

5–33. Print. **14.** Stupnitsky, V.V. "Strukturno-parametrichna optimizatsiya tekhnologichnikh protsesiv pri zabezpechenni ekspluatatsiynikh vlastivostey detaley". Kharkiv: Skhidno-Evropeysky zhurnal peredovikh tekhnologiy. 2014. No 2/3(68). 9–16. Print. **15.** Kragelsky, I.V., Dobychin, M.N. and Komalov, V.P. *Osnovy rascheta na treniye i znos* Moscow: Mashinostroyeniye, 1977. Print. **16.** Stepnov M.N. *Raschetnye metody otsenki kharakteristik soprotivleniya ustalosti materialov i elementov konstruksiy* Moscow: MATI, 2003. Print. **17.** Pisarenko, G.P. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov*. Kiev: Naukova dumka, 1988. Print. **18.** Demkin, N.B., Ryzhov, E.V. *Kachestvo poverkhnosti i kontakti detaley mashin*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1981. Print.

Received 20.10.2014

УДК 621.91

Г.Л. ХАВИН, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

ТРЕЩЕНООБРАЗОВАНИЕ ПРИ СВЕРЛЕНИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрена задача определения величины и глубины залегания трещины расслоения при сверлении полимерных многослойных композитов. Учитывая анизотропию свойств материала, предполагается, что трещина расслоения имеет эллиптическую форму, и значение большей оси трактуется как максимальная длина трещины. Используя эмпирическое представление фактора расслоения, как функции режимных параметров обработки, представлена модель локального расслоения. Полученное соотношение связывает глубину появления максимальной трещины расслаивания и значение ее длины. Представлены количественные зависимости длины трещины от частоты вращения и подачи.

Ключевые слова: трещина расслоения, фактор расслаивания, полимерные композиты.

Вступление. При сверлении полимерных многослойных композитов, как и других конструкционных материалов, возникают дефекты, ухудшающие качество обработанной поверхности. Эти дефекты в основном связаны с начальным контактом инструмента и его выходом из заготовки. Разрушение при сверлении было классифицировано многими авторами [1-5], которые выделили следующие явления: разрыв волокон армирования, межслойная трещина, расщепление вдоль волокон, растрескивание и выкрашивание, нарушение адгезионной связи волокно – связующее и термическое разрушение. Эти факторы были рассмотрены и проанализированы в работах [6-8].

Наиболее опасным дефектом считается расслаивание между соседними слоями армирования вдоль его направления. Основной причиной появления расслаивания при сверлении многослойных композитов является высокое значение действующей осевой силы, величина которой в основном определяется подачей. Кроме того существенную роль играет также неправильный выбор режущего инструмента и степень его изношенности. Для уменьшения расслаивания известно несколько приемов, например,

© Г.Л.Хавин 2014

снижение подачи и сверление в подкладную плиту. В последнее время для устранения этого дефекта все чаще применяется вибрационное сверление. Межслойное расслаивание, возникающее при сверлении многослойных композитов, является главным дефектом, не только уменьшающим целостность композита и его изгибную прочность, но также во многом определяет усталостную прочность под действием циклической нагрузки. Поэтому задача создания математических моделей, позволяющих на стадии проектирования технологической операции сверления прогнозировать появление и рост величины межслойного разрушения, является актуальной и имеет практическую ценность.

Анализ последних достижений и литературы. Экспериментальные наблюдения показали, что расслаивание появляется вокруг отверстия на входе и выходе инструмента из заготовки, рис.1. Механизм этого явления подробно рассмотрен в литературе [5,9-10]. Расслаивание возникает под действием поперечной режущей кромки сверла и собственно режущей кромки.

