

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 21, № 4, 2019**

**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

DOI: 10.15593/2224-9877/2019.4.05  
УДК 621.9.048.6

**А.С. Дударев<sup>1</sup>, А.Г. Добринский<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

<sup>2</sup>Институт металлорежущих станков Штутгартского университета, Штутгарт, Германия

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВИБРАЦИОННОГО СВЕРЛЕНИЯ**  
**ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Описаны технологические особенности механической обработки полимерных композиционных материалов на примере распространенной и востребованной промышленностью технологической операции – сверления. Технологические особенности заключаются в затруднении получения высокого качества обработанных поверхностей полимерных композиционных материалов (отсутствие распушенности, расслоений на входе и выходе инструмента, требуемых параметров шероховатости), низкой производительности, а также в малой стойкости режущего инструмента. Рассмотрены пути повышения эффективности сверления полимерных композиционных материалов за счет искусственно накладываемых вибраций различных диапазонов: низкочастотных, высокочастотных и ультразвуковых. Приведен обзор возможных эффектов от комбинированного ультразвукового сверления полимерных композиционных материалов, когда на схему традиционного сверления накладывают колебания в ультразвуковом диапазоне. Наиболее значимым замеченным эффектом при ультразвуковом сверлении является снижение силовых факторов, т.е. существенное снижение (до 80 %) сил резания, что обуславливает высокое качество обработки полимерных композиционных материалов. Природа такого снижения сил резания до сих пор в литературе не раскрыта, кроется в вибрационной механике и переменных контактах режущего инструмента и заготовки. Записаны законы ультразвуковых колебаний в виде уравнений гармонических колебаний. Для сверления полимерных композиционных материалов выбраны амплитуды от 15 до 30 мкм в зависимости от обрабатываемых диаметров отверстий, а также рекомендованы частоты для наложения 20 и 50 кГц. Созданы предпосылки для совместного научного проекта на базе двух университетов: Пермского национального исследовательского политехнического университета и Института металлорежущих станков Штутгартского университета – для исследования ультразвукового сверления.

**Ключевые слова:** вибрация, колебания, ультразвук, инструмент, сверление, полимерный композиционный материал, частота, амплитуда, стойкость, резание, эффективность.

**A.S. Dudarev<sup>1</sup>, A.G. Dobrinski<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

<sup>2</sup>Institute for Machine Tools University of Stuttgart, Stuttgart, Germany

**EFFICIENCY OF VIBRATION DRILLING POLYMER COMPOSITE MATERIALS**

The article describes the technological features of the machining of polymer composite materials on the example of a common and popular manufacturing process operation - drilling. Technological features consist in the difficulty of obtaining high quality machined surfaces of polymer composite materials (lack of fluffiness, delamination at the tool inlet and outlet, the required roughness parameters), low productivity, as well as low durability of the cutting tool. Ways of increasing the efficiency of drilling polymer composites due to artificially superimposed vibrations of various ranges: low-frequency, high-frequency and ultrasonic are considered. An overview of the possible effects of the combined ultrasonic drilling of polymer composites is given, when vibrations in the ultrasonic range are superimposed on the traditional drilling scheme. The most significant effect observed with ultrasonic drilling is the reduction of force factors, that is, a significant reduction (up to 80%) of cutting forces, which leads to high quality processing of polymer composite materials. The nature of this reduction in cutting forces has not yet been disclosed in the literature; it lies in the vibration mechanics and variable contacts of the cutting tool and the workpiece. The laws of ultrasonic oscillations are written in the form of harmonic oscillations equations. For drilling polymer composites, amplitudes from 15 μm to 30 μm were chosen, depending on the hole diameters being processed, and frequencies for applying are recommended: 20 kHz and 50 kHz. The article created the prerequisites for a joint research project on the basis of two universities: Perm National Research Polytechnic University and Institute for Machine Tools (IfW) University of Stuttgart, for the study of ultrasonic drilling.

**Keywords:** vibration, oscillation, ultrasound, instrument, drilling, polymer composite material, frequency, amplitude, durability, cutting, efficiency.

