

## ОБРАЗОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ ПРИ СВЕРЛЕНИИ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ И МЕХАНИЗМ ПОЯВЛЕНИЯ РАССЛАИВАНИЯ

Рассмотрены физический, технологический и математический аспекты появления дефектов при сверлении многослойных композиционных материалов. Представлен анализ экспериментальных и теоретических исследований образования расслоения и скалывания в заготовке при сверлении. Описан механизм появления таких дефектов и современное состояние проблемы прогнозирования их количественных характеристик. Проанализировано влияние различных технологических факторов на уменьшение величины дефектов, в том числе фактора расслоения. Приведены модели прогнозирования появления дефектов и пути их минимизации в процессе сверления.

**Ключевые слова:** дефекты сверления, слоистые композиты, расслаивание при сверлении.

**Введение.** Сложность состава композиционных материалов (КМ), многообразии ориентации волокон или жгутов, различные технологии их получения и обработки обуславливают значительное многообразие дефектов [1-3].

Все дефекты, имеющие место в композиционных материалах, возникающие на стадии изготовления, механической обработки или эксплуатации, принято разделять на дефекты на макро- и микроуровне. К макродефектам относят нарушения оплошности типа расслоения, непроклеи, трещины, воздушные и газовые раковины, соизмеримые с характерными размерами, инородные включения, которые в значительной степени ослабляют интегральную прочность композита. На микроуровне различают местное несоответствие соотношения содержания матрицы и наполнителя, поры, низкую степень отверждения связующего при формовании, нарушение ориентации волокон, всевозможные складки и свили, смятия и другие несовершенства, снижающие местную прочность.

Известные дефекты композитов классифицируют по нескольким признакам: по происхождению, местоположению, глубине залегания и размерам. По степени опасности все дефекты разделены на 7 групп [3].

Различные дефекты по-разному влияют на ухудшение физико-механических характеристик материала, что проявляется в снижении прочностных характеристик [4,5]. Расслоение, прежде всего, вызывает разрушение материала за счет потери межслойной сдвиговой прочности. Величина снижения прочности за счет расслоения определяется расположением и схемой армирования композитов. Она может составлять от 9% для перекрестно армированного композита, до 17% для однонаправленного композита [3]. Сверление, как разновидность повреждения поверхностного слоя, может привести к местному снижению статической прочности до 50% в зависимости от места образования расслоения. Таким образом,

расслаивание при сверлении полимерных композитов относят к одному из наиболее опасных дефектов.

**Анализ последних исследований и литературы.** При сверлении КМ, как и других конструкционных материалов, возникают дефекты обработки, ухудшающие качество поверхности изделия и вызывающие несоответствие полученных размеров требуемым. Наряду с общими для сверления всех материалов параметрами качества такими, как шероховатость обработанной поверхности, эллиптичность отверстия, несоответствие диаметров входного и выходного отверстия и т.д., при сверлении многослойных композитов существуют свои специфические дефекты обработки, в основном связанные с начальным контактом инструмента и его выходом из заготовки. Разрушение при сверлении было классифицировано многими авторами [6-11], 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 [12-15].

Наиболее опасным дефектом является расслаивание между соседними слоями армирования вдоль его направления. Принято считать, что 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, снижение подачи, что уменьшает осевую силу или сверление в подкладную плиту. В последнее время для уменьшения расслаивания все чаще применяется вибрационное сверление.

Расслаивание является одной из важнейших проблем для конструкций авиастроения и в компьютерной технике. Особенно велика опасность роста

трещин расслаивания под действием растягивающих напряжений так, как в этом случае именно расслаивание влияет на прочность растяжения уложенных слоев. Расслаивание может привести к боковому выпучиванию слоев под действием растягивающих или сжимающих напряжений.

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 [17-20]. Рост межслойных трещин расслаивания при действии циклической нагрузки обычно происходит достаточно медленно потому, что амплитуда действующей циклической нагрузки растяжения или сжатия не слишком велика.