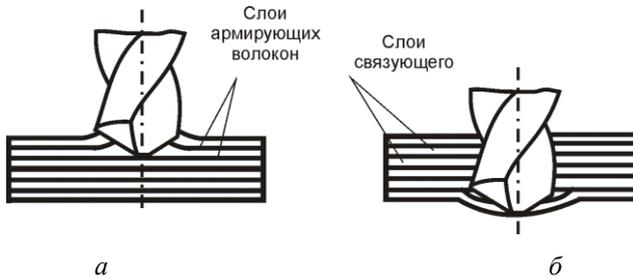


Рис. 1 – Механизм появления трещины расслаивания:
а – на входе инструмента в заготовку; *б* – на выходе

Появление межслойных трещин на входе обусловлено контактным взаимодействием поперечной режущей кромки с поверхностью заготовки, вследствие чего тонкий слой начинает шелушиться, в результате отделяется от соседнего и образуется зона расслаивания вокруг входного отверстия. Во втором случае, в момент, когда сверло находится возле выхода из отверстия, число слоев композита, находящиеся перед сверлом, уменьшается и снижается их общая жесткость в структуре композита, и, как следствие, происходит расслаивание (отслаивание) последних слоев и разрушение последних волокон (жгутов) в материале, рис.2.

Изучению качественных и количественных характеристик этого процесса посвящено достаточно много исследований [3,8,11-13]. Размер зоны растрескивания и ее амплитуда определяется условиями сверления и рабочим инструментом. Так, известно, что при сверлении традиционным спиральным сверлом из быстрорежущей стали, величина зоны растрескивания растет с увеличением подачи, но уменьшается с ростом частоты вращения шпинделя.

Однако влияние подачи часто намного сильнее, чем частоты вращения шпинделя.

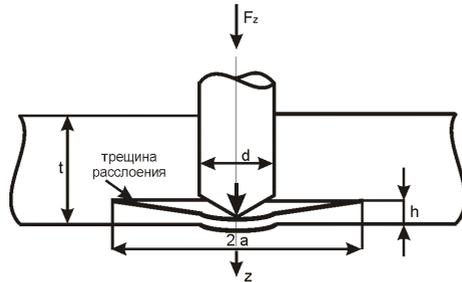


Рис. 2 – Модель образования межслойной эллиптической трещины расслоения

В большинстве практических приложений зона резания на входе и выходе сверла помимо появления межслойных трещин сопровождается наличием не срезанных волокон в виде заусенцев, распушиваний и разлохмачиваний. Общие закономерности появления этих дефектов сводятся к следующему:

- расслаивание (растрескивание) проявляется вдоль направления армирования (вдоль волокон) и его размеры обычно больше, чем сопровождающее расслаивание (растрескивание) распушивание;

- расслаивание (растрескивание) развивается в два этапа. На первом этапе расслаивание происходит под действием поперечной режущей кромки, когда осевая сила, действующая через поперечную режущую кромку на выходную поверхность заготовки станет больше некоторой критической величины, после чего наступает расслаивание, рис. 3, а. Этот этап заканчивается, когда поперечная режущая кромка выходит за пределы заготовки, рис. 3, б. С этого момента наступает этап действия режущей кромки и расслаивание (растрескивание), которое образовалось на первом этапе, продолжает развиваться и заканчивается крутящим воздействием режущих кромок на край образовавшегося отверстия, рис.3, в.

Для оценки уровня разрушения вокруг просверленного отверстия было предложено несколько критериев. При обработке отверстий в работе [2] расслаивание предложено характеризовать одномерным критерием F_{dam} (фактор расслаивания), который определяется отношением максимального диаметра зоны разрушения – D_{dam} к номинальному диаметру отверстия – D_{hole} , рис. 4, $F_{dam} = D_{dam} / D_{hole}$.

Однако этот критерий имеет ряд недостатков так, как расслаивание на входе и на выходе имеет некоторую протяженность по ширине и реально зона расслаивания отличается от ее изображения в виде окружности на рис.4.