В последнее время в связи с повышением тактико-технических характеристик транспортных систем все больше в их конструкциях применяют изделия из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Изготовление деталей и сборочных единиц транспортных систем из полимерных композиционных материалов на основе высокопрочных углеродных, стекловолоконных, органических и других видов волокон позволяет решить проблему минимизации их массы с одновременным повышением механической прочности, жесткости, размерной стабильности, акустоизоляционных свойств. Полимерные композиционные материалы обладают удельной прочностью и жесткостью в направлении армирования, в 3–5 раз превышающими аналогичные характеристики изделий из стали. Кроме этого, они также имеют низкую теплоэлектропроводность, стойкость к агрессивным химическим средам, хорошие электроизоляционные свойства и др.

Типовыми изделиями широкого применения полимерных композиционных материалов могут служить: сборочные единицы авиационных двигателей, элементы конструкций современных самолетов, сборочные единицы судов, детали кузовов автомобилей, товары народного потребления, в том числе спортивные товары и др. Таким образом, создание новых технологических процессов изготовления изделий из полимерных композиционных материалов, а также их механическая обработка весьма актуальны.

Механическая обработка путем резания полимерных композиционных материалов необходима для получения требуемых показателей качества изделий, является трудоемкой, обладает рядом специфических особенностей, определяемых главным образом особенностями структуры и свойств материалов.

В мировой технической литературе практически отсутствуют систематизированные сведения о резании полимерных композиционных материалов.

Однако практика применения полимерных композиционных материалов промышленными предприятиями требует научно обоснованных рекомендаций по выбору режущего инструмента, специального оборудования и рациональных параметров режима обработки.

Среди наиболее распространенных операций механической обработки в технологическом цикле производства изделий из полимерных композиционных материалов являются: сверление, фрезерование, точение, реза шлифование.

Процессу резания полимерных композиционных материалов, с одной стороны, сопутствуют яв-

ления, наблюдаемые при резании любых материалов, такие как стружкообразование, силовые и тепловые явления, изнашивание режущего инструмента, а с другой стороны, каждое из перечисленных явлений сильно отличается от аналогичных явлений, возникающих при резании металлов.

Авиационная, автомобильная и другая техника из полимерных композиционных материалов имеет высокую стоимость, не технологична в изготовлении, так как при механической обработке деталей из полимерных композиционных материалов сталкиваются со следующими основными проблемами:

1. Сложность получения высокого качества обрабатываемых поверхностей (отсутствия сколов и расслоений, необходимой шероховатости) из-за ярко выраженной анизотропии свойств и низкой адгезионной связи армирующих волокон (наполнителя) с матрицей (связующим) полимерных композиционных материалов [1–3].

2. Низкая теплопроводность полимерных композиционных материалов, обуславливающая малый отвод теплоты из зоны резания [4, 5].

3. Интенсивное абразивное воздействие твердого наполнителя полимерных композиционных материалов приводит к низкой стойкости режущего инструмента [2, 6, 7].

4. Низкая производительность процесса из-за невысоких скоростей резания, так как недопустимо применение смазочно-охлаждающих жидкостей на водной основе (СОЖ) вследствие влагопоглощающих свойств ПКМ [2, 8].

5. Упругое восстановление (усадка) формованных поверхностей полимерных композиционных материалов снижает точность обработки [2, 9].

6. Выделение мелкодисперсных летучих токсичных частиц ПКМ при обработке [1, 2, 7, 10, 11].

Обзор научных статей показал, что дальнейшее повышение производительности механической обработки, повышение точности и качества обработанных поверхностей полимерных композиционных материалов возможно при применении высокоскоростной обработки [12, 13], алмазного инструмента [14, 15], комбинированных методов обработки, в том числе резания с вибрациями [16–19].

При традиционном резании принято считать, что практически все колебательные явления нежелательны. Во многих учебных изданиях, в том числе в работах [20, 21], указано, что необходимо использовать такие условия, при которых не возникают колебания. Станкостроительные компании стремятся увеличить точность и повысить жест-

кость станков и инструмента. Между тем с повышением жесткости системы станок–приспособление–инструмент–заготовка и уменьшением амплитуды колебаний этих систем увеличивается частота  $\omega$  гармонической составляющей силы резания, выражаемой через переменную составляющую резания ( $p \sin \omega t$ ). В работе японского исследователя Д. Кумабэ [22] замечено, что переменная составляющая силы резания ( $p \sin \omega t$ ) необходима для стружкообразования. Исходя из этого представляет интерес практическое использование переменной составляющей силы резания. Такая переменная составляющая представляет собой переменную импульсную силу резания, которую можно получить искусственно при вибрационном резании – принудительном возбуждении вибрациями режущего инструмента.

