

УДК 621.91:678.5

Л. Н. Девин¹, д-р техн. наук; А. И. Гречук¹, асп.; Б. В. Лупкин², д-р техн. наук

¹Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев,

²Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков,
Украина

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СВЕРЛЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Исследованы тенденции использования композиционных материалов в машиностроении. Описаны результаты экспериментальных исследований по сверлению заготовок из стеклопластика с измерением сигналов акустической эмиссии. Приведены результаты анализа качества обработанных отверстий и полученных сигналов акустической эмиссии.

Ключевые слова: композиционный материал, стеклопластик, сверление, акустическая эмиссия.

Современные тенденции в машиностроении свидетельствуют об увеличении объемов применения композиционных материалов (КМ) в различных отраслях промышленности, среди которых авиа-, ракетно- и автомобилестроение [1]. В период с 1986 по 2005 год, объем производства, а также использования КМ в машиностроении увеличился с 4030 до 31700 тыс. т, до 2020 г. прогнозируется увеличение объема использования КМ до 10 раз [2].

В автомобильной индустрии КМ интенсивно внедряются в конструкции автомобилей. Например, модель автомобиля Jaguar C-X75 на 56% состоит из КМ [3], BMW i3 – на 51% [4]. Аналогичное соотношение характерно и для других известных марок (например, Audi, Volkswagen, Mercedes).

В общем объеме мирового производства КМ, наибольшая доля авиа- и ракетостроения. С 1975 по 2015 год объем применения деталей из КМ в авиастроительной отрасли увеличился с 1 до 60% [5–7].

Среди летательных аппаратов, выпускаемых в Украине на ГП «АНТОНОВ» с использованием КМ, можно выделить самолеты АН-2М, АН-26, АН-28, АН-32, АН-70, АН-71, АН-72, АН-74, АН-124, АН-225. За рубежом наибольшее количество КМ для авиационной техники применяют в самолетах Boeing-737, Boeing-787 «Dreamliner», Airbus A380, A350XWB [5–9]. В соответствии со Стратегией развития Украинской авиационной промышленности на период до 2020 года [10] с приоритетом развития производства и модификации самолетов АН-38, АН-70, АН-124, двигателей, Д-18Т, AI-450, AI-222-25, ВК-2500 также увеличивается применение КМ [11]. В связи с этим, механическая обработка КМ является актуальной и перспективной. Особую роль при этом играют отверстия, которые в изделиях из КМ, как правило, получают сверлением.

Композиционные материалы обладают высокой прочностью, низким удельным весом и коэффициентом термического расширения, высокими демпфирующими свойствами и коррозионной стойкостью. Перечисленные физико-механические свойства выгодно отличают КМ от других конструкционных материалов и делают их незаменимыми для решения специфических конструктивных задач [12]. На примере самолетов АН-70 и Airbus

А380 (рис. 1) можно заключить, что в авиастроении наиболее употребляемыми КМ являются арамид, угле- и стеклопластик [13; 14].

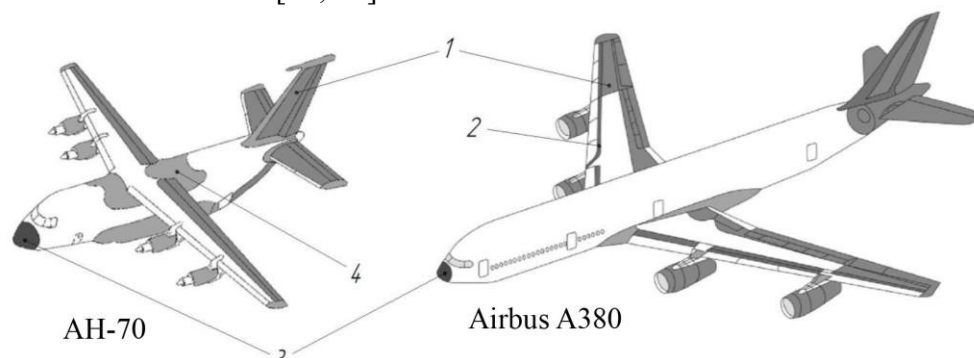


Рис. 1. Схематическое изображение летательных аппаратов с содержанием КМ: 1 – углепластик; 2 – арамид; 3 – стеклопластик; 4 – гибридные КМ (углепластик + стеклопластик)

Угле- и стеклопластики относятся к термореактивным полимерным композиционным материалам с волокнистым наполнителем (ВПКМ). Это универсальное средство при формировании крупногабаритных корпусных деталей и фасонных поверхностей, изготовление которых из металла было бы высокочрезвычайно затратным, в некоторых случаях невозможным. Для соединения большинства подобных деталей используются клепанные и болтовые соединения [15], предполагающие наличие заранее обработанных посадочных отверстий. Потому обработка отверстий является необходимой операцией для крепления деталей из КМ.