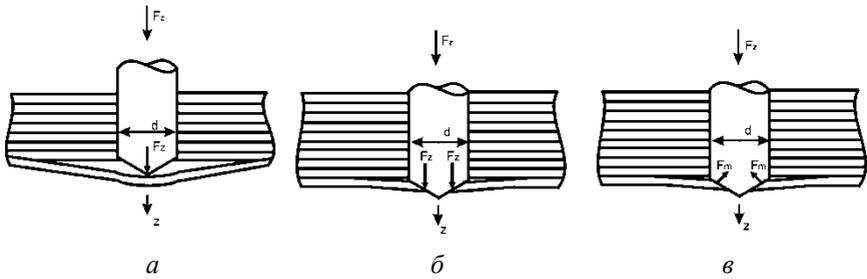


Рис. 3 – Общая схема появления и развития трещины расслаивания на выходе инструмента: *а* – расслаивание под действием поперечной режущей кромки; *б* – расслаивание непосредственно под действием режущих кромок; *в* – крутящее воздействие режущих кромок на выходе из заготовки.

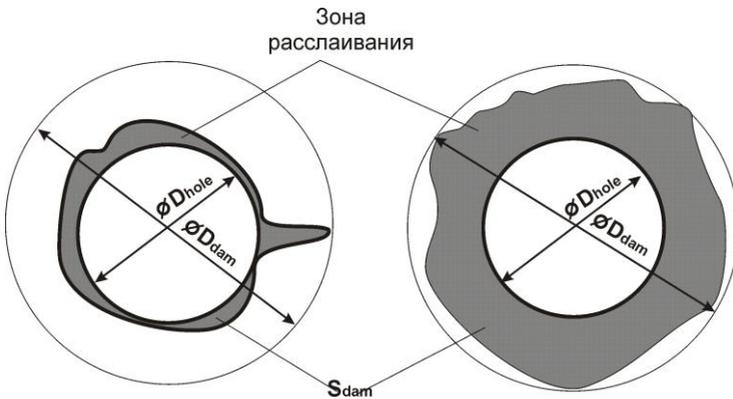


Рис. 4 – Расслаивание при сверлении слоистого композита

Следовательно, более корректно использовать двумерный критерий, который более качественно будет отражать степень межслоевого разрушения. В [15] для сравнения поврежденности при сверлении предложено использовать коэффициент повреждения K_{dam} , который представляет собой отношение площади разрушения S_{dam} к номинальной площади отверстия S_{hole} , $K_{dam} = S_{dam} / S_{hole}$.

Двумерный критерий F_a также был предложен в работе [16], где он определяется как относительное увеличение площади разрушения S_{dam} по отношению к номинальной площади отверстия S_{hole} , $F_a = (S_{dam} - S_{hole}) / S_{hole}$.

В работе [17] предложен компромиссный фактор расслаивания F_{da} , который основан на анализе цифрового изображения при изучении зоны разрушения после сверления многослойного композита, а именно вычисление фактора расслаивания в виде

$F_{da} = \alpha \cdot (D_{dam} / D_{hole}) + \beta \cdot (S_{max} / S_{hole})$, где S_{max} – площадь разрушения, соответствующая максимальному диаметру D_{dam} зоны расслоения; α, β – весовые коэффициенты.

В [18] было предложено вычислять величины F_{dam} и F_{da} , используя приближение из [17]. Коэффициент β рассматривается как отношение области разрушения S_{max} , соответствующей диаметру D_{dam} за вычетом номинальной площади отверстия $S_{max} - S_{hole}$. Коэффициент α определяется как дополнение весового коэффициента $\alpha = 1 - \beta$. Тогда соотношение для F_{da} может быть переписано в виде $F_{da} = F_{dam} + S_{hole} / (S_{max} / S_{hole}) \cdot (F_{dam}^2 - F_{dam})$.

Среди всех представленных критериев наибольшее распространение получил одномерный критерий F_{dam} , как более простой для измерения и практического использования. В настоящее время имеется достаточно большое количество экспериментальных исследований по сверлению угле- и стеклопластиков различными типами инструментов, для которых получены эмпирические зависимости расчета фактора расслаивания [18-23].

Цель работы. Целью настоящей работы является построение математической модели, позволяющей для заготовки из многослойного композита данной марки, выбранного типа инструмента и технологических параметров сверления спрогнозировать характер предполагаемой зоны разрушения и рассчитать ее величину.