Однако достаточно давно известны рекомендации проводить механическую обработку с наложением низкочастотных [23, 24], высокочастотных [22] колебаний, а также менее изученных ультразвуковых [19, 22, 25, 26]. Многие явления вибрационной обработки малоизучены, а вибрационная обработка полимерных композиционных материалов вовсе остается неизученной, особенно с теоретических позиций.

Накладываемые вибрации при резании могут быть различных диапазонов: низкочастотные ( $f = 8 \dots 16$  Гц), среднечастотные ( $f = 20 \dots 1000$  Гц), высокочастотные ( $f = 1000 \dots 19\,000$  Гц), ультразвукового диапазона ( $f = 20\,000 \dots 50\,000$  Гц). Кроме этого, существуют три направления наложения вибраций по отношению к направлению резания:

- по главной составляющей силе резания;
- по радиальной составляющей силе резания;
- по осевой составляющей силе резания.

Применительно к распространенной операции сверления механической обработки изделий из полимерных композиционных материалов – задание вибраций осуществимо в двух направлениях: вдоль оси инструмента и тангенциальное (крутильное).

Обзор публикаций по вибрационному сверлению полимерных композиционных материалов показал, что разные исследователи, научные группы и производственные станкостроительные компании проводили практические эксперименты, в ходе которых были получены различные эффекты от накладываемых колебаний при различных условиях обработки. Эти результаты сведены в таблицу.

Параметры режима обработки при вибрационном сверлении ПКМ

Исследователи	Материал заготовки (образца)	Амплитуда, мкм	Частота, Гц	Диаметр, мм	Частота вращения, об/мин	Скорость подачи, мм/мин	Замеченный эффект
V.A. Phadnis, F. Makhdum, A. Roy, V.V. Silberschmidt [27]	CFRP	12	27 800	6	40	16	Снижение осевой силы резания; существенное снижение крутящего момента. Изменение формы стружки. Снижение числа сколов и деламинации
V.A. Phadnis, F. Makhdum, A. Roy, V.V. Silberschmidt [28]	CFRP	20	32 200	6	260, 540, 800, 1200, 1700	50	Снижение силовых факторов на 30 %. Снижение коэффициента трения до околонулевых значений
F. Makhdum, V.A. Phadnis, A. Roy, V.V. Silberschmidt [29]	CFRP	12	27 800	3	40	2, 4, 8, 12, 16 и 20	Снижение сил резания на 80 %. Снижение температурного фактора. Повышение качества обработки. Повышение округлости (точности) отверстий
Компания «Guhring» [30] (Германия)	ПКМ	$\leq 160$	300	Нет данных	Нет данных	Нет данных	Повышение производительности, сокращение времени обработки, снижение осевой силы
Компания «Guhring» [30] (Германия)	ПКМ	$\leq 15$	20 000 ÷ 50 000	Нет данных	Нет данных	Нет данных	Снижение силовых факторов
T. Ishida, K. Noma, Y. Kakinuma [31]	Углепластик (CFRP)	9,1	70 200	3,5	8000	270	

Вышеперечисленный обзор показал, что сверление с вибрациями наиболее эффективно в ультразвуковом диапазоне, особенно с точки зрения повышения качества обработки полимерных композиционных материалов.

Запишем законы ультразвуковых колебаний. С технической точки зрения ультразвуковые колебания реализовать проще по синусоидальному закону. Тогда требуется перевести частоту ультразвуковых осевых колебаний в циклическую частоту и установить начальную фазу.

Уравнение гармонических колебаний

$$x = A \sin \omega t, \quad (1)$$

где  $A$  – амплитуда;  $\omega$  – циклическая частота;  $t$  – время колебаний, с.

Амплитуда должна быть меньше продольной подачи. Согласно рекомендациям из работы [1], величина подач для сверления отверстий в ПКМ диаметром  $d = 2$  мм составляет  $S = 0,03 \dots 0,1$  мм/об, а для диаметров  $d = 6,5$  мм выбирается  $S = 0,05 \dots 0,12$  мм/об. Выбираем амплитуду для диаметров 2 мм –  $A_2 = 0,015$  мм = 15 мкм; для диаметров 6,5 мм –  $A_{6,5} = 0,030$  мм = 30 мкм.

