

УДК 621.95

Л. Н. Девин^{1,*}, А. И. Гречук¹, Б. В. Лупкин²

¹Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля

НАН Украины, г. Киев, Украина

²Национальный аэрокосмический университет

им. Н. Е. Жуковского “Харьковский авиационный институт”,

г. Харьков, Украина

**ldevin@ism.kiev.ua*

Сверление отверстий в деталях из композиционных материалов с использованием инструментов из сверхтвердых поликристаллов

Показаны преимущества применения инструментов из поликристаллов сверхтвердых материалов при сверлении отверстий в деталях из волокнистых композитов. Приведены результаты сравнения качества отверстий при использовании сверл из быстрорежущей стали и с алмазно-твердосплавными пластинками. Установлено, что применение сверл с алмазно-твердосплавными пластинками обеспечивает высокое качество сверления отверстий в деталях из волокнистых композиционных материалов.

***Ключевые слова:** волокнистые полимерные композиционные материалы, стеклопластик, сверление, алмазно-твердосплавные пластины.*

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Последние десятилетия характеризуются ростом применения композиционных материалов (КМ) в различных отраслях машиностроения. Как правило, КМ состоят из связующего вещества (матрицы) и волокнистого наполнителя [1]. Самыми распространенными являются композиты, наполнителем которых являются стекловолокно (стеклопластики) и углеродное волокно (углепластики) [2], а также комбинация различных типов волокон с металлическими слоями [3]. Волокнистые полимерные композиционные материалы (ВПКМ) имеют высокие упругие свойства, коррозионную и антимагнитную стойкость, а также высокие удельные значения прочностных характеристик, что делает их незаменимыми в различных машиностроительных отраслях, в первую очередь в авиа-, ракето-, судостроении и энергетике, а также в медицине, строительстве, робототехнике и автомобилестроении [4].

Корпусные детали летательных аппаратов, выпущенные ГП “Антонов”, на 50 % состоят из КМ [5]. За рубежом наибольшее количество КМ для авиационной техники применяют в самолетах Boeing-737, Boeing-787 “Dreamliner”, Airbus A380, A350XWB [6]. Например, Конвертоплан американской компании “Bell”, мод. V22 Osprey, на 60 % состоит из углепластика и на 12 % из стеклопластика [7].

В соответствии со “Стратегией развития Украинской авиационной промышленности на период до 2020 года” приоритетом является развитие про-

изводства и модификации самолетов, вследствие чего увеличивается применение КМ [8].

Таким образом, КМ являются современной, перспективной и уникальной альтернативой традиционным металлическим конструкционным материалам. Возможность формирования исходных криволинейных поверхностей любой сложности в большинстве случаев не требует предварительной механической обработки КМ. Однако для крепления таких деталей применяются заклепочные или болтовые соединения. Наиболее распространенной операцией механообработки при этом является сверление, что обуславливает необходимость изготовления отверстий для соединения различных деталей [9].

Сверление отверстий в изделиях из ВПКМ осуществляется различными сверлами в зависимости от технических и экономических требований. Используются двух-, трех- и четырехперовые спиральные и ступенчатые сверла из быстрорежущей стали, твердого сплава или сверла, оснащенные алмазотвердосплавными пластинами (АТП). Также применяются перовые и кольцевые сверла с рабочей частью, содержащей алмазный порошок. Подробная классификация различных типов сверл описана в [2, 10, 11].

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Качество просверленных отверстий определяется совокупностью нескольких параметров, таких как состояние волокон, расслоение композита на входе и выходе сверла из отверстия, выкрашивание поверхности отверстия и термодеструкция матрицы.

Наличие несрезанных волокон сопряжено со многими факторами: неверно подобранные режимы резания, не оптимальная геометрия или конструкция сверла. Большой радиус режущих кромок сверла приводит к пластической деформации в зоне резания, что обуславливает смятие и разрыв волокон вместо того, чтобы их перерезать. На рис. 1 показано отверстие, сформированное сверлом из быстрорежущей стали с одноплоскостной заточкой, задним углом 10° и углом в плане 120° . Высокая прочность волокон приводит к вырыву частиц матрицы (выкрашиванию). Так как толщина волокон композита достигает 0,05 мм, большая подача или скорость резания не позволяют обеспечить перерезание волокна при вращении сверла, в результате чего остаются несрезанные волокна (см. рис. 1, б).