Зона разрушения может служить одной из важнейших характеристик, определяющих прочность и долговечность крепления в отверстии. Поэтому предсказать величину зоны разрушения очень важно. В работах [9-10,24] для характеристики зоны разрушения используются достижения механики линейного разрушения, где принято, что по достижению упругой энергии высвобождения определенного, характерного для данного материала, значения происходит движение трещины. Проведенные эксперименты вполне ясно показали, что зона разрушения занимает достаточно малую область вокруг отверстия, а не всю заготовку, которая обрабатывается. В работах [24,25] показано, что размер зоны расслоения во многом определяется действующей осевой силой. Были проведены замеры зоны расслоения для эпоксидных стекло- и углепластиков и, используя линейную зависимость, получено соотношение между осевой силой и величиной зоны расслоения.

В [11] были проведены экспериментальные замеры зоны расслоения как функции от различных параметров процесса: подачи, частоты вращения и радиуса сверла. Полученные результаты были обобщены методами регрессионного анализа. Было получено соотношение вида

$$F_{dam} = \frac{l_{dam}}{D_{hole}} = k \left(\frac{\pi \cdot f \cdot D_{hole}}{10^3 \cdot s} \right)^n \cdot \left(\frac{F_z}{E \cdot D_{hole}^2} \right)^m,$$

где l_{dam} – размер зоны расслоения, $l_{dam} = (l_{dam1} + l_{dam2}) / 2$, мм; D_{hole} – диаметр отверстия, м; s – величина подачи, мм/мин; f – частота вращения шпинделя, об/мин; F_z – осевая сила, Н; E – модуль упругости армирующих волокон, Па; n, m, k – постоянные.

Постановка задачи. Как было сказано выше, развитие расслоения происходит в два этапа. Это порождает образование главной и вторичной области трещинообразования, рис.5. Главная область с максимальным повреждением расположена в основном в направлении волокон. Вторичная область имеет небольшие размеры и образуется в режущей фазе, в которой контакт между направлением армирования и скоростью резания образует острый угол.

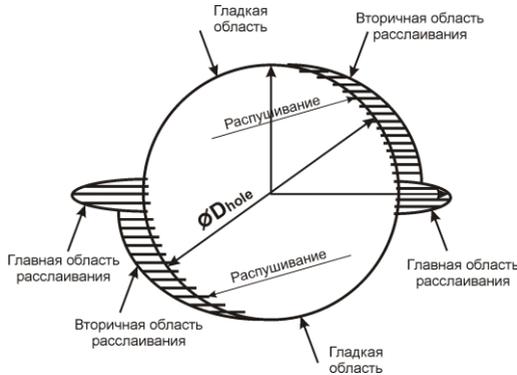


Рис. 5 – Модель образования главной и вторичной области разрушения и межслойной эллиптической трещины расслоения

Проведенный в [26] анализ на основе анизотропной теории упругости и линейной механики разрушения для эллиптической зоны расслоения, позволил определить осевую силу, при которой происходит старт межслойной трещины на расстоянии h_{dam} от нижнего края заготовки, следующим уравнением

$$F_z = \pi \sqrt{\frac{E_{22}}{E_{11}}} \left[\frac{G_{IC} \cdot K_a \cdot h_{dam}^3}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где G_{IC} – критическое значение энергии трещинообразования по I-му типу, Дж/м²; E_{11} , E_{22} – модули упругости в направлении армирования – 11 и ему

перпендикулярном (трансверсальном направлении) – 22, Па; ν_{12} , ν_{21} – соответственно коэффициенты Пуассона; значение коэффициента K_a рассчитывается по формуле

$$K_a = 2E_{11} + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{E_{11}}{E_{22}}} \left[\nu_{12} \cdot E_{22} + 2 \cdot G_{12} (1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}) \right],$$