Напишем уравнения гармонических колебаний ультразвукового сверления для частотного диапазона  $f = 20\,000 \dots 50\,000$  Гц. Начальная фаза колебаний равна нулю.

Итак, начальная фаза равна нулю:  $\Psi_0 = 0$ .

Определяем циклическую частоту для  $f = 20$  кГц:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi 20\,000 = 40\,000\pi.$$

Определяем циклическую частоту для  $f = 50$  кГц:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi 50\,000 = 100\,000\pi.$$

Перепишем формулу (1) после подстановок в форме гармонических колебаний:

– для амплитуды  $A_2 = 0,015$  мм, частоты  $f = 20$  кГц:  $x = 0,015 \sin 40\,000\pi$ ;

– для амплитуды  $A_2 = 0,015$  мм, частоты  $f = 50$  кГц:  $x = 0,015 \sin 100\,000\pi$ ;

– для амплитуды  $A_{6,5} = 0,030$  мм, частоты  $f = 20$  кГц:  $x = 0,030 \sin 40\,000\pi$ ;

– для амплитуды  $A_{6,5} = 0,030$  мм, частоты  $f = 50$  кГц:  $x = 0,030 \sin 100\,000\pi$ .

Построим графики зависимостей колебаний от времени обработки (рисунок) по синусоидальному закону.

С помощью приведенных частотных параметров возможно реализовать ультразвуковое сверление полимерных композиционных материалов.

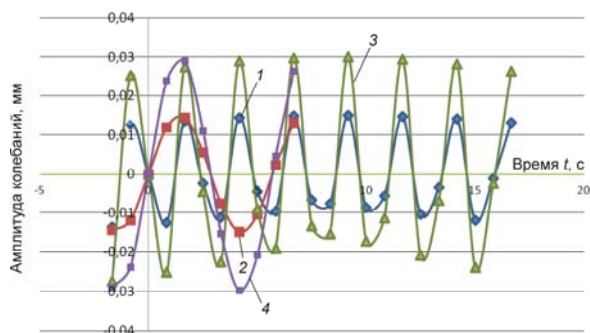


Рис. Осциллограммы колебаний ультразвукового сверления: 1 – с амплитудой  $A = 0,015$  мм, частотой  $f = 20$  кГц, для диаметра  $d = 2$  мм; 2 – с амплитудой  $A = 0,015$  мм, частотой  $f = 50$  кГц, для диаметра  $d = 2$  мм; 3 – с амплитудой  $A = 0,030$  мм, частотой  $f = 20$  кГц, для диаметра  $d = 6,5$  мм; 4 – с амплитудой  $A = 0,030$  мм, частотой  $f = 50$  кГц, для диаметра  $d = 6,5$  мм

Сотрудники кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ПНИПУ (г. Пермь) обладают необходимыми компетенциями в области лезвийной и алмазной обработки полимерных композиционных материалов, а также на кафедре имеется промышленное оборудование для проведения испытаний различных методов размерной обработки.

Институт металлорежущих станков Штутгартского университета широко известен своими успешными научно-исследовательскими и прикладными работами по разработке новых методов обработки самых разных материалов и технологических средств их реализации. Например, на базе Института металлорежущих станков Штутгартского университета созданы технологии ультразвукового сверления камня и других материалов [32–34]. Смоделировано и изготовлено технологическое оснащение для этого процесса.

## Выводы

1. Рассмотрены разные эффекты при вибрационном, разных диапазонов колебаний сверлении полимерных композиционных материалов. Выявлено, что наибольшую эффективность приносит ультразвуковой диапазон.

2. Найден резерв повышения качества обработки полимерных композиционных материалов за счет снижения усилий резания и изменения коэффициента трения, наблюдаемого при использовании ультразвуковых колебаний.

3. Эффект от ультразвука со снижением коэффициента трения будет наблюдаться и на алмазно-абразивном, и на лезвийном инструменте.

4. Для более углубленного изучения процесса вибрационного сверления полимерных композиционных материалов необходимо открыть финансирование по линиям РФФИ (Российский научный фонд) + DFG (Немецкое научное сообщество) или РФФИ (Российский фонд фундаментальных исследований) + DFG, что позволит развить эту тему двум университетам: Институту металлорежущих станков Штутгартского университета и Пермскому национальному исследовательскому политехническому университету. Обе организации могут дополнить друг друга.