Расслаивание традиционно определяют как разъединение слоев наполнителя в многослойном композиционном материале (ламинате). Этот эффект может проявляться по многим причинам: в результате роста начального дефекта (межслойной трещины) в материале в процессе эксплуатации, являться результатом действия внешнего воздействия или взаимодействия с внешней средой, или следствием механической обработки заготовки. Расслаивание является наиболее опасным и коварным дефектом, возникающим при механической обработке композитов. Внешняя недоступность для обнаружения проявляется дальнейшим подрастанием межслойной трещины в процессе эксплуатации, особенно при действии циклической нагрузки. В отличие от других дефектов обработки, таких как растрескивание и выдергивание волокон, расслаивание снижает не только общую прочность материала за счет изменения его структуры, но и долговечность эксплуатации детали.

**Цель работы.** Целью данной статьи является формирование современных представлений о появлении дефектов качества при сверлении слоистых композиционных материалов, анализ экспериментальных

и теоретических исследований образования расслоения и скалывания в заготовке, прогнозирование качественных и количественных характеристик расслоения и моделирование их зависимости от технологических параметров сверления.

**Постановка проблемы.** Экспериментальные наблюдения показали, что расслаивание и скалывание появляется вокруг отверстия на входе и выходе инструмента из заготовки, рис.1,2.

Механизм расслаивания подробно рассмотрен в литературе [11,19,20]. Это явление порождается действием поперечной режущей кромки сверла и режущих кромок.

Расслаивание на входе обусловлено контактным взаимодействием поперечной режущей кромки с поверхностью заготовки, когда тонкий поверхностный слой начинает шелушиться и отделяться от соседнего, в результате чего образуется зона расслаивания вокруг входного отверстия, рис.2,а.

Во втором случае, в момент, когда сверло находится на выходе из отверстия, число слоев композита, находящихся перед сверлом, уменьшается и это приводит к снижению общей их жесткости в структуре композита, и, как следствие, к расслаиванию (отслаиванию) последних слоев и разрушению последних волокон (жгутов) в материале, рис.2,б.

Изучению качественных и количественных характеристик этого процесса посвящено достаточно много исследований [8,9,15,22-25].

Степень дефектности выходного отверстия при сверлении многослойных композитов, которую называют растрескиванием или отслаиванием (spalling) определяет качество обработки выходного отверстия. Средний размер зоны растрескивания и ее амплитуда определяется условиями сверления. Так, известно, при сверлении традиционным спиральным сверлом из быстрорежущей стали, величина зоны растрескивания растет с увеличением подачи, но уменьшается с ростом частоты вращения шпинделя.