где G_{12} – модуль сдвига. Из уравнения (1) можно найти значение h^* соответствующее критическому значению осевой силы F_z

$$h^* = \sqrt[3]{\frac{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}}{G_{1C} \cdot K_a \cdot \pi^2} \left(\frac{E_{11}}{E_{22}} \right) \cdot F_z^2}.$$

Заметим также, что из выражения (1) можно получить известное соотношение Ho–Cheng и Dharan [14] для изотропного материала, приняв $E_{11} = E_{22} = E$, $\nu_{12} = \nu_{21} = \nu$, $G_{12} = E/2/(1+\nu)$. Соотношение (1) можно представить в виде

$$F_z = \left[\frac{l_{dam}}{k} \cdot \left(\frac{\pi \cdot f \cdot D_{hole}}{10^3 \cdot s} \right)^{-n} \cdot E_{11}^m \cdot D_{hole}^{2m-1} \right]^{1/m}. \quad (2)$$

Приравняем правые части (1) и (2) и разрешим относительно l_{dam}

$$l_{dam} = h_{dam}^{3m/2} \cdot k \cdot \left(\frac{\pi \cdot f \cdot D_{hole}}{10^3 \cdot s} \right)^n \cdot D_{holq}^{1-2m} \cdot E_{11}^{-m} \cdot \left[\frac{G_{1C} \cdot K_a \cdot \pi^2}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \cdot \left(\frac{E_{22}}{E_{11}} \right) \right]^{m/2}. \quad (3)$$

Уравнение (3) при заданном отношении скорости резания к величине подачи связывает усредненное значение максимальной величины расслоения с толщиной материала заготовки от нижнего ее края, на котором это расслоение реализуется. Это соотношение позволяет оценить величину разрушения поверхностных слоев материала при заданных технологических параметрах обработки в зависимости от расстояния до нижней поверхности заготовки.

Материалы и результаты исследования. В качестве примера использования предложенного подхода рассмотрим сверление отверстия диаметром 5,5 мм в заготовке из эпоксидного однонаправленного углепластика марки Т300 толщиной 2 мм с объемным содержанием волокон 60% и основными механическими характеристиками: плотность – 1600 кг/м³; продольный модуль упругости $E_{11} = 181$ ГПа; поперечный модуль упругости $E_{22} = 10,3$ ГПа; модуль сдвига $G_{12} = 7,17$ ГПа; коэффициент Пуассона

$v_{12} = v_{21} = 0,28$; критическая энергия трещинообразования $G_{IC} = 250 \text{ Дж/м}^2$. Значения постоянных коэффициентов приняты: $k = 1,3 \cdot 10^3$; $n = -0,35$; $m = 0,5$.

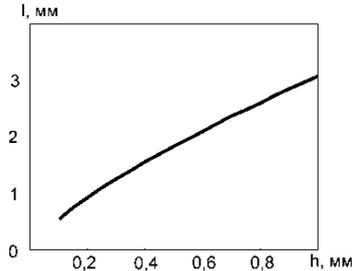


Рис. 6 – Изменение длины трещины в зависимости от задаваемой глубины ее появления

На рис.6 приведена зависимость длины трещины l расслоения от глубины ее залегания от нижней поверхности заготовки h , вычисленная из соотношения (3) при значениях частоты вращения шпинделя $f = 3000 \text{ об/мин}$ и подаче $s = 20 \text{ мм/мин}$.

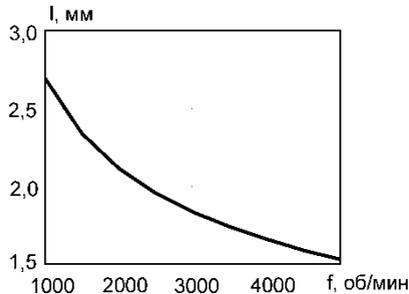


Рис. 7 – Изменение длины трещины в зависимости от частоты вращения шпинделя для заданной подачи 20 мм/мин и глубине 0,5 мм

Приведенные результаты подтверждают тот факт, что главным фактором, определяющим качество выходного отверстия, является значение осевой силы. Чем больше осевая сила, тем больше глубина начала появления расслаивания h и тем больше длина трещины l_{\max} , рис.5. Можно видеть, что зависимость длины трещины расслоения от глубины ее образования для рассматриваемого диапазона изменения носит примерно линейный характер.