### Список литературы

1. Дударев А.С. Способы сверления отверстий в полимерных композиционных материалах. Разработка и исследование методов стабилизации процесса сверления отверстий в полимерных композиционных материалах: учеб. пособие для вузов. – Пермь: LAP Lambert Academic Publ., 2014. – 170 с.
2. Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987. – 176 с.
3. Сироткин О.С., Гришин В.И., Литвинов В.Б. Проектирование, расчет и технология соединений авиационной техники. – М.: Машиностроение, 2006. – 331 с.
4. Мелентьев Р.Ю. Определение теплопроводности полимерных композиционных материалов // Науч. вестник Донец. гос. металлург. акад. – 2013. – № 2(12Е). – С. 123–130.
5. Мелентьев Р.Ю. Температурное поле заготовки в процессе кольцевого сверления полимерных композитов // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: тез. докл. междунар. науч.-практ. конф., г. Одесса, 21–23 сент. 2016 г. – Одесса, 2016. – С. 22–24.
6. Обработка отверстий в композиционных и неметаллических материалах / Н.А. Криштопа [и др.]. – Киев: Тэхника, 1980. – 126 с.
7. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Технология инструментального обеспечения производства изделий из композиционных неметаллических материалов: моногр. / ТНТ. – Старый Оскол, 2013. – 296 с.
8. Кобаяши А. Обработка пластмасс резанием / пер. с англ. П.А. Кунина. – М.: Машиностроение, 1974. – 192 с.
9. Dudarev A., Volegov K., Kurzanov G. Rheonomic phenomenon shrinkage of holes drilled in fibreglass and carbonfibre-reinforced polymer composites // Mech. of Adv. Materials and Modern Proc. – 2017. – Vol. 3, iss. 1, art. 17. – 9 p. DOI: 10.1186/s40759-017-0033-1
10. Davim Paulo J. Machining composites materials. – London: Wiley-iSTE, 2009. – 262 p.
11. Krishnaraj V., Zitoun R., Paulo Davim J. Drilling of polymer-matrix composites. – Berlin-Heidelberg: Springer, 2013. – 110 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-38345-8>
12. Обработка сигналов измерения сил резания в высокоскоростном фрезеровании на обрабатывающих

центрах с ЧПУ / В.Д. Вермель, Г.А. Губанов, А.Е. Леонтьев, Л.Л. Чернышев // Автоматизация в промышленности. – 2018. – № 5. – С. 56–60.

13. Андреев М.В., Шитюк А.А. Особенности высокоскоростной обработки полимерных композиционных материалов // Ползуновский альманах. – 2016. – № 4. – С. 89–93.
14. Бойцов А.Г., Дудаков В.Б., Плешаков А.В. Новое в обработке композитов // РИТМ. – 2014. – № 6(94). – С. 36–38.
15. Бойцов А.Г., Дудаков В.Б., Шкарупа М.И. Алмазная обработка – инновационные пути // РИТМ. – 2014. – № 9(97). – С. 38–42.
16. Изменение механических свойств полимерного материала при воздействии ультразвуковых колебаний / Д.А. Негров, Е.Н. Еремин, В.Ю. Путинцев [и др.] // Ученые Омска – Региону: материалы I Регион. науч.-техн. конф. – Омск, 2016. – С. 81–84.
17. Схема приспособления для вибрационного сверления отверстий в композиционных материалах / С.А. Чевычелов, М.В. Снопков, И.В. Бондарцев [и др.] // Изв. Юго-Запад. гос. ун-та. – 2017. – № 6(75). – С. 76–84.
18. Проектирование приспособления для вибрационного сверления в композиционных материалах / М.В. Снопков, С.А. Чевычелов, М.Ш. Гатиев [и др.] // Наука XXI в.: материалы междунар. науч.-практ. конф., 12 апреля 2016. – СПб., 2016. – С. 37–40.
19. Cutting forces in ultrasonically assisted drilling of carbon fibre-reinforced plastics / F. Makhdum, L.T. Jennings, A. Roy, V.V. Silberschmidt // J. of Phys.: Conf. IOP Publish. Modern Pract. Stres. Vibration Analysis. – 2012. – Ser. 382. – 012019.
20. Суслов А.Г. Технология машиностроения: учеб. для студ. машиностр. спец. вузов. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 2007. – 430 с.
21. Технология машиностроения: учеб. / А.В. Якимов, А.А. Якимов, В.П. Ларшин, В.И. Свирицев. – Пермь, 2002. – 563 с.
22. Кумабэ Д. Вибрационное резание. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
23. Подураев В.Н. Обработка резанием с вибрациями. – М.: Машиностроение, 1975. – 350 с.
24. Блехман И.И. Вибрационная механика и вибрационная реология (теория и приложения). – М.: Физматлит, 2017. – 865 с.
25. Киселев Е.С. Интенсификация процессов механической обработки использованием энергии ультразвукового поля / УЛГТУ. – Ульяновск, 2003. – 186 с.
26. Марков А.И. Резание труднообрабатываемых материалов при помощи ультразвуковых и звуковых колебаний. – М.: Машгиз, 1968. – 331 с.
27. Ultrasonically assisted drilling: machining towards improved structural integrity in carbon / epoxy composites / Vaibhav A. Phadnis, F. Makhdum, A. Roy, V.V. Silberschmidt // Key Eng. Materials Online: 2013-07-31. – Switzerland: Trans. Tech. Publ., 2013. – Vol. 569–570. – P. 49–55. DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.569-570.49](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.569-570.49)
28. Ultrasonically assisted drilling of carbon fibre reinforced plastics / F. Makhdum, D.N.P. Norddin, A. Roy, V.V. Silberschmidt // Solid State Phenomenon. – 2012. – Vol. 188. – P. 170–175.