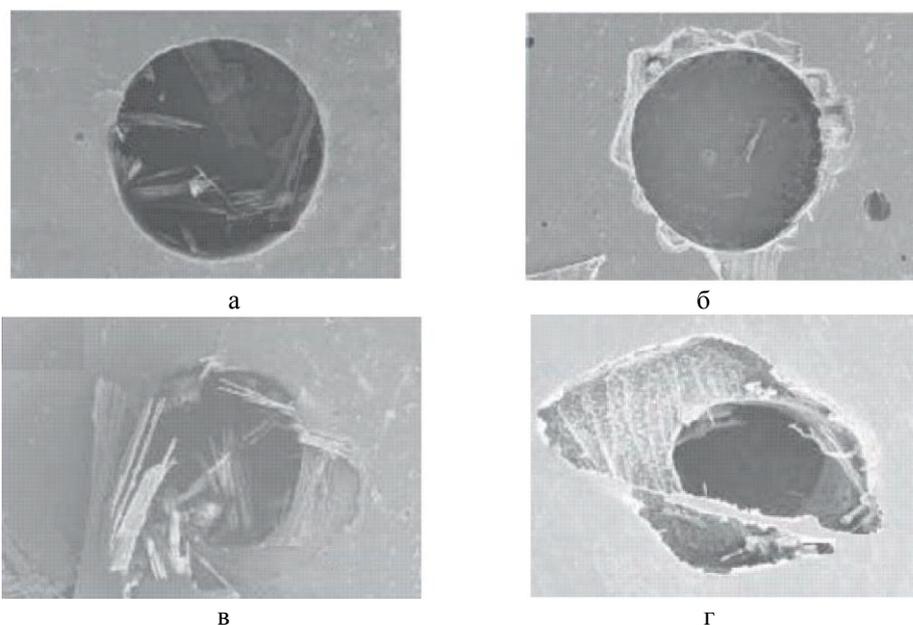


Рис. 1 – Отслаивание при сверлении многослойных композитов: а, б – на входе; в, г – на выходе [21]

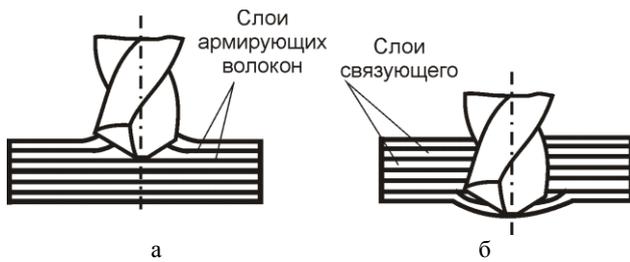


Рис.2 – Механизм образования трещин расслаивания при сверлении композитов: а – на входе инструмента в заготовку; б – на выходе инструмента

Однако влияние подачи намного сильнее, чем частоты вращения шпинделя [27,28]. Некоторые исследования показали, что минимизировать растрескивание можно применением алюминиевых или бакелитовых подкладок под заготовку при сверлении [26,28]. Кроме того, для уменьшения выходного растрескивания, необходимо управлять величиной осевой силы, особенно на этапе, когда поперечная режущая кромка подходит к нижней поверхности заготовки [26,27].

**Материалы исследований.** Перечисленные выше исследования не достаточны для формирования полного представления о механизме образования дефектов. В результате имеющаяся технология сверления приводит к разрушению верхних и нижних слоев и, как следствие, может допускать в практике обработки образование расслаивания длиной соизмеримой с диаметром отверстия [29].

Итак, многочисленными исследованиями было установлено, что разрушение поверхности на выходе сверла из заготовки (edge defect) в основном бывает в виде расслаивания (растрескивания) и распушивания (разлохмачивания). Общие закономерности появления этих дефектов сводятся к следующему:

- расслаивание (растрескивание) проявляется вдоль направления армирования (вдоль волокон или жгутов) и его размеры обычно больше, чем сопровождающее растрескивание распушивание (разлохмачивание);
- расслаивание (растрескивание) развивается в две фазы, одна фаза инициируется действием поперечной режущей кромки, а другая собственно режущей кромкой;