Сверление изделий из ВПКМ сопровождается явлениями, которые не встречаются при обработке металлических материалов, и вследствие, возникновения специфических дефектов способных снижать качество обработанных отверстий.

К подобным дефектам относятся следующие:

- расслоение поверхностных слоев материала со стороны входа и выхода сверла;
- несрезанные волокна;
- выкрашивание материала матрицы ВПКМ во внутренней поверхности отверстия;
- отклонение от круглости;
- термодеструкция связующего полимера.

Совокупность приведённых параметров определяет качество обработанных отверстий в изделиях из ВПКМ.

Процессы сверления ВПКМ носят стохастический характер, особенно при обработке ВПКМ с перекрестной схемой армирования. Это связано с хаотичностью попадания режущих кромок сверла на переплетения волокон композита. В процессе сверления режущие кромки сверла частично срезают волокна, а частично сминают и разрывают волокна. В первую очередь это связано с высокой прочностью волокон, что приводит к вырыванию волокон из связующего материала с разрушением исходной структуры ВПКМ. Этот эффект приводит к наличию в отверстиях несрезанных волокон. Сминание волокон также может быть причиной недостаточно острых режущих кромок сверла (радиуса заострения) и работы перемычки сверла, из-за чего увеличиваются силы резания, и как следствие возникают деформации.

Важной составляющей, влияющей на процесс сверления, является износ режущих кромок сверла. В соответствии с исследованиями А.А. Степанова [16] при максимальном допустимом износе, силы резания возрастают вдвое, что приводит к повышению температуры.

Все перечисленные явления ухудшают условия работы сверла и увеличивают теплообразование в зоне резания. Температура может достигать температуры плавления матрицы, что приводит к деструкции ВПКМ, снижению прочности изделий и надежности креплений деталей [17].

Одним из методов повышения качества сверления КМ является его диагностика путем отслеживания условий срезания волокон композита режущими кромками сверла, определения сил резания, оптимизации геометрии инструмента. Для этого применяли метод акустической эмиссии (АЭ) [1823].

Метод АЭ широко используют при исследовании процессов деформации и разрушения материалов. При обработке ВПКМ обычно регистрирует сигналы АЭ, которые характеризуют разрушение волокон и деструкции полимера связки [24].

Характеристики сигналов АЭ при сверлении ВПКМ определяли по схеме, показанной на рис.2.

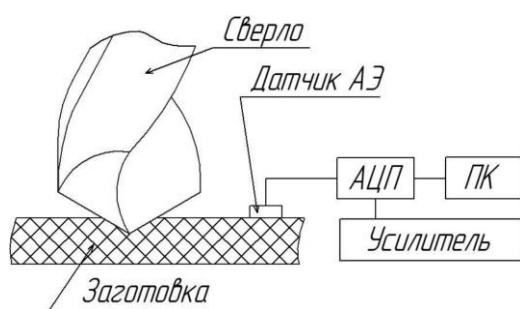


Рис. 2. Схема сверления

Обычно, датчик размещают на заготовке ВПКМ [18; 19; 22]. При сверлении пакетов алюминий+ углепластик датчик АЭ может быть закреплен непосредственно на зажимном приспособлении [25], используют также два датчика АЭ, располагая их на заготовке и на шпинделе станка [21]. Таким образом, на основе литературного поиска в настоящем исследовании датчик АЭ закрепили на заготовке на расстоянии 20 мм от оси сверла.