29. Effect of ultrasonically-assisted drilling on carbon-fibre-reinforced plastics / F. Makhdum, V.A. Phadnis, A. Roy, V.V. Silberschmidt // *J. of Sound and Vibration*. – November 2014. – Vol. 333, iss. 23, 24. – P. 5939–5952. DOI: 10.1016/j.jsv.2014.05.042

30. Guhring. Special issue of the brochure within. Ifu tagung bearbeitung von Verbundwerkstoffen Institut für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart. – Guhring, 2016. – 22 p.

31. Helical milling of carbon fiber reinforced plastics using ultrasonic vibration and liquid nitrogen / T. Ishida, K. Noma, Y. Kakinuma [et al.] // *Proc. CIRP 24 (2014) New Prod. Tech. in Aersp. Industry – 5th Mach. Innov. Conf., MIC 2014*. – 2014. – P. 13–18.

32. Ultrasonic deep hole drilling in electrolytic cooper ECu 57 / U. Heisel, J. Wallaschek, R. Eissele, C. Potthast // *CIRP Annals – Manuf. Techn.* – 2008. – Vol. 57. – P. 53–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.078>

33. Ultrasonic-assisted machining of stone / U. Heisel, R. Eisseler, R. Eber, J. Wallaschek, J. Twiefel, M. Huang // *Production Eng.* – December 2011. – Vol. 5, iss. 6. – P. 587–594.

34. Kinematic model for ultrasonic-assisted manufacturing of bore holes with undefined cutting edges / U. Heisel [et al.] // *Adv. Materials Res.* – 2011. – Vol. 223. – P. 794–803.

### References

1. Dudarev A.S. Spособы sverleniia otverstii v polimernykh kompozitsionnykh materialakh. Razrabotka i issledovanie metodov stabilizatsii protsessa sverleniia otverstii v polimernykh kompozitsionnykh materialakh [Methods of drilling holes in polymeric composite materials. Development and research of methods to stabilize the process of drilling holes in polymeric composite materials. Perm': LAP Lambert Academic Publ., 2014, 170 p.

2. Stepanov A.A. Obrabotka rezaniem vysokoprochnykh kompozitsionnykh polimernykh materialov [Cutting of high-strength composite polymeric materials]. Leningrad: Mashinostroenie, Leningr. otdelenie, 1987, 176 p.

3. Sirotkin O.S., Grishin V.I., Litvinov V.B. Proektirovanie, raschet i tekhnologiya soedinenii avia-tsionnoi tekhniki [Design, calculation and technology of aircraft connections]. Moscow: Mashinostroenie, 2006, 331 p.

4. Melent'ev R.Iu. Opredelenie teploprovodnosti polimernykh kompozitsionnykh materialov [Determination of thermal conductivity of polymer composites]. *Nauch. vestnik Donets. gos. metallurg. akad.*, 2013, no. 2(12E), pp. 123–130.