При врезании сверла в заготовку из ВПКМ, происходит вспучивание поверхностных слоев композита с вырывом волокон поверхностного слоя и отрыв крайних его частей на выходе сверла из отверстия. В основном расслоение (см. рис. 1, в) определяется осевой составляющей силы резания [10] и подачей [12].

Температура плавления матрицы большинства ВПКМ не превышает 180–350 °С [13]. Показатели допустимого температурного нагружения зависят от химических свойств матрицы и волокон композита. Значительный перегрев приводит к термодеструкции композиционного материала и снижению надежности болтовых и клепочных соединений из таких материалов [11, 14, 15]. Так как ВПКМ являются анизотропными материалами, тепло в них распространяется не равномерно. Волокна КМ являются более теплопроводными и менее теплоемкими, в то время как матрица менее теплопроводна и более теплоемка, поэтому тепло в большей степени распространяется по волокну, однако аккумулируется в связке. При этом 90 % тепла переходит в сверло, 5 % – в стружку и 5 % – в заготовку [11, 14]. При использовании в качестве материала режущей части сверла твердый сплав и быстрорежущую сталь,

имеющих высокий коэффициент теплоемкости, инструмент становится аккумулятором тепла, прогревая еще несрезанные слои ВПКМ и увеличивая их начальную температуру. Уменьшение контакта режущих поверхностей инструмента с ВПКМ и свободный сход стружки по передней поверхности сверла способствуют уменьшению температуры в зоне резания и позволяют устранить деструкцию КМ при сверлении.

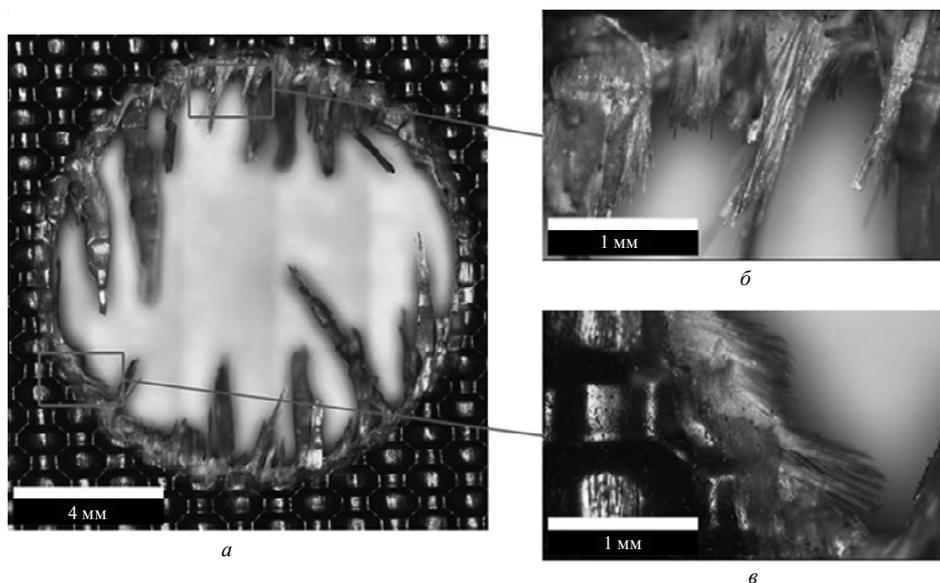


Рис. 1. Дефекты сверления ВПКМ: общий вид отверстия с дефектами (а), несрезанные волокна (б), расслоение материала (в).

Исходя из перечисленных особенностей сверления ВПКМ, можно сделать вывод, что предпочтительно использовать инструменты из более теплопроводных инструментальных материалов с возможностью обеспечения меньшего радиуса режущей кромки и адгезионного взаимодействия с материалом стружки. Применение инструментов из поликристаллов сверхтвердых материалов на основе алмаза и кубического нитрида бора (КНБ) позволяет решить поставленные задачи.