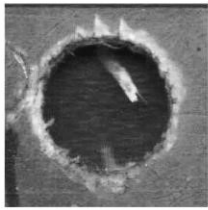
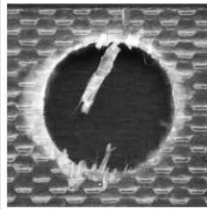
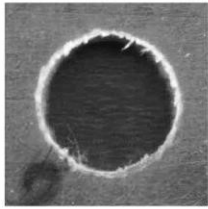
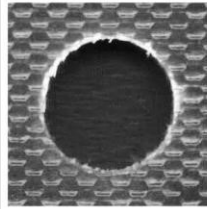
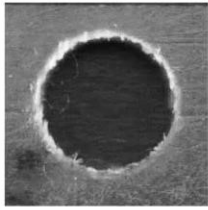
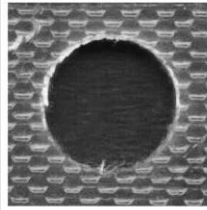
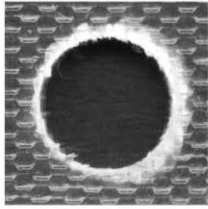
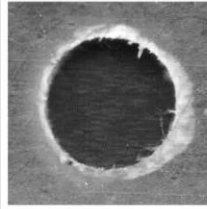
Как показано в [1823], сигналы АЭ коррелируют с износом режущих кромок. Методом АЭ можно отслеживать стадии врезания, сверления и выхода сверла из заготовки.

В соответствии с (рис. 2) экспериментально исследовали сигналы АЭ и качество отверстий с увеличением скорости резания при сверлении заготовки из стеклопластика толщиной 2 мм. Сверлили спиральным двухперьевым сверлом из быстрорежущей стали. Сверло диаметром 8 мм заточили по двум плоскостям. Геометрия режущей части сверла: $\alpha_1 = 10^\circ$, $\alpha_2 = 25^\circ$, $\omega = 30^\circ$, $2\phi = 120^\circ$.

Затачивали на заточном станке *SafagSpinnesso 38* (Швейцария), алмазным кругом 11A2, размером $125 \times 30 \times 10 \times 5 \times 32$ со связкой В1-11, зернистостью 100/80. Режимы затачивания: скорость – 26 м/с, подача 10 – дв.ход/мин, СОТС: *FUCHSEcoCool 68f2*.

Характеристика качества отверстий в соответствии с использованными режимами резания представлены в табл. 1. Сверление осуществляли при подаче 0,1 мм/об при разной частоте вращения шпинделя.

Таблица 1. Сравнительная характеристика качества обработанных отверстий

№	Подача, мм/об	Частота вращения шпинделя, об/мин	Вид отверстия со стороны входа сверла	Площадь, мм ²		Вид отверстия со стороны выхода сверла	Площадь, мм ²	
				Расслоения	Несрезанных волокон и разлохмачивания		Расслоения	Несрезанных волокон и разлохмачивания
1	0,1	300		21,4	6,4		16	8,4
2		600		9,2	2,6		3,1	5,6
3		900		10,2	3,8		1,9	4,7
4		1500		21,7	4,1		15,9	5,8

Эксперимент проводили в целях определения влияния скорости резания на сигнал АЭ и качество отверстий в изделиях из ВПКМ. Для этого рассчитали величину расслоения стеклопластика и несрезанных волокон со стороны входа и выхода сверла в среде проектирования КОМПАСv13 как площадь между окружностью диаметром 8 мм (рис. 3, а), совпадающей с просверленным отверстием, и кривой, повторяющей видимую форму расслоений (рис. 3, б).

Величину несрезанных волокон рассчитывали, как площадь между аналогичной окружностью и кривыми, описывающими формы несрезанных волокон и разлохмачивания (рис. 3, в). На погрешность измерения площади влияли отклонение от круглости просверленных отверстий и выкрашивание матрицы в слоях, близлежащих к поверхности заготовки. Из сравнения площади расслоения и несрезанных волокон следует, что при

частоте вращения от 600 - 900 об/мин площадь расслоения и несрезанных волокон минимальна и потому качество отверстий наивысшее.

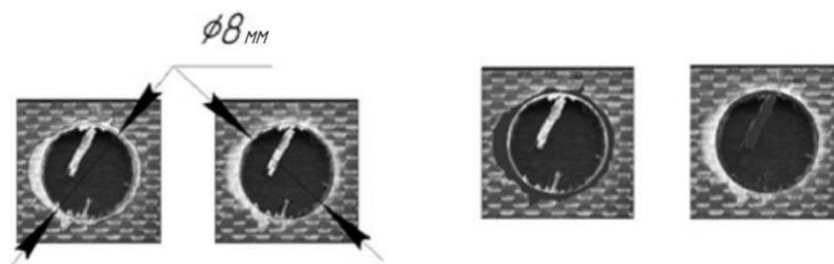


Рис. 3. Схемы измерения площади расслоения и несрезанных волокон

Сигналы АЭ, соответствующие различной частоте вращения сверла, показаны на рис. 4. Как правило, на сигнале можно выделить пять участков, соответствующих различным этапам сверления (рис. 4, 5).