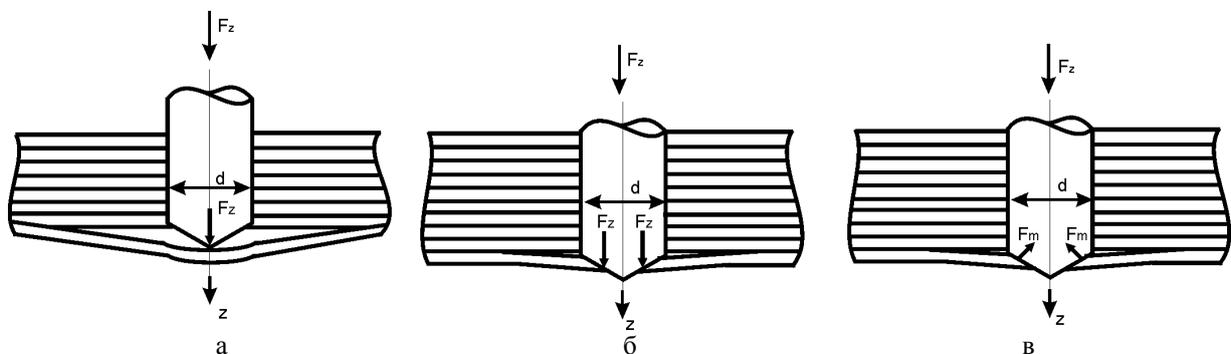


Рис.3 – Общая схема появления и развития трещины расслаивания на выходе инструмента: а – расслаивание под действием поперечной режущей кромки; б – расслаивание непосредственно под действием режущих кромок; в – крутящее воздействие режущих кромок на выходе из заготовки

- первая фаза наступает, когда осевая сила, действующая через поперечную режущую кромку на выходную поверхность заготовки, станет больше некоторой критической величины и заканчивается, когда поперечная режущая кромка только выйдет за пределы заготовки;
- вторая фаза определяется действием режущих кромок и длится до полного выхода инструмента из контакта.

Анализ фотографий выходного отверстия дал возможность сделать вывод о том, что поперечная режущая кромка оказывает сильное влияние на формирование растрескивания. В начале вблизи оси отверстия появляется небольшое выпучивание, которое затем развивается вдоль направления волокон у выходного отверстия, рис.3,а. По мере достижения определенной величины изгиба (выпуклости) начинается фаза действия режущей кромки. Расслаивание, образовавшееся в течение первой фазы, далее активно развивается, рис.3,б, и заканчивается при крутящем действии режущих кромок на выходе из заготовки, рис.3,в.

Поперечная режущая кромка играет ключевую роль так, как воздействует на материал заготовки с большим отрицательным главным передним углом и тратит, по некоторым оценкам, примерно до 50% от величины осевой силы. Эксперименты показывают, что в момент действия поперечной режущей кромки, растрескивание всегда обладает большим размером, чем на заключительной стадии. Рост расслаивания в первой фазе гораздо больше, чем во второй.

Развитие расслаивания (растрескивания) в две фазы порождает образования главной и вторичной области разрушения, рис.4.

**Результаты исследований.** Главная область имеет максимальное повреждение направленное в своей основе в направлении волокон. Вторичная область мала и образуется в режущей фазе, в которой имеется острый угол между направлением армирования и скоростью резания. Кроме того, здесь часто имеются волокна, которые не были чисто срезаны на краю отверстия. Этот дефект при сверлении носит названия распушивания (разлохмачивания, fuzzing), и формируется в следующих случаях:

- волокно достаточно трудно перерезать в области, где имеется острый угол между направлением армирования и скоростью резания;
- наружный поверхностный слой выходного отверстия является свободной поверхностью так, что волокна не подвергаются срезающим деформациям;
- на выходе инструмента происходит резание деформированного слоя, что приводит к искажению геометрии выходного отверстия.



Рис.4 – Модель образования главной и вторичной области разрушения

Расслаивание и разломачивание обычно появляются совместно и их размеры могут изменяться, т.е. большее расслаивание порождает большее разломачивание и наоборот. Появление заусенцев, выдернутых и не срезанных волокон, в виде распушивания-разломачивания определяется в основном действующей осевой силой. С ростом осевой силы эти дефекты не проявляются резко, а плавно нарастают. Это связано с тем, что с увеличением осевой силы зона расслоения возрастает, и большая зона расслоения появляется в большем по длине изогнутом волокне и, следовательно, возрастает число дефектов больших по величине. Однако когда расслоение достигает определенного пространства вокруг отверстия, разломачивание может заметно уменьшиться.

