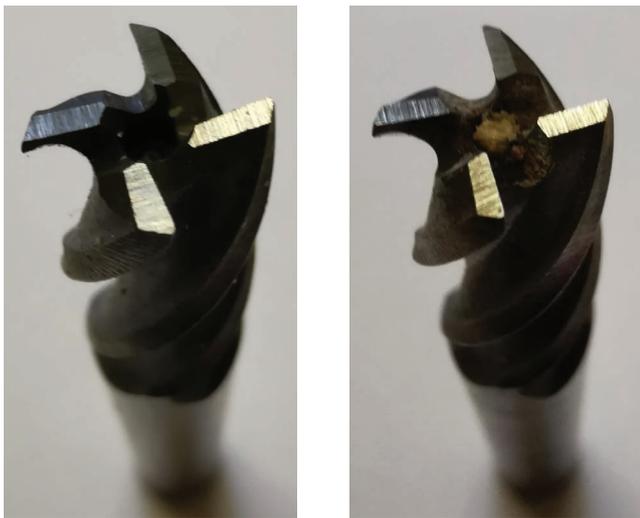
$$Ra = a_{Ra} t^{x_{Ra}} S_o^{y_{Ra}} n^{z_{Ra}}; \tag{2}$$

$$\delta = a_\delta t^{x_\delta} S_o^{y_\delta} n^{z_\delta}, \tag{3}$$

где a_M, a_{Ra}, a_δ – эмпирические коэффициенты; t – глубина резания, мм; S_o – подача на оборот, мм/об; n – частота вращения фрезы, об/мин; $x_M, x_{Ra}, x_\delta, y_M, y_{Ra}, y_\delta, z_M, z_{Ra}, z_\delta$ – показатели степени.

При проведении экспериментов обработка велась параллельно слоям стекловолкна. Режимы обработки варьировались в следующих диапазонах:

- глубина резания t от 1 до 5 мм;
- подача на оборот S_o от 0,1 до 0,25 мм/об;
- частота вращения фрезы n от 250 до 1000 об/мин.



a

b

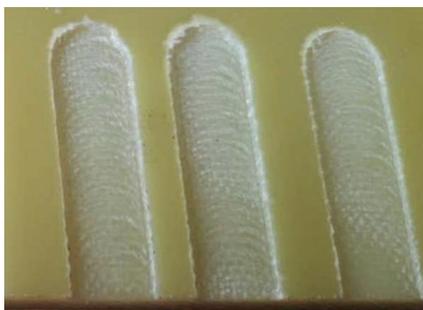
Рис. 2. Концевые фрезы:

a – до экспериментов; *b* – после приработки

Fig. 2. End mills:

a – before experiments; *b* – after break-in period

На рис. 3 показан образец с характерным дефектом в виде расслоения по границам паза и изменением цвета отслоившейся области.



a



b

Рис. 3. Пример отслоившегося образца:

$t = 1$ мм, $S_o = 0,1$ мм/об, $n = 250$ об/мин (*a*);
 $t = 3$ мм, $S_o = 0,15$ мм/об, $n = 500$ об/мин (*b*)

Fig. 3. Example of the delaminated specimen:

$t = 1$ mm, $S_o = 0,1$ mm/rev, $n = 250$ rev/min (*a*);
 $t = 3$ mm, $S_o = 0,15$ mm/rev, $n = 500$ rev/min (*b*)

На рис. 4 приведена схема для расчета критерия расслоения.

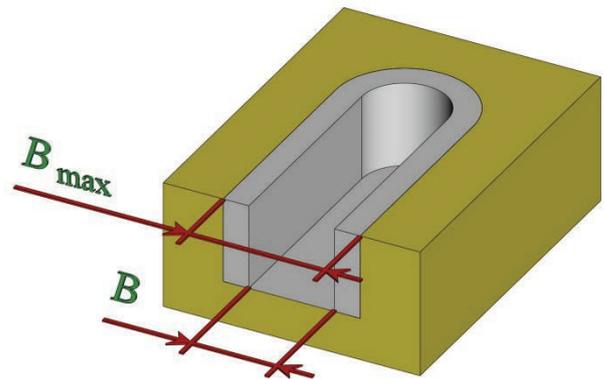


Рис. 4. Схема для расчета критерия расслоения
 Fig. 4. Diagram for calculation of the delamination criterion

Для того чтобы оценить, на сколько процентов от величины номинального размера может происходить расслоение, предложено использовать относительный коэффициент расслоения

$$\delta = \frac{B_{\max} - B}{B} \cdot 100 \%, \quad (4)$$

где B_{\max} – максимальная ширина отслоившейся области, расположенной по границам паза, мм; B – ширина паза, мм.