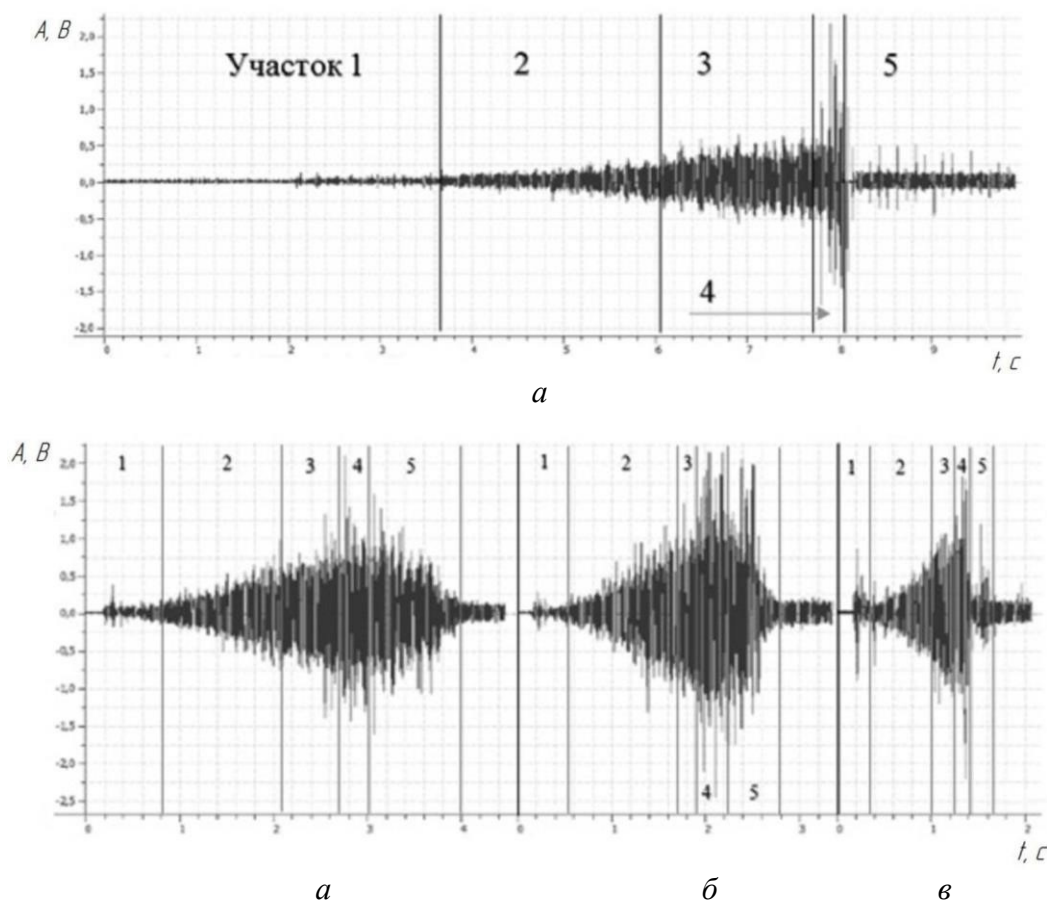


Рис. 4. Сигнал акустической эмиссии: а – $n = 300$ об/мин; б – $n = 600$ об/мин; в – $n = 600$ об/мин; г – $n = 1500$ об/мин