Сверла со вставками из синтетических алмазов широко применяются для обработки различных типов композиционных материалов и демонстрируют более низкий износ, обеспечивая высокое качество отверстия [15].

Алмазные сверла из поликристаллов производят такие фирмы, как “Sandvik Coromant” (Швеция), “SECO Tools” (Швеция), “Guhring” (Германия). В основном это спиральные сверла с пластинами PCD для получения отверстий разной глубины. Одним из предназначений таких сверл является сверление отверстий в пакетах из пластин композитов различного типа, а также в пакетах, состоящих из комбинаций пластин угле- или стеклопластика с пластинами из алюминиевых и титановых сплавов.

В связи с возрастанием спроса на изделия из композиционных материалов и тенденции рынка режущего инструмента к использованию сверхтвердых материалов для обработки отверстий в изделиях из ВПКМ, исследования применения и эффективности использования инструментов из композитов на основе алмаза и КНБ являются актуальными и современными.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Использование инструментов из различных сверхтвердых материалов является эффективным при сверлении отверстий в таких труднообрабатываемых материалах, как ВПКМ. Однако конструкции спиральных двухперьевых сверл были спроектированы для сверления отверстий в заготовках из металлов разной толщины, обычно в несколько раз превышающих диаметр сверла. Такие сверла обеспечивают переменную геометрию переднего и заднего углов вдоль главной режущей кромки из-за множества переточек сверла по сравнению со сверлами со спиральными стружечными канавками. Композиционные материалы, отличающиеся сочетанием высокой прочности и малым удельным весом, применяются для изготовления деталей с толщиной стенок от 0,5 до 20 мм, что сравнимо с диаметром сверла. Поскольку применение инструментов из сверхтвердых материалов является эффективным, а отсутствие необходимости сверления глубоких отверстий позволяет упростить традиционные конструкции спиральных сверл, то главной целью исследования было обеспечение высокого качества поверхности отверстий в изделиях из ВПКМ за счет оптимальной и постоянной геометрии сверла со вставками АТП, конструкция которого учитывала особенности структуры и свойств ВПКМ.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБОСНОВАНИЕ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

Для сверления отверстий в изделиях из ВПКМ было разработано сверло оригинальной конструкции со вставками из АТП (рис. 2). Перовое сверло (см. рис. 2, б) содержит главную и вспомогательную режущие кромки, перемычку, стружечную канавку, цилиндрический хвостовик, впаянные в корпус режущие лезвия из двухслойных АТП, включающие слой поликристалла алмаза на подложке из твердого сплава, твердосплавная вершина сверла.

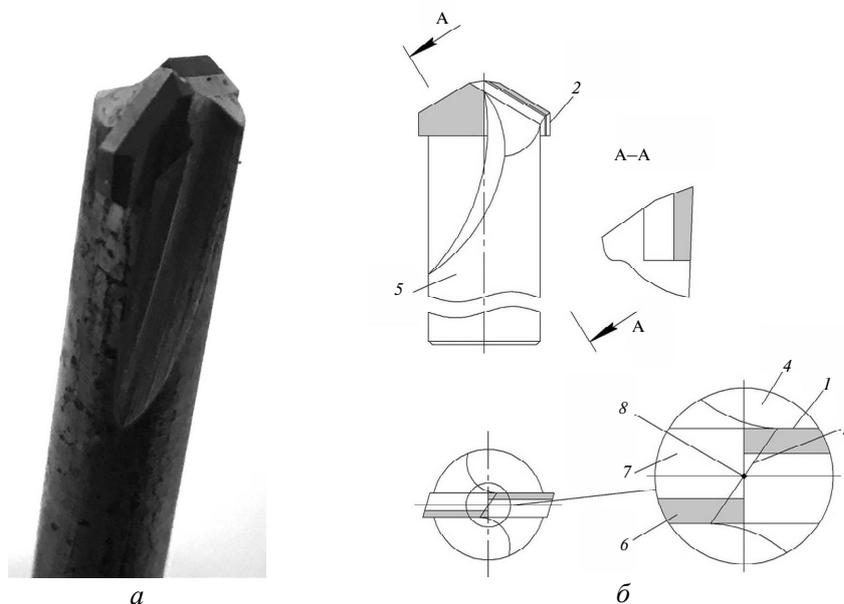


Рис. 2. Сверло со вставками из АТП (а) и его схема (б): главная (1) и вспомогательная (2) режущие кромки, перемычка (3), стружечная канавка (4), цилиндрический хвостовик (5); режущие лезвия из двухслойных АТП, включающие слой поликристалла алмаза (6) на подложке из твердого сплава (7), твердосплавная вершина сверла (8).