Значение δ необходимо для получения четкого представления о возможных отклонениях размера B_{\max} от номинального B и является показателем для оценки качества обработки.

Результаты и их обсуждение

Была проведена аппроксимация экспериментальных данных степенными функциональными зависимостями по программе в системе компьютерной алгебры Maple:

$$M = 67\,739t^{2,187} S_o^{1,444} n^{-1,666}; \quad (5)$$

$$Ra = 1,422t^{-0,116} S_o^{0,369} n^{0,26}; \quad (6)$$

$$\delta = 449t^{1,095} S_o^{-0,056} n^{-0,649}; \quad (7)$$

где M – величина крутящего момента на фрезе (Н · м), Ra – шероховатость поверхности (мкм), δ – относительный коэффициент расслоения (%).

Была проведена проверка принадлежности выборки экспериментальных и расчетных значе-

ний по каждому параметру одной и той же генеральной совокупности. Для этого определялось отношение (критерий Фишера) (табл. 2):

$$F = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}, \quad (8)$$

где σ_1^2 и σ_2^2 – дисперсии первой и второй выборок соответственно, $\sigma_1^2 > \sigma_2^2$.

Условие $F < F_\alpha$ выполняется (F_α – табличное значение критерия Фишера), это указывает на отсутствие существенного различия между дисперсиями.

Анализ степенных зависимостей позволяет судить о степени влияния режимов обработки, изменяемых в данных диапазонах, на результаты эксперимента.

Согласно формуле (2) в данных диапазонах изменения режимов резания глубина резания t оказывает на увеличение крутящего момента M гораздо большее влияние, чем подача на оборот S_0 . Частота вращения фрезы n оказывает обратное влияние, причем в средней степени. Поэтому для уменьшения крутящего момента следует уменьшать глубину резания t , а с целью обеспечения заданной производительности – увеличивать подачу на оборот S_0 и частоту вращения фрезы n .

Согласно формуле (3) в данных диапазонах изменения режимов резания подача на оборот S_0 оказывает на увеличение шероховатости Ra большее влияние, чем частота вращения фрезы n .

Таблица 2

Table 2

Расчет критерия Фишера
Calculation of the Fisher's criterion

	Крутящий момент на фрезу M , Н·м / Torque on the mill cutter M , N·m	Шероховатость поверхности Ra , мкм / Surface roughness Ra , μm	Относительный коэффициент расслоения δ , % / Relative delamination factor δ , %
Дисперсии экспериментальных значений / Dispersions of experimental values	1,452	0,59	65,6
Дисперсии расчетных значений / Dispersions of calculated values	1,446	0,60	65,3
Критерий Фишера / Fisher's criterion	1,004	1,017	1,005

Глубина резания t оказывает обратное влияние, причем в наименьшей степени.

Согласно формуле (4) в данных диапазонах изменения режимов резания глубина резания t оказывает на увеличение относительного коэффициента расслоения δ наибольшее влияние. Частота вращения фрезы n оказывает обратное влияние в средней степени, а подача на оборот S_0 оказывает наименьшее обратное влияние.

Была получена графическая зависимость (рис. 5) и степенная функциональная зависимость относительного коэффициента расслоения δ (%) от крутящего момента M :

$$\delta = 22,7 \cdot M^{0,336}. \quad (9)$$

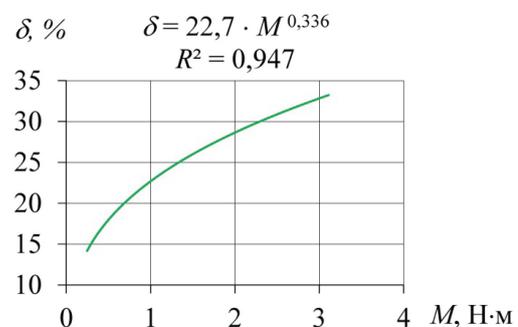


Рис. 5. Зависимость относительного коэффициента расслоения δ от крутящего момента M

Fig. 5. The dependence of relative delamination factor δ on torque M

Согласно формуле (9) для уменьшения степени расслоения необходимо снижать крутящий момент и в процессе обработки поддерживать его на постоянном уровне.