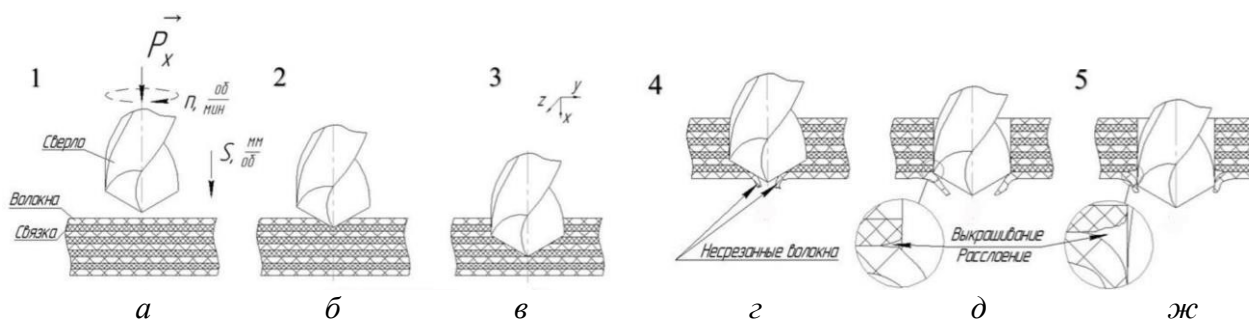


Рис. 5. Схемы сверления ВПКМ

Участки 1 и 2 соответствуют врезанию сверла в заготовку (рис. 5, а, б). На участке 1 заметно плавное нарастание сигнала, что характеризует врезание сверла в заготовку. Нарис.4, б-г отчетливо видны всплески сигнала АЭ, вызванные врезанием перемычки сверла. При этом волокна интенсивно разрываются. На участке 3 происходит формообразование отверстия (рис. 5, в). Так как толщина исследуемой заготовки 2 мм, амплитуда сигнала АЭ по мере врезания увеличивалась.

При сверлении более толстых заготовок в зоне формообразования амплитуда сигнала стабилизировалась, а наличие небольших всплесков было связано с неоднородностью КМ. На участке 4 наблюдалось пятикратное увеличение амплитуды сигнала АЭ, что связано с выводом сверла из зоны резания (рис. 5, г).

Участок 5 соответствует выходу сверла из заготовки. В то время, как участок 5 сигнала АЭ (рис. 4, б, в) имеет более плавный ниспадающий характер, в сигналах на (рис. 4. а, г), резко снижается амплитуда АЭ, что свидетельствует о разрыве последних слоев стеклопластика. При этом происходит выкрашивание близлежащего слоя связующего материала и расслоение (рис. 5 д, ж). Увеличения амплитуды АЭ в соответствии с [1823] обусловлено увеличением сил резания, а также износом режущих кромок.

Выводы

Композиционные материалы являются перспективным типом конструкционных материалов, которые применяются в различных отраслях машиностроения. Модернизация и оптимизация конструкций летательных аппаратов в авиа- и ракетостроении обуславливают необходимость исследования формирования посадочных отверстий под болтовые и клепанные соединения в изделиях из КМ.

Сверление КМ имеет особенности, исследовать которые целесообразно методом АЭ. Приведенные литературные источники свидетельствуют об актуальности и популярности поставленных задач, а также подтверждают возможности применения АЭ для исследования процессов стружкообразования при сверлении КМ.

Проведенные экспериментальные исследования по сверлению стеклопластика с помощью АЭ позволяют отслеживать разрывы волокон, выкрашивание матрицы, расслоение ВПКМ, что является действенным инструментом оптимизации сверления.

Досліджено тенденції використання композиційних матеріалів у машинобудуванні. Описано результати експериментальних досліджень зі свердління заготовок зі склопластика з вимірюванням сигналів акустичної емісії. Наведено результати аналізу якості оброблених отворів і отриманих сигналів акустичної емісії.

Ключові слова: композиційний матеріал, склопластик, свердління, акустична емісія.

APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION IN THE STUDY OF DRILLING COMPOSITE MATERIALS

In this article we have studied the trends in the use of composite materials in engineering, describes the results on the drilling of workpieces of fiberglass with the measurement of acoustic emission signals. Given the qualities of the analysis of the results obtained and processed holes acoustic emission signal.

Key words: composite material, fiberglass, drilling, acoustic emission.