Две симметрично расположенные пластины АТП формируют режущую часть сверла, которая имеет главную и вспомогательную режущие кромки (РК). Заточку сверла выполняли по двум плоскостям таким образом, чтобы перемычка включала алмазную и твердосплавную части (см. рис. 2, б). При сверлении перемычка выполняет роль центрирующего элемента с нулевой скоростью резания. Двухплоскостная заточка обеспечивает пересечение задних поверхностей в одной точке. Поскольку пластины расположены в осевом сечении, соотношение толщины твердосплавной и алмазной частей двухслойной АТП подобраны таким образом, чтобы центральная точка и выходящие из нее части перемычки состояли из твердого сплава. Перемычка под воздействием осевой силы выполняет не столько резание, сколько выдавливание слоев композита в сторону режущих кромок инструмента, а алмаз является очень твердым, но хрупким материалом и может разрушиться. Твердосплавная вершина сверла уменьшает вероятность разрушения перемычки под воздействием осевой силы резания, так как прочность твердого сплава при сжатии превышает прочность алмаза.

Вспомогательные режущие кромки сформированы параллельно оси сверла. Они выполняют доводочную операцию – срезают ранее несрезанные волокна. При сверлении отверстий в изделиях из ВПКМ без использования подложки со стороны выхода сверла (что часто встречается при сверлении крупногабаритных или тонкостенных деталей в авиастроении) участок композита в зоне отверстия упруго прогибается под воздействием осевой силы и затем возвращается к исходному состоянию в процессе резания.

Формообразующими при сверлении являются периферические точки главных РК, которые образуются в результате пересечения главных задних, передних и вспомогательных задних поверхностей. Такое конструктивное решение увеличивает остроту периферических точек РК.

Отсутствие спиральной канавки позволяет управлять параметрами передней поверхности сверла, обеспечивая ее лучшую шероховатость и более стабильный сход стружки, позволяет избежать наростообразования из-за низкого коэффициента трения между алмазом и композитом.

Заточку сверла выполняли на станке Safag Spinesso 38 (Швейцария), алмазным кругом 11A2, 125×30×10×5×32 со связкой В1-11 и зернистостью алмазного порошка 100/80 для черновой и 20/14 для чистовой обработки. Режимы заточки: скорость – 26 м/с, подача – 10 дв. ход/мин, СОТС – FUCHS EcoCool 68f2.

Радиус заострения РК определяли на 3D-микроскопе Alicona Infinite Focus в Лундском университете (Швеция), путем построения сечений 3D-модели режущей кромки, используя стандартную утилиту Alicona – IF-Edge Master Module (рис. 3).

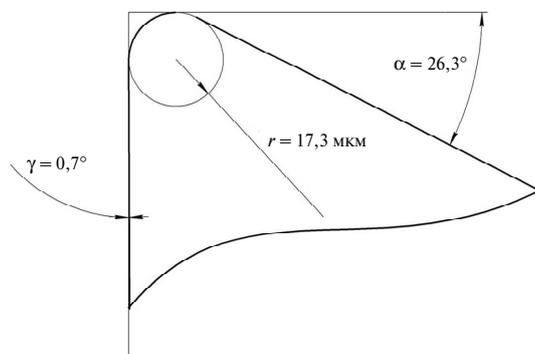


Рис. 3. Схема измерения радиуса режущих кромок.