Выводы

1. Степенные функциональные зависимости, полученные в данной работе, показывают связь крутящего момента на фрезе (формула (5)), шероховатости поверхности (формула (6)) и относительного коэффициента расслоения (формула (7)) с режимами резания.

2. Согласно выражению (5) глубина резания оказывает наибольшее влияние на увеличение крутящего момента, подача на оборот – наименьшее, а частота вращения фрезы – обратное влияние средней интенсивности.

3. Согласно формуле (6) подача на оборот оказывает наибольшее влияние на увеличение шероховатости, частота вращения фрезы – среднее, а глубина резания – обратное влияние наименьшей интенсивности.

4. Согласно выражению (7) глубина резания оказывает наибольшее влияние на увеличение относительного коэффициента расслоения, частота вращения фрезы – обратное влияние средней интенсивности, а подача на оборот – обратное влияние наименьшей интенсивности.

5. Согласно формуле (9) крутящий момент при фрезеровании оказывает прямое влияние на расслоение стекловолоконных композитов. Для уменьшения расслоения следует, согласно выражению (7), уменьшать глубину резания, а с целью обеспечения заданной производительности – увеличивать подачу и частоту вращения фрезы.

Список литературы

1. *Matthews F.L., Rawlings R.D.* Composite materials: engineering and science. – Oxford: The Alden Press, 1999. – 480 p. – ISBN 978-1-8557-3473-9.
2. *Батаев А.А., Батаев В.А.* Композиционные материалы: строение, получение, применение. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 384 с. – ISBN 5-7782-0315-2.
3. *Chung D.D.L.* Composite materials: functional materials for modern technologies. – London: Springer-Verlag, 2004. – 293 p. – ISBN 978-1-4471-3734-0. – DOI: 10.1007/978-1-4471-3732-0.

4. Voids in fiber-reinforced polymer composites: a review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance / M. Mehdikhani, L. Gorbatiikh, I. Verpoest, S.V. Lomov // *Journal of Composite Materials*. – 2019. – Vol. 53, iss. 12. – P. 1579–1669. – DOI: 10.1177/0021998318772152.

5. *Arola D., Ramulu M.* Orthogonal cutting of fiber-reinforced composites: a finite element analysis // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 1997. – Vol. 39, iss. 5. – P. 597–613. – DOI: 10.1016/S0020-7403(96)00061-6.

6. *Марков А.М.* Технологические особенности механической обработки деталей из композиционных материалов // *Научные технологии в машиностроении*. – 2014. – № 7 (37). – С. 3–8.

7. Исследование влияния технологических параметров на прочность резьбового соединения в деталях из углепластика / А.М. Марков, В.Н. Некрасов, А.М. Салман, С.В. Гайст, Ц. Су // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2020. – Т. 22, № 2. – С. 6–15. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.2-6-15.

8. Delamination failure of a woven glass fiber composite / T. Ebeling, A. Hiltner, E. Baer, I.M. Fraser, M.L. Orton // *Journal of Composite Materials*. – 1997. – Vol. 31, iss. 13. – P. 1318–1333. – DOI: 10.1177/002199839703101304.

9. *Palanikumar K., Karunamoorthy L., Karthikeyan R.* Assessment of factors influencing surface roughness on the machining of glass fiber-reinforced polymer composites // *Materials and Design*. – 2006. – Vol. 27, iss. 10. – P. 862–871. – DOI: 10.1016/j.matdes.2005.03.011.

10. *Krishnamoorthy A., Boopathy S.R., Palanikumar K.* Delamination analysis in drilling of cfrp composites using response surface methodology // *Journal of Composite Materials*. – 2009. – Vol. 43, iss. 24. – P. 2885–2902. – DOI: 10.1177/0021998309345309.