Кроме разломачивания и распушивания на краю входного и выходного отверстий могут образовываться различного вида заусенцы и близкие к ним дефекты, связанные с несрезанными кусочками наполнителя. Такого вида дефекты были классифицированы в [30] на три вида (А, В и С) по месту появления трещины. Тип А характеризуется тем, что заусенцы имеют малую величину и обычно появляются при сверлении очень хрупких материалов. Трещина в этом случае образуется перед вершиной сверла и по наружному краю. Тип В образуется как с формированием вздутия впереди вершины, так и без, когда заготовка испытывает некоторую пластическую деформацию. Трещина инициирует появление заусенцев типа В возникает по краю отверстия. Тип С получается, когда трещина начинается перед вершиной сверла. В этом случае заусенцы имеют форму, подобную цветку и получают большими по величине.

Другим дефектом обработки, который практически всегда сопровождает сверление слоистых композитов, является изменение геометрии выходного отверстия. Как уже упоминалось выше, расслаивание вызывает действующая осевая сила. Сверление про-

должается также после появления расслаивания, и отделившийся слой изгибается под действием осевой силы. Когда слой будет просверлен, осевая сила перестанет действовать и изогнутый слой (рис.2) под действием упругих сил вернется на место.

Модель оценки краевого дефекта [25,31] основана на рассмотрении деформирования слоя, который отделился в течение процесса сверления. Предполагается упругое нагружение, характеризующее напряженно-деформированное состояние волокон как функцию осевой силы. Модель не учитывает деформирование матрицы композита, и ее влияние на краевой дефект не рассматривается. Это допущение оправдано тем, что матрица обычно является более мягким и гибким материалом по сравнению с наполнителем, который может оставаться не перерезанным или частично не перерезанным из-за твердости и хрупкости волокон. Поведение отделившегося слоя в виде волокна и матрицы, описывается теорией изотропной упругой пластины, где влияние матрицы проявляется неявно. Считается, что реализуется процесс идеального резания и материал удаляется полностью. После окончания сверления, осевая сила перестает действовать и за счет упругого деформирования, волокна возвращаются в первоначальное состояние.

**Выводы.** Из представленных физических представлений, величина разрушения вокруг отверстия возрастает с ростом осевой силы и имеет тенденцию к сглаживанию при значительном увеличении осевой силы. Величина дефектов возрастает с увеличением диаметра отверстия и можно предположить, что несоответствие диаметров будет расти более быстро с его увеличением.

**Список литературы:** 1. *Cawley P.* Defect types and NDT for composites and bonded joints / *P. Cawley, R. Adams* // *Material Science and Technology*, 1989. – Vol.5. – PP. 406-447. 2. *Круглянский И. М.* Классификатор методов и средств неразрушающего контроля конструкций из полимерных композиционных материалов [Текст] // *И. М. Круглянский* // *Науч. Труды МАТИ*, 2003. – 6 (78). – С.222-226. 3. *Мурашов В. В.* Дефекты монолитных деталей и конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 1. Дефекты монолитных деталей и конструкций из полимерных композиционных материалов [Текст] // *В. В. Мурашов, А. Ф. Румянцева* // *Контроль и диагностика*, 2007.–№4. – С.23-31. 4. *Bar-Cohen Y.* Experimental enhancements of leaky Lamb wave dispersion data acquisition and implementation challenges to NDT of composites / *Y. Bar-Cohen, S.-S. Lih* // *Material Evaluation*, 2000. – V. 58, №6. – P. 801-806. 5. *Незрушающий контроль: справочник в 7-ми т.: под общ. ред. В. В. Клюева, Т.3: Ультразвуковой контроль* / *И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге.* – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с. 6. *An optimise drilling process for an aircraft composite structure using design of experiments* [Text] / *M. K. A. Mohd Ariffin, M. I. Mohd Ali, S. M. Sapuan, N. Ismail* // *Journal of Scientific Research and Essay*, 2009. – V.4, N 10. – P. 1109-1116. 7. *Chen W. C.* Some experimental investigations in the drilling of carbon fibre-reinforced plastic (CFRP) composite laminates [Text] / *W. C. Chen* // *Int. J. Machine Tools & Manufacturing*, 1997. – Vol.37. – P. 1097-1110. 8. *Durão P. M. L.* Machining of hybrid composites [Text] // *Thesis, FEUP, Porto*, 2005. – 245 p. 9. *Delamination analysis of carbon/epoxy plates after drilling* / *P. M. L. Durão, A. G. Magalhães, J. M.R. S. Tavares, A. Torres Marques* // [http://paginas.fe.up.pt/~tavares/downloads/publications/artigos/IJMP08\\_Durao\\_et\\_al.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~tavares/downloads/publications/artigos/IJMP08_Durao_et_al.pdf). 10. *Valavan U.* Tool life prediction based on cutting forces and surface temperature in edge trimming of multidirectional CFRP composites [Text] // *Thesis, Tamil Nadu, India*, 2003.–235 p. 11. *Vandervelde H.* Drilling processes. In: *Printed circuits handbook* / *Ed. C. F. Coombs, Jr., Ed. Mc. Graw Hill Companies*, 2008. 12. *Bendjabbah D.* Analyse des plaques composites carbone/epoxyde sous l'effet des efforts de perçage / *Thèse, Université Mentouri* – Con-