Радиус закругления РК составлял 17,3 мкм, задний угол – 26,3°, передний угол – 0,7°, угол в плане – 120°. В различных исследованиях [16, 17] радиус закругления сверл из быстрорежущей стали изменялся в диапазоне 10–28 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сверление пластин из стеклопластика выполняли на автоматизированном станде для исследования процессов резания [18] на базе токарного станке ТПК-125ВМ (рис. 4). Образцы, изготовленные из серийного стеклопластика НТК “Антонов” (г. Киев, Украина) с ортотропным армированием, толщиной 4 мм сверлили при скорости вращения 600 об/мин с постоянной подачей 0,1 мм/об. Сверление проводили без подкладки под обрабатываемое изделие. Испытывали стандартные спиральные сверла диаметром 8 мм из быстрорежущей стали с двухплоскостной заточкой углов $\alpha_1 = 10^\circ$, $\alpha_2 = 25^\circ$, $\omega = 30^\circ$, а также разработанные авторами сверла диаметром 8 мм со вставками из АТП. Отверстия, просверленные стандартными сверлами, показаны на рис. 5, а, б, сверлами с пластинками – на рис. 5, в, г.

Дефекты обработанных отверстий оценивали с помощью 3D-микроскопа Alicona Infinite Focus.

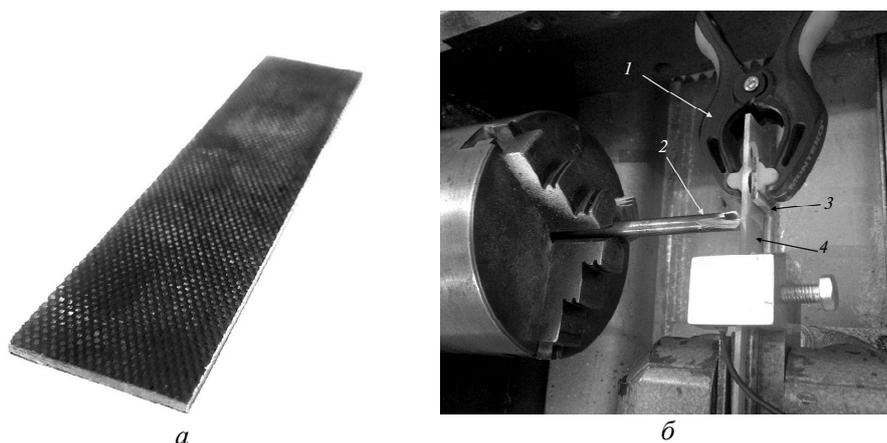


Рис. 4. Сверление стеклопластика: заготовка из стеклопластика (а), установка заготовки на станке (б); 1 – крепежная струбцина; 2 – сверло; 3 – упорная пластина; 4 – заготовка.

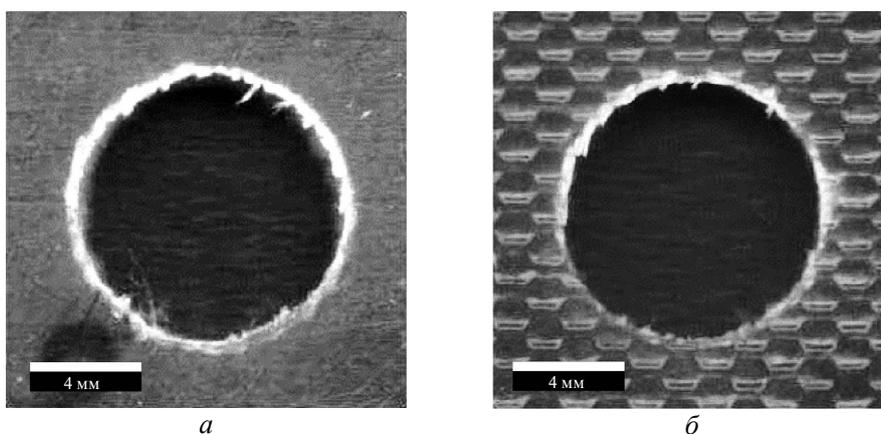


Рис. 5. Дефекты отверстий в стеклопластике: на входе (а) и на выходе (б) сверла из быстрорежущей стали; на входе (в) и на выходе (г) сверла с АТП.