5. Melent'ev R.Iu. Temperaturnoe pole zagotovki v protsesse kol'tsevogo sverleniia polimernykh kompozitov [Workpiece temperature field in the process of ring drilling of polymer composites]. *Novye i netraditsionnye tekhnologii v resurso- i energosberezhonii: tez. dokl. mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* Odessa, 2016, pp. 22–24.

6. Krishtopa N.A. et al. Obrabotka otverstii v kompozitsionnykh i ne-metallicheskiykh materialakh [Hole machining in composite and non-metallic materials]. Kiev: Tekhnika, 1980, 126 p.

7. Lobanov D.V., Ianiushkin A.S. Tekhnologiya instrumental'nogo obespecheniia proizvodstva izdelii iz kom-

pozitsionnykh nemetallicheskiykh materialov [Technology of tool support for production of products from composite nonmetallic materials]. *TNT. Staryi Oskol*, 2013, 296 p.

8. Kobaiashi A. Obrabotka plastmass rezaniem [Plastics Cutting]. P.A. Kunina. Moscow: Mashinostroenie, 1974, 192 p.

9. Dudarev A., Volegov K., Kurzanov G. Rheonomic phenomenon shrinkage of holes drilled in fibreglass and carbon-fibre-reinforced polymer composites. *Mech. of Adv. Materials and Modern Proc.*, 2017, vol. 3, iss. 1, part. 17, 9 p. DOI: 10.1186/s40759-017-0033-1

10. Davim Paulo J. Machining composites materials. – London: Wiley-iSTE, 2009, 262 p.

11. Krishnaraj V., Zitoun R., Paulo Davim J. Drilling of polymer-matrix composites. Berlin-Heidelberg: Springer, 2013, 110 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-38345-8>

12. Vermel' V.D., Gubanov G.A., Leont'ev A.E., Chernyshev L.L. Obrabotka signalov izmereniia sil rezaniia v vysokoskorostnom freezerovanii na obrabatyvaiushchikh tsentrakh s ChPU [Processing of cutting force measurement signals in high-speed milling on CNC machining centres]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2018, no. 5, pp. 56–60.

13. Andreev M.V., Shitiuk A.A. Osobennosti vysokoskorostnoi obrabotki polimernykh kompozitsionnykh materialov [Features of high-speed processing of polymer composites]. *Polzunovskii al'manakh*, 2016, no. 4, pp. 89–93.

14. Boitsov A.G., Dudakov V.B., Pleshakov A.V. Novoe v obrabotke kompozitov [New in composite processing]. *RITM*, 2014, no. 6(94), pp. 36–38.

15. Boitsov A.G., Dudakov V.B., Shkarupa M.I. Almaznaia obrabotka – innovatsionnye puti [Diamond processing – innovative ways]. *RITM*, 2014, no. 9(97), pp. 38–42.

16. Negrov D.A., Eremin E.N., Putintsev V.Iu. Izmenenie mekhanicheskikh svoystv polimernogo materiala pri vozdeystvii ul'trazvukovykh kolebaniy [Change of mechanical properties of polymeric material under the influence of ultrasonic vibrations]. *Uchenye Omska – Regionu: materialy I Region. nauch.-tekhn. konf.* Omsk, 2016, pp. 81–84.

17. Chevychelov S.A., Snopkov M.V., Bondartsev I.V. Skhema prispособleniia dlia vibratsionnogo sverleniia otverstii v kompozitsionnykh materialakh [Schematic diagram of the device for vibrating drilling holes in composite materials]. *Izv. Iugo-Zapad. gos. un-ta*, 2017, no. 6(75), pp. 76–84.

18. Snopkov M.V., Chevychelov S.A., Gatiev M.Sh. Proektirovanie prispособleniia dlia vibratsionnogo sverleniia v kompozitsionnykh materialakh [Designing a vibratory drilling fixture for composite materials]. *Nauka XXI v.: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* Saint-Petersburg, 2016, pp. 37–40.

19. Makhdum F., Jennings L.T., Roy A., Silberschmidt V.V. Cutting forces in ultrasonically assisted drilling of carbon fibre-reinforced plastics. *Journal of Phys.: Conf. IOP Publish. Modern Pract. Stres. Vibration Analysis*, 2012, Ser. 382. – 012019.