stantine, 2009. **13.** 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. **14.** 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. **15.** Iliescu D. Approches expérimentale et numérique de l'usinage à sec des composites carbon/epoxy / Thèse, Arts et Métiers Paris Tech, Paris, 2008. **16.** Experimental analysis of the influence of drill point angle and wear on the drilling on woven CFRPs / N. Feito, J. Diaz-Alvarez, A. Diaz Alvarez, J. L. Cautero, M. H. Miguelez // Materials.– 2014.– 7.– P.4258-4271. **17.** Neural network approach for estimate the residual tensile strength after drilling in unidirectional glass fiber reinforced plastic laminates [Text] / R. Mishra, J. Malik, I. Singh, J.P. Davim // Mater. Des., 2010.–31.– P.2790–2795. **18.** Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites [Text] / V.N. Gaitonde, S.R. Karnik, R.J. Campos, E.A. Correia A, A.M. Abrao P.J. Davim // J. Mater. Process Technology, 2008. –203.– P.431–438. **19.** Jain S. Delamination-free drilling of composite laminates [Text] / S. Jain, D.C.H. Yang // Journal of Engineering for Industry, 1994. –116.– P.475–481. **20.** Hocheng H. Delamination during drilling in composite laminates [Text] / H. Hocheng, C.K.H. Dharan // Journal of Engineering for Industry, 1990. –112.– P.236–239. **21.** Sharma S. C. Delamination during drilling polyurethane foam composite sandwich structures [Text] / S.C. Sharma, M. Krishna, H.M.N. Murth // Journal of Materials Engineering and Performance, 2005.–Vol.15, N3. – P.306-310. **22.** Hocheng H. Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits [Text] / H. Hocheng, C.C. Tsao // Journal of Materials Processing Technology, 2003. – Vol. 140. – P. 335-339. **23.** Tsao C. C., Thrust force and delamination of core-saw drill during drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) [Text] // International Journal Advanced Manufacturing Technology, 2008.– Vol.37.– P.23-28. **24.** Tsao C. C. The effect of chisel length and associated pilot hole on delamination when drilling composite materials [Text] / C.C. Tsao, H. Hocheng // International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003.– Vol.43.– P.1087-1092. **25.** Vijayaraghavan A. Drilling of fiber-reinforced plastics – Tool modelling and defect prediction // <http://www.optimet.com/publications/Quantify-edge-defects-in-drilled-FRP-Composites.pdf>. 2006. **26.** Luo H. Machining of Difficult-to-Cut Materials [Text] / H. Luo, D. Chen // Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, Beijing, 1988. **27.** Fan H. Study On The Drilling of Composites [Text] // Beijing Institute of Aeronautics, Master thesis, Beijing, 1985. **28.** Wang Y. Assembly of Composite Structures [Text] / Y. Wang, Q. Zhang // The Publishing House of National Defense Industry, Beijing, 1992. **29.** Drilling of composite structures / F. Lachaud, R. Piquet, F. Collombet, L. Surcin // Composite Structures, 2001.–Vol.52.– P.511–516. **30.** Ko S. L. Burr minimizing scheme in drilling [Text] / S.L. Ko, J.E. Chang, G.E. Yang // J. Mater. Process. Technology. –2003.– Vol.140.– P.237-242. **31.** Vijayaraghavan A. Quantifying Edge Defects in Drilled FRP Composites [Text] / A. Vijayaraghavan, D. Dornfeld, C. K.H. Dharan // This paper is posted at the eScholarship Repository, University of California. [http://repositories.cdlib.org/lma/codef/vijayaraghavan\\_06\\_1](http://repositories.cdlib.org/lma/codef/vijayaraghavan_06_1).