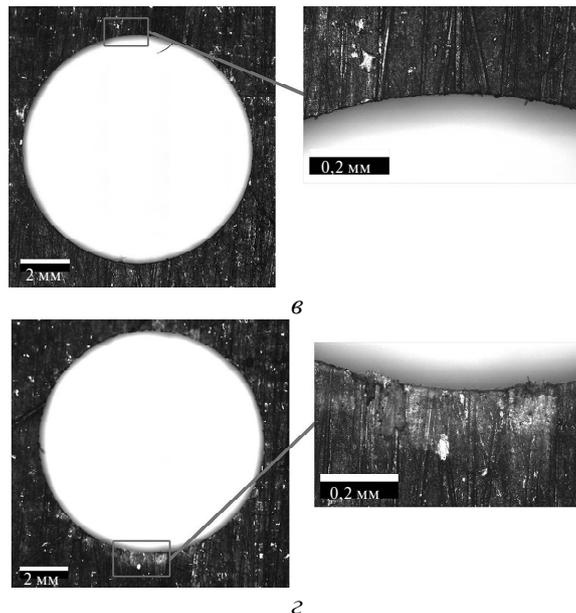


Рис. 5. (Продолжение).

В [19] качество просверленных отверстий характеризовали площадью видимых участков расслоения S_p и площадью несрезанных волокон S_b (рис. 6), а в [16] – параметром F_d , определяемым по формуле

$$F_d = \frac{D_{\text{макс}}}{D_{\text{ном}}},$$

где $D_{\text{макс}}$ – диаметр концентрической окружности, проведенной через максимальную длину расслоения; $D_{\text{ном}}$ – номинальный диаметр отверстия (см. рис. 6).

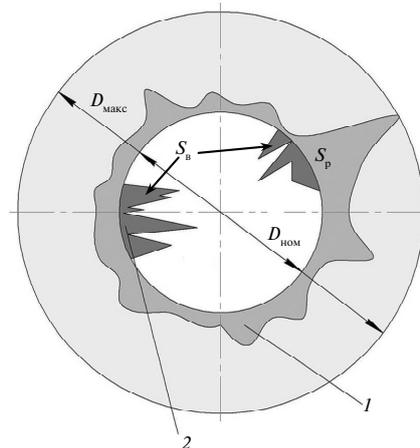


Рис. 6. Схема для определения качества отверстия: 1 – расслоение; 2 – несрезанные волокна.

Различие значений F_d для просверленных отверстий сверлами обоих типов равно 0,1, что находится в пределах погрешности измерений. Таким образом, F_d не может служить критерием расслоения при сравнении данных

типов сверл для данных условий обработки. Площади расслоений S_p , полученные при работе сверлом из быстрорежущей стали, равны $6,1 \text{ мм}^2$, а сверлом с АТП – $0,2 \text{ мм}^2$, площади S_b соответственно – $4,1$ и $1,2 \text{ мм}^2$. Это свидетельствует о меньшем размере образовавшихся дефектов при использовании разработанного сверла с АТП.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что параметр F_d не может служить критерием для оценки величины расслоения при сравнении исследуемых сверл диаметром 8 мм из быстрорежущей стали и сверл с АТП при обработке со скоростью вращения 600 об/мин и подачей 0,1 мм/об.

Установлено, что дефекты отверстий, такие как расслоение и несрезанные волокна, целесообразно характеризовать площадью видимых участков расслоения S_p и площадью несрезанных волокон S_b . По этому критерию дефекты отверстий при сверлении стеклопластика сверлом из быстрорежущей стали больше, чем при сверлении разработанным сверлом из АТП на 97 % (расслоение) и на 68 % (несрезанные волокна).

Показано переваги застосування інструментів з полікристалів надтвердих матеріалів при свердлінні отворів у деталях із волокнистих композитів. Наведено результати порівняння якості отворів при використанні свердел зі швидкорізальної сталі й з алмазно-твердосплавними пластинами. Встановлено, що застосування свердел з алмазно-твердосплавними пластинами забезпечує високу якість свердління отворів у деталях із волокнистих композиційних матеріалів.

Ключові слова: волокнисті полімерні композиційні матеріали, склопластик, свердління, алмазно-твердосплавні пластини.

