

УДК 621.95

Г.Л. ХАВИН, И.О. ЕСЫП

ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА НАПОЛНИТЕЛЯ НА КАЧЕСТВО ОТВЕРСТИЙ ПРИ СВЕРЛЕНИИ КОМПОЗИТОВ

Рассмотрено влияние количества наполнителя на шероховатость и расслоение в отверстиях при сверлении многослойных композиционных материалов. Представлен анализ экспериментальных и теоретических исследований образования расслоения и шероховатости 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.

Ключевые слова: дефекты сверления, слоистые композиты, шероховатость при сверлении.

Введение. В большинстве приложений главным требованием к сверлению отверстий в композитах является выполнение требований к их качеству. Основная масса отверстий в композитах это крепежные отверстия под заклепки или болтовые соединения различной степени точности. Во многих случаях качество этих соединений определяет прочность или усталостную прочность всего изделия в целом. Поэтому операция сверления композитов должна сопровождаться минимальным появлением различных дефектов с минимальной величиной и безопасной ориентацией.

Помимо дефектов типа расслаивания в композиционных материалах (КМ) при сверлении возникают специфические дефекты, порождаемые их структурной неоднородностью. Даже при работе корректно подобранным острозаточенным инструментом при правильно выбранных значениях технологических параметров возникает волнистость срезанных волокон как результат различного угла взаимодействия инструмента и материала, рис.1. За счет хрупких свойств связующего и наличия в нем микродефектов возникает выкрашивание типа «питтинга» даже в качественно обработанной поверхности, рис.2.

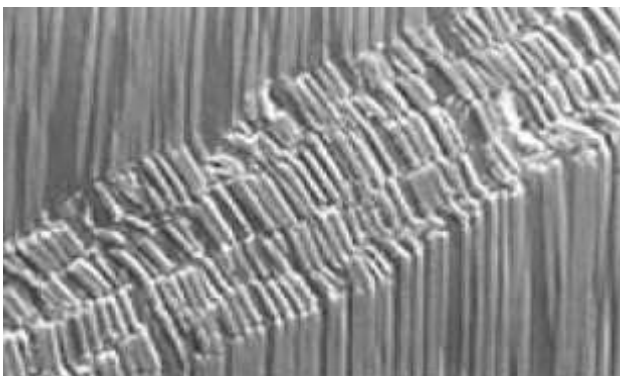


Рис.1 – Волнистость срезанных волокон

Различные дефекты по-разному влияют на ухудшение физико-механических характеристик материала, что проявляется в снижении прочностных характеристик [1,2]. Качество просверленных отверстий в композитах характеризуют как классическими показателями, такими как размерная точность (отклонение размера), погрешность формы отверстия, шеро-

ховатость поверхности стенок, но и специфическими показателями повреждения. К последним относят: расслаивание на входе и выходе инструмента; межслойные трещины; сколы кромок; вытягивание и выдергиванием волокон или жгутов; распушивание и разломачивание; ворсистость; термическая деструкция. Кроме того, при сверлении композитов иногда в отдельный вид нарушения размерной точности относят усадку отверстия после окончания обработки и с течением времени. Наличие перечисленных повреждений приводит к трудностям или даже браку при сборке конструкций, и оказывают негативное влияние на сопротивление усталостной прочности в процессе эксплуатации изделий.