**Bibliography (transliterated):** **1.** Cawley P. *Defect types and NDT for composites and bonded joints* P. Cawley, R. Adams Material Science and Technology, 1989. – Vol.5. – PP.406-447. **2.** Kruglyanskiy I. M. *Klassifikator metodov i sredstv nerazrushayushego kontrolya konstruksiy iz polimernykh konstruksionnykh materialov [Tekst]* / I. M. Kruglyanskiy Nauch. Trudy MATI, 2003. – 6 (78). – PP.222-226. **3.** Murashov V. V. *Defekty monolitnykh detaley i konstruksiy iz polimernykh kompozitsionnykh materialov i metody ih vyyavleniya. Chast 1. Defekty monolitnykh detaley i konstruksiy iz polimernykh kompozitsionnykh materialov [Tekst]* V. V. Murashov, A. F. Rumyantsev // Kontrol i diagnostika, 2007.–Vol.4.– PP.23-31. **4.** Bar-Cohen Y. Experimental enhancements of leaky Lamb wave dispersion data acquisition and implementation challenges to NDT of composites / Y. Bar-Cohen, S.-S. Lih Material Evaluation, 2000. – Vol. 58, No6. – PP. 801-806. **5.** *Nerazrushayuschiy kontrol: spravochnik v 7-mi t.: pod obsch. red. V. V. Klyueva, T.3: Ultrazvukovoy kontrol / I. N. Ermolov, Yu. V. Lange.– Moscow: Mashinostroenie, 2004. – 864 p.* **6.** *An optimize drilling process for an aircraft composite structure using design of*