11. *Kini M.V., Chincholkar A.M.* Effect of machining parameters on surface roughness and material removal rate in finish turning of $\pm 30^\circ$ glass fibre reinforced polymer pipes // *Materials and Design*. – 2010. – Vol. 31, iss. 7. – P. 3590–3598. – DOI: 10.1016/j.matdes.2010.01.013.

12. *Марков А.М., Счиггел Н.* Обеспечение качества изготовления деталей из композита // *Инновации в машиностроении (ИнМаш-2017): сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции, 28–30 сентября 2017 г.* – Новосибирск, 2017. – С. 219–225.

13. Forecasting of machined surface waviness on the basis of self-oscillations analysis / E.B. Belov, S.L. Leonov, A.M. Markov, A.A. Sitnikov, V.A. Khomenko // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sci-*

ence. – 2017. – Vol. 50 (1). – DOI: 10.1088/1755-1315/50/1/012053.

14. Delamination resistance of composite laminated structures reinforced with angled, threaded, and anchored Z-pins / A. Virakthi, S.W. Kwon, S.W. Lee, M.E. Roberson // *Journal of Composite Materials*. – 2018. – Vol. 53, iss. 11. – DOI: 10.1177/0021998318805201.

15. *Song D.Y., Takeda N., Ogihara S.* A method of stress analysis for interfacial property evaluation in thermoplastic composites // *Materials Science and Engineering: A*. – 2000. – Vol. 278, iss. 1–2. – P. 242–246. – DOI: 10.1016/S0921-5093(99)00578-X.

16. *Ramulu M., Kim D., Choi G.* Frequency analysis and characterization in orthogonal cutting of glass fiber reinforced composites // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2003. – Vol. 34, iss. 10. – P. 949–962. – DOI: 10.1016/S1359-835X(03)00203-3.

17. *Петров М.Г.* Оценка структурного состояния композиционных материалов в процессе разрушения // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2014. – № 4. – С. 61–67.

18. *Song S., Zuo D.* Modelling and simulation of whirling process based on equivalent cutting volume // *Simulation Modelling Practice and Theory*. – 2014. – Vol. 42. – P. 98–106. – DOI: 10.1016/j.simpat.2013.12.011.

19. *Palanikumar K., Davim J.P.* Assessment of some factors influencing tool wear on the machining of glass fibre-reinforced plastics by coated cemented carbide tools // *Journal of Materials Processing Technology*. –

2009. – Vol. 209, iss. 1. – P. 511–519. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.02.020.

20. *Kalla D., Sheikh-Ahmad J., Twomey J.* Prediction of cutting forces in helical end milling fiber reinforced polymers // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2010. – Vol. 50, iss. 10. – P. 882–891. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2010.06.005.

21. Experimental analysis of the influence of drill point angle and wear on the drilling of woven CFRPs / N. Feito, J. Díaz-Álvarez, A. Díaz-Álvarez, J.L. Cantero, M.H. Miguélez // *Materials*. – 2014. – Vol. 7 (6). – P. 4258–4271. – DOI: 10.3390/ma7064258.

22. *Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Мулюхин Н.В.* Пути решения проблем формообразования режущего инструмента для обработки неметаллических композитов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 36–46. – DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.3-36-46.

23. *Рычков Д.А., Янюшкин А.С.* Способ повышения эффективности производства изделий из полимерных композитов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2016. – № 3. – С. 23–30. – DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-23-30.

24. *Лобанов Д.В., Рычков Д.А., Сидоренко С.А.* Повышение эффективности процесса подготовки производства изделий из композитов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2017. – № 1. – С. 20–29. – DOI: 10.17212/1994-6309-2017-1-20-29.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2020 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Technological Assurance of Fiberglass Composites Surface Layer Quality during End Milling

Andrei Markov^a, Vyacheslav Nekrasov^b, Jian Su^c, Azhar Salman^d, Sergei Gayst^e,
Mikhail Andreev^{f,*}

I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenina avenue, Barnaul, Altai region, 656038, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-3101-9711>, andmarkov@inbox.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-8122-4641>, sla44@mail.ru,
^c <https://orcid.org/0000-0001-5120-3623>, 278507234@qq.com, ^d <https://orcid.org/0000-0002-6584-1439>, azharmansoor76@gmail.com,
^e <https://orcid.org/0000-0001-8697-6263>, sergei-gaist@mail.ru, ^f <https://orcid.org/0000-0002-3660-3343>, m194@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 29 September 2020