С увеличением частоты вращения шпинделя величина появляющихся дефектов и, в частности, трещины расслоения уменьшается, рис.7, что наблюдалось экспериментально многими авторами [18].

Увеличение подачи оказывает наиболее сильное влияние на возникновение дефектов, что многими исследователями объясняется

увеличением величины осевого усилия при сверлении. Значение трещины расслоения растет с увеличением подачи, рис.8, причем этот рост не компенсируется увеличением частоты вращения, что также подтверждается экспериментально [15-19].

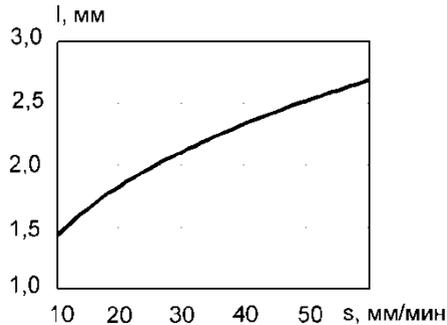


Рис. 8 – Изменение длины трещины в зависимости от подачи для заданной частоты вращения шпинделя 3000 об/мин и глубине 0,5 мм

Выводы. Представлена модель, позволяющая прогнозировать величину трещины расслоения на выходе инструмента. Базируясь на экспериментальных данных, предложенная зависимость связывает физико-механические параметры материала композита с режимными параметрами обработки. В поученной зависимости не учитываются тип и марка инструмента, а также его геометрические параметры. Учет влияния этих факторов в новой модернизированной модели предсказания образования и величины дефектов обработки при сверлении полимерных композитов, является предметом дальнейших исследований.

Работа выполнена по проекту М2132Ф финансируемого министерством образования и науки Украины.

Список литературы: 1. *Ariffin M. K. A.* An optimize drilling process for an aircraft composite structure using design of experiments / *M. K. A. Ariffin, M. I. Mohd Ali, Sapuan P. M., Ismail N.* // Scientific Research and Essay. – 2009. – V. 4, No.10. – P. 1109–1116. 2. *Chen W. C.* Some experimental investigations in the drilling of carbon fibre-reinforced plastic (CFRP) composite laminates / *W. C. Chen* // Int. J. Machine Tools & Manufacture. – 1997. – No.37. – P. 1097–1110. 3. *Durão P. M. L.* Machining of hybrid composites / Thesis, Porto, 2005. 4. *Valavan U.* Tool life prediction based on cutting forces and surface temperature in edge trimming of multidirectional CFRP composites / Thesis, Tamil Nadu, India, 2003. 5. *Vandervelde H.* Drilling processes / Printed circuits handbook, Ed. C. F. Coombs, Jr., Ed. Mc. Graw Hill Companies, 2008. 6. *Bendjaballah D.* Analyse des plaques composites carbone/epoxyde sous l'effet des efforts de perçage / Thèse, Université Mentouri – Constantine, 2009. 7. *Bonnet C.* Compréhension des mécanismes de coupe lors du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite fibre de carbone. Thèse, Arts et Métiers Paris Tech, Paris, 2010. 8. *Ghidossi P.* Contribution à l'étude de l'effet des conditions d'usinage d'éprouvettes en composites à matrice polymère sur leur réponse mécanique / Thèse, L'ENSAM, Châlons-En-Champagne, 2003. 9. *Iliescu D.* Approches expérimentale et numérique de l'usinage a sec des composites carbon/epoxy / Thèse, Arts et Métiers Paris Tech, Paris, 2008. 10. *Jain P.* Delamination free drilling of composite laminates / *P. Jain, D.C.H. Yang* // Transactions of the ASME,