*experiments [Text]* M. K. A. Mohd Ariffin, M. I. Mohd Ali, S. M. Sapuan, N. Ismail // Journal of Scientific Research and Essay, 2009. – Vol.4, N 10. – PP. 1109-1116. **7.** Chen W. C. *Some experimental investigations in the drilling of carbon fibre-reinforced plastic (CFRP) composite laminates [Text]* W. C. Chen Int. J. Machine Tools & Manufacture, 1997. – Vol.37. – PP. 1097-1110. **8.** Durão P. M. L. *Machining of hybrid composites [Text]* Thesis, FEUP, Porto, 2005. – 245 p. **9.** *Delamination analysis of carbon/epoxy plates after drilling* P. M. L. Durão, A. G. Magalhães, J. M.R. S. Tavares, A. Torres Marques [http://paginas.fe.up.pt/~tavares/downloads/publications/artigos/IJMPT08Duraao\\_et\\_al.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~tavares/downloads/publications/artigos/IJMPT08Duraao_et_al.pdf). **10.** Valavan U. *Tool life prediction based on cutting forces and surface temperature in edge trimming of multidirectional CFRP composites [Text]* Thesis, Tamil Nadu, India, 2003.–235 p. **11.** Vandervelde H. *Drilling processes. In: Printed circuits handbook* Ed. C. F. Coombs, Jr., Ed. Mc. Graw Hill Companies, 2008. **12.** Bendjaballah D. *Analyse des plaques composites carbone/epoxyde sous l'effet des efforts de perçage* Thèse, Université Mentouri – Constantine, 2009. **13.** 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. **14.** 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. **15.** Iliescu D. Approches expérimentale et numérique de l'usinage à sec des composites carbon/epoxy / Thèse, Arts et Métiers Paris Tech, Paris, 2008. **16.** Experimental analysis of the influence of drill point angle and wear on the drilling on woven CFRPs / N. Feito, J. Diaz-Alvarez, A. Diaz Alvarez, J. L. Cautero, M.H. Miguelez Materials.– 2014.– 7.– PP.4258-4271. **17.** Neural network approach for estimate the residual tensile strength after drilling in unidirectional glass fiber reinforced plastic laminates [Text] R. Mishra, J. Malik, I. Singh, J.P. Davim Mater. Des., 2010.–31.– PP.2790–2795. **18.** Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites [Text] V.N. Gaitonde, S.R. Karnik, R.J. Campos, E.A. Correia A, A.M. Abrao P.J. Davim J. Mater. Process Technology, 2008. –203.– PP.431–438. **19.** Jain S. Delamination-free drilling of composite laminates [Text] S. Jain, D.C.H. Yang Journal of Engineering for Industry, 1994. –116.– PP.475–481. **20.** Hocheng H. Delamination during drilling in composite laminates [Text] H. Hocheng, C.K.H. Dharan Journal of Engineering for Industry, 1990. –112.– PP.236–239. **21.** Sharma S.C. Delamination during drilling polyurethane foam composite sandwich structures [Text] S.C. Sharma, M. Krishna, H.M.N. Murth Journal of Materials Engineering and Performance, 2005.–Vol.15, No3. – OP.306-310. **22.** Hocheng H. Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits [Text] H. Hocheng, C.C. Tsao Journal of Materials Processing Technology, 2003. – Vol. 140. – PP. 335-339. **23.** Tsao C. C., Thrust force and delamination of core-saw drill during drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) [Text] International Journal Advanced Manufacturing Technology, 2008.– Vol.37.– PP.23-28. **24.** Tsao C. C. The effect of chisel length and associated pilot hole on delamination when drilling composite materials [Text] C.C. Tsao, H. Hocheng International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003.– Vol.43.– PP.1087-1092. **25.** Vijayaraghavan A. Drilling of fiber-reinforced plastics – Tool modelling and defect prediction <http://www.optimet.com/publications/Quantify-edge-defects-in-drilled-FRP-Composites.pdf>. 2006. **26.** Luo H. *Machining of Difficult-to-Cut Materials [Text]* H. Luo, D. Chen Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, Beijing, 1988. **27.** Fan H. *Study On The Drilling of Composites [Text]* Beijing Institute of Aeronautics, Master thesis, Beijing, 1985. **28.** Wang Y. *Assembly of Composite Structures [Text]* Y. Wang, Q. Zhang The Publishing House of National Defense Industry, Beijing, 1992. **29.** *Drilling of composite structures* F. Lachaud, R. Piquet, F. Collombet, L. Surcin Composite Structures, 2001.–Vol.52.– PP.511–516. **30.** Ko S. L. *Burr minimizing scheme in drilling [Text]* S.L. Ko, J.E. Chang, G.E. Yang J. Mater. Process. Technology. –2003.– Vol.140.– PP.237-242. **31.** Vijayaraghavan A. *Quantifying Edge Defects in Drilled FRP Composites [Text]* A. Vijayaraghavan, D. Dornfeld, C. K.H. Dharan This paper is posted at the eScholarship Repository, University of California. [http://repositories.cdlib.org/lma/codef/vijayaraghavan\\_06\\_1](http://repositories.cdlib.org/lma/codef/vijayaraghavan_06_1).

Поступила (received) 05.03.2015

**Хавин Геннадий Львович** – канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ», тел.: (057)-720-66-25, e-mail: gen-nadiy.khavin@mail.ru.

Робота виконана по проекту М2133Ф фінансированого Міністерством освіти та науки України.