20. Suslov A.G. Tekhnologiya mashinostroeniia [Engineering Technology]. 2nd ed. Moscow: Mashinostroenie, 2007, 430 p.

21. Iakimov A.V., Iakimov A.A., Larshin V.P., Svirshchev V.I. Tekhnologiya mashinostroeniia [Engineering technology]. Perm', 2002, 563 p.

22. Kumabe D. Vibratsionnoe rezanie [Vibration cutting]. Moscow: Mashinostroenie, 1985, 424 p.
23. Poduraev V.N. Obrabotka rezaniem s vibratsiiami [Vibration Cutting]. Moscow: Mashinostroenie, 1975, 350 p.
24. Blekhan I.I. Vibratsionnaia mekhanika i vibratsionnaia reologiya (teoriya i prilozheniya) [Vibration mechanics and vibration rheology (theory and applications)]. Moscow: Fizmatlit, 2017, 865 p.
25. Kiselev E.S. Intensifikatsiya protsessov mekhanicheskoi obrabotki ispol'zovaniem energii ul'trazvukovogo polia [Intensification of machining processes using ultrasonic field energy]. UIGTU. Ul'ianovsk, 2003, 186 p.
26. Markov A.I. Rezanie trudnoobrabatyvaemykh materialov pri pomoshchi ul'trazvukovykh i zvukovykh kolebaniy [Cutting difficult materials with ultrasonic and acoustic vibrations]. Moscow: Mashgiz, 1968, 331 p.
27. Vaibhav A., Phadnis F., Makhdum A., Roy V.V. Silberschmidt Ultrasonically assisted drilling: machining towards improved structural integrity in carbon / epoxy composites. *Key Eng. Materials Online*: 2013-07-31. Switzerland: Trans. Tech. Publ., 2013, vol. 569–570, pp. 49–55. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.569-570.49
28. Makhdum F., Norddin D.N.P., Roy A., Silberschmidt V.V. Ultrasonically assisted drilling of carbon fibre re-inforced plastics. *Solid State Phenomenon*, 2012, vol. 188, pp. 170–175.
29. Makhdum F., Phadnis V.A., Roy A., Silberschmidt V.V. Effect of ultrasonically-assisted drilling on carbon-fibre-reinforced plastics. *Journal of Sound and Vibration*, 2014, vol. 333, iss. 23, 24, pp. 5939–5952. DOI: 10.1016/j.jsv.2014.05.042
30. Guhring. Special issue of the brochure within. Ifu tagung bearbeitung von Verbundwerkstoffen Institut für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart. Guhring, 2016, 22 p.
31. Ishida T., Noma K., Kakinuma Y. et al. Helical milling of carbon fiber reinforced plastics using ultrasonic vibration and liquid nitrogen. *Proc. CIRP 24 (2014) New Prod. Tech. in Aerosp. Industry – 5th Mach. Innov. Conf., MIC 2014*. 2014, pp. 13–18.
32. Heisel U., Wallaschek J., Eissele R., Potthast C. Ultrasonic deep hole drilling in electrolytic sooper ECu 57. *CIRP Annals – Manuf. Techn.*, 2008, vol. 57, pp. 53–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.078>
33. Heisel U., Eisseler R., Eber R., Wallaschek J., Twiefel J., Huang M. Ultrasonic-assisted machining of stone. *Production Eng.* December 2011, vol. 5, iss. 6, pp. 587–594.
34. Heisel U. et al. Kinematic model for ultrasonic-assisted manufacturing of bore holes with undefined cutting edges. *Adv. Materials Res.*, 2011, vol. 223, pp. 794–803.

Получено 27.06.19

Опубликовано 26.11.19

#### Сведения об авторах

**Дударев Александр Сергеевич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: ktn80@mail.ru.

**Добринский Александр Глебович** (Штутгарт, Германия) – кандидат технических наук, научный сотрудник Института металлорежущих станков Штутгартского университета; e-mail: alexander.dobrinski@ifw.uni-stuttgart.de.

#### About the authors

**Aleksandr S. Dudarev** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Innovative Engineering Technology, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: ktn80@mail.ru

**Aleksandr G. Dobrinski** (Stuttgart, Germany) – Ph.D. in Technical Sciences, Research Officer, Institute for Machine Tools University of Stuttgart; e-mail: alexander.dobrinski@ifw.uni-stuttgart.de.