Journal of Engineering for Industry. – 1994. – No.116. – P. 475–481. **11.** Zhang H. Assessment of exit defects in carbon fiber–reinforced plastic plates caused by drilling / H. Zhang, W. Chen, D. Chen, L. Zhang // *Key Engineering Material*. – 2001. – No.196. – P. 43–52. **12.** Ho-Cheng H. Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits / H. Ho-Cheng, C. C. Tsao // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2003. – No.140. – P. 335–339. **13.** Tsao C. C. Thrust force and delamination of core-saw drill during drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) / C. C. Tsao // *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, 2008. – No.37. – P. 23–28. **14.** Ho-Cheng H. Delamination during drilling in composites laminates / H. Ho-Cheng, C. K. H. Drahan // *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry*. – 1990. – No.112. – P. 236–239. **15.** Mehta M. Effect of fastener hole drilling anomalies on structural integrity of PMR-15/Gr composite laminates / M. Mehta, T. J. Reinhart, A. H. Soni // In: *Proceedings of the Machining Composite Materials Symposium, ASM Materials Week, 1992*. – P. 113–126. **16.** Faraz A. Cutting edge rounding: an innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates / A. Faraz, D. Biermann, K. Weibert // *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2009. – No.49. – P. 1185–1196. **17.** Davim J. P. A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates / J. P. Davim, J. C. Rubio, A. M. Abrao // *CompoP. Sci. Technol.*, 2007. – No.67. – P. 1939–1945. **18.** Rubio J. C. Effect of high speed in the drilling of the glass fibre reinforced plastic: Evaluation of the delamination factor / J. C. Rubio, A. M. Abrao, P. E. Faria, A. E. Correia, J. P. Davim // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2008. – No.48. – P. 715–720. **19.** Davim J. P. Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave – experimental and statistical study / J. P. Davim, P. Reis // *Mater. DeP.*, 2003. – No.24. – P. 315–324. **20.** Tsao C. C. Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material / C. C. Tsao, H. Hocheng // *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2004. – No.44. – P. 1085–1090. **21.** Sardinias R. Q. Multi-objective optimization of cutting parameters for drilling laminate composite materials by using genetic algorithms / R. Q. Sardinias, P. Reis, J. P. Davim // *CompoP. Sci. Technol.*, 2006. – No.66. – P. 3083–3088. **22.** Gaitonde V. N. Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites / V. N. Gaitonde, P. R. Kamik, R. J. Campos, C. A. Esteves, A. M. Abrao, Davim P. J. // *J. Mater. Process Technol.*, 2008. – No.203. – P. 431–438. **23.** Khashaba U. A. Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: part II – effect of drill wear / U. A. Khashaba, I. A. El-Sobaty, A. I. Selmy, A. A. Megahed // *Composites: Part A*, 2010. – No.41. – P. 1130–1137. **24.** Ho-cheng H. An analysis of drilling of composite materials / H. Hocheng // PhD thesis, University of California, Berkeley, 1988. **25.** Lachaud F. Drilling of composite structure / F. Lachaud, R. Piquet, T. Collombet, L. Surcin // *Composite structure*. – 2001. – No.52. – P. 511–516. **26.** Tsao C. C. Prediction of the location of delamination in the drilling of composite laminates / C. C. Tsao, W. C. Chen // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1997. – No.70. – P. 185–189.