The advantages of using tools of polycrystalline superhard materials for drilling workpieces of fiber reinforced composites are shown. The results of a comparative quality assessment of holes produced by high-speed steel drill bits and polycrystalline diamond inserted drill bits are discussed. The polycrystalline diamond inserted drill bits have been found to provide high-quality drilling of fiber reinforced composite materials.

Keywords: fiber reinforced polymer composites, glass fiber reinforced plastic, drilling, polycrystalline diamond inserts

1. *Beaumont P., Soutis C., Hodzic A.* Structural Integrity and Durability of Advanced Composites. – Woodhead Publ., 2015. – 839 p.
2. *Liu D. F., Tang Y. J., Cong W. L.* A review of mechanical drilling for composite laminates // Compos. Struct. – 2012. – **94**, N 4. – P. 1265–1279.
3. *Sinmazçelik T., Avcu E., Bora M. Ö., Çoban O.* A review: fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods // Mater. Design. – 2011. – **32**, N 7. – P. 3671–3685.
4. *Che D., Saxena I., Han P., Guo P., Ehman K. F.* Machining of carbon fiber reinforced plastics/polymers: A literature review // J. Manufact. Sci. Eng. – 2014. – **136**, N 3, art. 034001.
5. *Кива Д. С.* Этапы становления и начала развернутого применения полимерных композиционных материалов в конструкциях пассажирских и транспортных самолетов (1970–1995 гг.) // Авиационно-космическая техника и технология. – 2014. – № 6. – С. 5–16.
6. *Ilcewicz L.* Past Experiences and Future Trends for Composite Aircraft Structure. – Montana State University Seminar, 2009. – 21 p.
7. *Soutis C.* Fibre reinforced composites in aircraft construction // Prog. Aerosp. Sci. – 2005. – **41**, N 2. – P. 143–151.
8. *Гайдачук А. В.* Состояние и перспективы применения композиционных материалов в газотурбинных двигателях летательных аппаратов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 3. – С. 11–20.
9. *Hocheng H.* Machining Technology for Composite Materials: Principles and Practice. – Elsevier, 2011. – 458 p.

10. Лупкин Б. В., Мамлюк О. В., Драник А. И., Касс А. Л. Влияние технологических параметров процесса сверления КМ на прочность // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2016. – № 71. – С. 125–135.
11. Feito N. Numerical analysis of the influence of tool wear and special cutting geometry when drilling woven CFRPs // Compos. Struct. – 2016. – **138**. – P. 285–294.
12. Soutis C. Fibre reinforced composites in aircraft construction // Prog. Aerosp. Sci. – 2005. – **41**, N 2. – P. 143–151.
13. Степанов А. А. Обработка резанием высокопрочных композиционных материалов. – Л.: Машиностроение. – 1987. – 176 с.
14. Залого В. А., Криворучко Д. В., Колесник В. А. Измерение температуры при сверлении волокнистых полимерных композиционных материалов // Резание и инструмент в технологических системах. – 2013. – № 83. – С. 138–145.
15. Xu J., An Q., Chen M. A comparative evaluation of polycrystalline diamond drills in drilling high-strength T800S/250F CFRP // Compos. Struct. – 2014. – **117**. – P. 71–82.
16. Gaugel S., Sripathy P., Haeger A. A comparative study on tool wear and laminate damage in drilling of carbon-fiber reinforced polymers (CFRP) // Ibid. – 2016. – **155**. – P. 173–183.
17. Faraz A., Biermann D., Weinert K. Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates // Int. J. Mach. Tools Manuf. – 2009. – **49**, N 15. – P. 1185–1196.
18. Девин Л. Н., Стахнив Н. Е., Стахнив М. Н. Автоматизированная система исследования процесса резания // Резание и инструменты в технологических системах: Сб. тр. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2006. – Вып. 64. – С. 178–183.
19. Eneuw E. D., Ramulu M. Experimental study of surface quality and damage when drilling unidirectional CFRP composites // J. Mater. Res. Technol. – 2014. – **3**, N 4. – P. 354–362.

Поступила 17.10.16