Revised: 29 October 2020

Accepted: 15 November 2020

Available online: 15 December 2020

Keywords:

Milling

Delamination

Composite material

Cutting parameters

ABSTRACT

Introduction. Today fiberglass is one of the most common composite materials. Therefore, its mechanical processing continues to be the subject of many studies. In many scientific publications, the influence of cutting modes and structural and geometric parameters of the tool on the roughness of the machined surface, cutting forces and wear of the cutting tool has been established. The purpose of this work is to study the effect of machining modes on delamination and roughness of fiberglass composites during end milling, as well as testing the hypothesis about the effect of torque on the delamination. The relevance of the study is due to the fact that delamination, along with roughness, has a significant impact on the quality of processing and subsequent assembly of the finished product. A criterion is proposed for assessing the magnitude of the delamination of composite materials during its machining. The results of experimental studies of the torque on the cutter, the relative coefficient of delamination and surface roughness from cutting conditions are presented. **Methods:** factorial experiment using an experimental assembly developed by the authors based on a piezoelectric torque sensor. The installation allows real-time recording of the change in torque during the milling process, depending on the modes of operation. **Results and Discussion.** A comparative analysis of the obtained dependences showed that the torque is directly related to delamination. To reduce the delamination, the depth of cut should be decreased, and in order to ensure the specified productivity, the feed and the rotational speed of the cutter should be increased. The presented results confirm the prospects of the developed approach aimed at machining new classes of composite materials.

For citation: Markov A.M., Nekrasov V.N., Su J., Salman A.M., Gayst S.V., Andreev M.V. Technological assurance of fiberglass composites surface layer quality during end milling. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 31–40. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-31-40. (In Russian).

References

1. Matthews F.L., Rawlings R.D. *Composite materials: engineering and science*. Oxford, The Alden Press, 1999. 480 p. ISBN 978-1-8557-3473-9.
2. Bataev A.A., Bataev V.A. *Kompozitsionnye materialy: stroenie, poluchenie, primeneniye* [Composite materials: structure, production, application]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2002. 384 p. ISBN 5-7782-0315-2.
3. Chung D.D.L. *Composite materials: functional materials for modern technologies*. London, Springer-Verlag, 2004. 293 p. ISBN 978-1-4471-3734-0. DOI: 10.1007/978-1-4471-3732-0.
4. Mehdikhani M., Gorbatikh L., Verpoest I., Lomov S.V. Voids in fiber-reinforced polymer composites: a review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance. *Journal of Composite Materials*, 2019, vol. 53, iss. 12, pp. 1579–1669. DOI: 10.1177/0021998318772152.

* Corresponding author

Andreev Mikhail V., Ph.D. (Engineering)