Bibliography (transliterated): 1. Ariffin, M. K. A. et al. "An optimize drilling process for an aircraft composite structure using design of experimentP." *Scientific Research and Essay*. No. 4, 10 (2009): 1109–1116. Print. 2. Chen, W. C. "Some experimental investigations in the drilling of carbon fibre-reinforced plastic (CFRP) composite laminateP." *Int. J. Machine Tools & Manufacture*. No.37. (1997): 1097–1110. Print. 3. Durão, P. M. L. "Machining of hybrid compositeP." Thesis, Porto, 2005. Print. 4. Valavan, U. "Tool life prediction based on cutting forces and surface temperature in edge trimming of multidirectional CFRP compositeP." Thesis, Tamil Nadu, India, 2003. Print. 5. Vandervelde, H. "Drilling processes / Printed circuits handbook." Ed. C. F. Coombs, Jr., Ed. Mc. Graw Hill Companies, 2008. Print. 6. Bendjaballah, D. "Analyse des plaques composites carbone/epoxyde sous l'effet des efforts de perçage." Thèse, Université Mentouri – Constantine, 2009. Print. 7. Bonnet, C. "Compréhension des mécanismes de coupe lors du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite fibre de carbone." Thèse, Arts et Métiers Paris Tech, Paris, 2010. Print. 8. Ghidossi, P. "Contribution à l'étude de l'effet des conditions d'usinage d'éprouvettes en composites à matrice polymère sur leur réponse mécanique." Thèse, L'ENSAM, Châlons-En-Champagne, 2003. Print. 9. Iliescu, D. "Approches expérimentale et numérique de l'usinage a sec des composites carbon/epoxy Thèse, Arts et Métiers Paris Tech, Paris, 2008. Print. 10. Jain, P. and D.C.H. Yang, "Delamination free drilling of composite laminateP." *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry* No.116 (1994): 475–481. Print. 11. Zhang H. et al. "Assessment of exit defects in carbon fiber–reinforced plastic plates caused by drilling." *Key Engineering Materials* No.196 (2001): 43–52. Print. 12. Ho-Cheng H. and C. C. Tsao "Comprehensive analysis of delamination in drilling of

composite materials with various drill bitP." *Journal of Materials Processing Technology* No.140 (2003): 335–339. Print.

13. Tsao C. C. "Thrust force and delamination of core-saw drill during drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP)." *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, No.37 (2008): 23–28. Print.

14. Ho-Cheng H. and C. K. H. Drahan "Delamination during drilling in composites laminateP." *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry* No.112 (1990): 236–239. Print.

15. Mehta M., Reinhart T. J. and A. H. Soni "Effect of fastener hole drilling anomalies on structural integrity of PMR-15/Gr composite laminateP." *In: Proceedings of the Machining Composite Materials Symposium, ASM Materials Week* (1992): 113–126. Print.

16. Faraz A. Biermann D. and K. Weinert "Cutting edge rounding: an innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminateP." *Int. J. Mach. Tools Manuf.* No.49 (2009): 1185–1196. Print.

17. Davim J. P., Rubio J. C. and A. M. Abrao "A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminateP." *CompoP. Sci. Technol.* No.67 (2007): 1939–1945. Print.

18. Rubio J. C. et al. "Effect of high speed in the drilling of the glass fibre reinforced plastic: Evaluation of the delamination factor." *International Journal of Machine Tools & Manufacture* No.48 (2008.): 715–720. Print.

19. Davim J. P. and P. Reis "Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave – experimental and statistical study." *Mater. DeP.* No.24 (2003): 315–324. Print.

20. Tsao C. C. and H. Hocheng "Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material." *Int. J. Mach. Tools Manuf.*No.44 (2004): 1085–1090. Print.

21. Sardinias R. Q., Reis P. and J. P. Davim "Multi-objective optimization of cutting parameters for drilling laminate composite materials by using genetic algorithmP." *CompoP. Sci. Technol.* No.66 (2006): 3083–3088. Print.

22. Gaitonde V. N. et al. "Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic compositeP." *J. Mater Process Technol.* No.203 (2008): 431–438. Print.

23. Khashaba U. A. et al. "Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: part II – effect of drill wear." *Composites: Part A*, No.41 (2010): 1130–1137. Print.

24. Ho-cheng H. "An analysis of drilling of composite materialP." *PhD thesis, University of California, Berkeley*, 1988. Print.

25. Lachaud F. et al. "Drilling of composite structure." *Composite structureP.* No.52 (2001): 511–516. Print.

26. Tsao C. C. and W. C. Chen "Prediction of the location of delamination in the drilling of composite laminateP." *Journal of Materials Processing Technology*–No.70 (1997): 185–189. Print.

Поступила (received) 20.02.2014