Литература

1. Коваленко В. А., Кондратьев А. В. Применение полимерных композиционных материалов в изделиях ракетно-космической техники как резерв повышения ее массовой и функциональной эффективности // *Авиационно-космическая Техника и Технология*. – 2011. – № 5. – С. 14–20.
2. Лысенко А. А. Тенденции формирования мирового рынка углеродных волокон // *Технический текстиль*. – 2005. – № 12. – С. 33–37.
3. BMW i3–Drive train & technology. – Режим доступа: [http://www.bmw.com/com/en/newvehicles/i/i3/2015/showroom/drive technology.html](http://www.bmw.com/com/en/newvehicles/i/i3/2015/showroom/drive%20technology.html).
4. C-X75.The most advanced jaguar ever created. – Режим доступа: <http://www.jaguar.com/about-jaguar/concept-cars/cx75.html>.
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. Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов (аналитический обзор): монография / Д. В. Криворучко, В. А. Залого, В. А. Пасечник и др.; под общ. ред. Проф. В. А. Залого. – Сумы : Университет.кн., 2013. – 272 с.
7. Plewicz L. Past Experiences and Future Trends for Composite Aircraft Structure – Режим доступа : <http://www.coe.montana.edu/me/faculty/cairns/Composites/11-10-09li.pdf>.
8. Бондарь В. Г., Бычков С. А., Король В. Н. Решение проблемы создания авиаконструкций из полимерных композиционных материалов на АНТК // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2003. – № 8. – С. 5–13.
9. Двейрин А. З., Майорова Е. В. Анализ эффективности внедрения интегральных конструкций с трубчатыми элементами из полимерных композиционных материалов // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. – 2011. – № 4. – С. 65–77.
10. Про схвалення Стратегії розвитку вітчизняної авіаційної промисловості на період до 2020 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 27.12.08 р. № 1656-р – Режим доступу : <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/1656-2008-p>
11. Гайдачук А. В. Состояние и перспективы применения композиционных материалов в газотурбинных двигателях летательных аппаратов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2004. – № 3. – С. 11–20.
12. Hocheng H. *Machining technology for composite materials*. Woodhead Publ. Limited. – 2012. – 462 p.
13. Цариковский В. И. АНТК «Антонов»–лидер в создании конструкций из композиционных материалов в авиационной промышленности // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2006. – № 1. – С. 27.
14. Thévenin R. *Airbus Composite Structures Perspectives on safe maintenance practice* // Doc. Airbus. – 2007.

15. Братухин В. А., Братухин А. В. Конструкции и технологии крепежных систем авиационной техники. – К., 2011.
16. Степанов А. А. Обработка резанием высокопрочных композиционных материалов. – Л.: Машиностроение, Ленинград Отд-ние, 1987 – 176 с.
17. Влияние технологических параметров процесса сверления на статическую прочность болтовых соединений ПКМ / Б. В. Лупкин, О. В. Мамлюк, А. И. Дранык, В. С. Петропавловский, А. С. Касс // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2013. – № 13. – С. 30–41.
18. Arul S., Vijayaraghavan L., Malhotra S.K. Online monitoring of acoustic emission for quality control in drilling of polymeric composites // J. of Mater. Proc. Tech. – 2007. –185. – N. 1. – P. 184–190.
19. Ravishankar S. R., Murthy C. R. L. Application of acoustic emission in drilling of composite laminates //NDT & E International. – 2000. –33. – N 6. – P. 429–435.
20. Karimi N. Z., Minak G., Kianfar P. Analysis of damage mechanisms in drilling of composite materials by acoustic emission // Composite Structures. – 2015. –131. – С. 107–114.
21. Acoustic emission for controlling drill position in fiber-reinforced plastic and metal stacks R. Wertheim et al. //CIRP Annals-Manufacturing Tech. – 2012. – 61. – N. 1. – P. 75–78.
22. Velayudham A., Krishnamurthy R., Soundarapandian T. Acoustic emission based drill condition monitoring during drilling of glass/phenolic polymeric composite using wavelet packet transform //Mater. Sci. and Eng: A. – 2005. – 412. – N 1. – P. 141–145.
23. Effect of the drilling process on the compression behavior of glass/epoxy laminates / N. Z. Karimi et al. // Composite Structures. – 2013. – 98. – P. 59–68.
24. Філоненко С. Ф., Каліта В. М., Космач О. П. Акустична емісія при навантаженні композиційних матеріалів //Вісн.Нац. Авіац.Ун. – 2010. – 42. – № 1. – С. 133–142.
25. Analysis of hole quality in drilling GLARE fiber metal laminates / O.A. Pawar et al. // Composite Structures. – 2015. – 123. – P. 350–365.

Поступила 14.05.16

УДК 621.315

В. І. Часник¹, О. М. Кайдаш², кандидати технічних наук,
І. П. Фесенко², В. І. Куш², доктори технічних наук; **Л. О. Фролова²**

ВИЗНАЧЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ КОМПОЗИТУ З КЕРАМІЧНОЮ МАТРИЦЕЮ ДЛЯ ВИСОКОТОЧНОГО МЕХАНІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ НОВИХ МАТЕРІАЛІВ

¹Державне підприємство НДІ «Оріон», м. Київ, Україна

²Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ

Наведено теоретичне оцінювання діелектричної проникності системи ізолятор – сфероїдальні зерна провідника і її порівняння з експериментально визначеним значенням у мікрохвильовій області для вільноспечених композиційних матеріалів AlN–16,9 об.% Мо та фактором форми зерен 2,4 за відсутності макроскопічної електропровідності.

Ключові слова: нітрид алюмінію, молибден, фактор форми, діелектрична проникність, мікрохвиля, поріг перколяції.