I.I. Polzunov Altai State Technical University,

46 Lenina avenue,

656038, Barnaul, Russian Federation

Tel.: +7 (960) 962-73-11, e-mail: m194@mail.ru

5. Arola D., Ramulu M. Orthogonal cutting of fiber-reinforced composites: a finite element analysis. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1997, vol. 39, iss. 5, pp. 597–613. DOI: 10.1016/S0020-7403(96)00061-6.
6. Markov A.M. Tekhnologicheskie osobennosti mekhanicheskoi obrabotki detalei iz kompozitsionnykh materialov [Technological features of machining of parts from composite materials]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2014, no. 7 (37), pp. 3–8.
7. Markov A.M., Nekrasov V.N., Salman A.M., Gayst S.V., Su J. Issledovanie vliyaniya tekhnologicheskikh parametrov na prochnost' rez'bovogo soedineniya v detalyakh iz ugleplastika [Study of the influence of technological parameters on the strength of a threaded connection in carbon fiber parts]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, iss. 2, pp. 6–15. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.2-6-15.
8. Ebeling T., Hiltner A., Baer E., Fraser I.M., Orton M.L. Delamination failure of a woven glass fiber composite. *Journal of Composite Materials*, 1997, vol. 31, iss. 13, pp. 1318–1333. DOI: 10.1177/002199839703101304.
9. Palanikumar K., Karunamoorthy L., Karthikeyan R. Assessment of factors influencing surface roughness on the machining of glass fiber-reinforced polymer composites. *Materials and Design*, 2006, vol. 27, iss. 10, pp. 862–871. DOI: 10.1016/j.matdes.2005.03.011.
10. Krishnamoorthy A., Boopathy S.R., Palanikumar K. Delamination analysis in drilling of cfrp composites using response surface methodology. *Journal of Composite Materials*, 2009, vol. 43, iss. 24, pp. 2885–2902. DOI: 10.1177/0021998309345309.
11. Kini M.V., Chincholkar A.M. Effect of machining parameters on surface roughness and material removal rate in finish turning of $\pm 30^\circ$ glass fibre reinforced polymer pipes. *Materials and Design*, 2010, vol. 31, iss. 7, pp. 3590–3598. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.01.013.
12. Markov A.M., Schiggel N. [Quality assurance of parts production from composites]. *Innovatsii v mashinostroenii (InMash-2017): sbornik trudov VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Proceedings VIII International Scientific and Practical Conference “Innovations in mechanical engineering (ISPCIME-2017)”]*. Novosibirsk, 2017, pp. 219–225. (In Russian).
13. Belov E.B., Leonov S.L., Markov A.M., Sitnikov A.A., Khomenko V.A. Forecasting of machined surface waviness on the basis of self-oscillations analysis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 50 (1), pp. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/50/1/012053.
14. Virakthi A., Kwon S.W., Lee S.W., Robeson M.E. Delamination resistance of composite laminated structures reinforced with angled, threaded, and anchored Z-pins. *Journal of Composite Materials*, 2018, vol. 53, iss. 11. DOI: 10.1177/0021998318805201.
15. Song D.Y., Takeda N., Ogihara S. A method of stress analysis for interfacial property evaluation in thermoplastic composites. *Materials Science and Engineering: A*, 2000, vol. 278, iss. 1–2, pp. 242–246. DOI: 10.1016/S0921-5093(99)00578-X.
16. Ramulu M., Kim D., Choi G. Frequency analysis and characterization in orthogonal cutting of glass fiber reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2003, vol. 34, iss. 10, pp. 949–962. DOI: 10.1016/S1359-835X(03)00203-3.
17. Petrov M.G. Otsenka strukturnogo sostoyaniya kompozitsionnykh materialov v protsesse razrusheniya [Evaluation of the composite materials structural condition during fracture]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2014, no. 4, pp. 61–67.
18. Song S., Zuo D. Modelling and simulation of whirling process based on equivalent cutting volume. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2014, vol. 42, pp. 98–106. DOI: 10.1016/j.simpat.2013.12.011.
19. Palanikumar K., Davim J.P. Assessment of some factors influencing tool wear on the machining of glass fibre-reinforced plastics by coated cemented carbide tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, iss. 1, pp. 511–519. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.02.020.
20. Kalla D., Sheikh-Ahmad J., Twomey J. Prediction of cutting forces in helical end milling fiber reinforced polymers. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, vol. 50, iss. 10, pp. 882–891. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2010.06.005.
21. Feito N., Díaz-Álvarez J., Díaz-Álvarez A., Cantero J.L., Miguélez M.H. Experimental analysis of the influence of drill point angle and wear on the drilling of woven CFRPs. *Materials*, 2014, vol. 7 (6), pp. 4258–4271. DOI: 10.3390/ma7064258.
22. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Mulyukhin N.V. Puti resheniya problem formoobrazovaniya rezhushchego instrumenta dlya obrabotki nemetallicheskih kompozitov [The lines of approach to the problems of shaping the

cutting tool for processing nonmetallic composites]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, iss. 3, pp. 36–46. DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.3-36-46.

23. Rychkov D.A., Yanyushkin A.S. Sposob povysheniya effektivnosti proizvodstva izdelii iz polimernykh kompozitov [Method for improving the efficiency of products from polymer composites]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2016, no. 3, pp. 23–30. DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-23-30.

24. Lobanov D.V., Rychkov D.A., Sidorenko S.A. Povyshenie effektivnosti protsessa podgotovki proizvodstva izdelii iz kompozitov [Efficiency upgrading of composite material product production preparation]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2017, no. 1, pp. 20–29. DOI: 10.17212/1994-6309-2017-1-20-29.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2020 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).