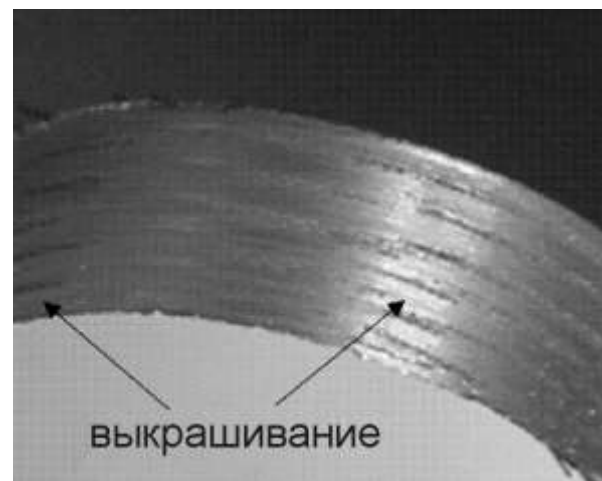


Рис.2 – Выкрашивание связующего и появление в нем дефектов

Наиболее характерными дефектами обработки при сверлении композитов являются ворсистость и распушивание или разломачивание. Под ворсистостью принято понимать количество не срезанных волокон, имеющих характерную высоту выступания над обработанной поверхностью. Считается, что если количество выступающих волокон более 20-30% от общего количества волокон и величина их выступания над поверхностью превышает 4-5 диаметров волокна, то необходимо оценивать ворсистость обработанной поверхности.

Помимо присутствия не срезанных волокон при сверлении может происходить вытягивание волокон

© Г.Л. Хавин, И.О. Есып, 2015

из матрицы, что обусловлено малой адгезией волокон к матрице.

Скол по образующей отверстия чаще всего происходит вследствие повышенной вибрации или биения инструмента при обработке композитов с хрупкой матрицей.

Анализ последних исследований и литературы. По результатам экспериментальных данных, как отмечено в [3,4], при сверлении стекло- и углепластиков инструментом из разных материалов (быстрорежущая сталь, твердый сплав и алмазный инструмент) проявляются почти все виды дефектов. Интенсивность их наличия определяется маркой инструментального материала и режимами сверления. Особенно ярко с увеличением подачи проявляются дефекты типа «разломачивания», сколы и нераскрытые отверстия. Появление этих дефектов связывают также с углом при вершине сверла, в результате воздействия которого часть припуска поверхностного слоя не срезается, а отгибается, скалывается или деформируется наружу [3-5].

Так в работе [6] было показано, что такие процессы разрушения как разрыв волокон на выходе сверла из заготовки и образование локальной пластической деформации увеличивается с увеличением весового (объемного) содержания волокон. Также подтвержден тот факт, что модуль упругости растет линейно с ростом содержания волокон. В [7] представлено экспериментальное исследование сверления тканого перекрестного эпоксидного стеклопластика толщиной 8 мм сверлом из быстрорежущей стали диаметром 8 мм. Использовалось спиральное сверло с углом при вершине 118° и углом наклона спиральной канавки 30° . Содержание стеклянного наполнителя менялось в диапазоне 30, 40, 50, 60 и 70%. В каждой заготовке сверлилось 55 отверстий отдельным инструментом. Скорость вращения шпинделя принималась 470 об/мин, подача – 0,076 мм/об. Данные считывались после сверления 10, 20, 40 и 55 отверстий. Исследовалось влияние количества наполнителя на шероховатость стенок просверленных отверстий и интенсивность изнашивания инструмента.

Прежде всего, авторы выяснили, что для композита с содержанием наполнителя 70% происходит интенсивное разломачивание с сильным разрывом волокон и практически неприемлемым значением шероховатости на стенке отверстия. В связи с этим, в дальнейшем рассматривались заготовки с содержанием 30, 40, 50 и 60% наполнителя.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что величина шероховатости возрастает с увеличением содержания наполнителя и достигает наибольшего значения для 60% содержания. Минимальная шероховатость $R_a = 3,06$ мкм, $R_t = 22,6$ мкм и $R_z = 17,8$ мкм достигается при 30% содержании стеклянного волокна после сверления 10 отверстий. Значения шероховатости быстро растут с увеличением содержанием наполнителя и количеством просверленных отверстий. Эта закономерность объясняется

увеличение износа инструмента с увеличением содержания наполнителя. Для инструмента по мере износа качество поверхности падает.

Каждое выдернутое или разорванное волокно порождает образование вторичных тонких волокон, что подтверждают наблюдения Won и Dharan [8] для сверления кевлар-эпоксидных композитов. Последний факт приводит к низкому качеству поверхности отверстия. Композиты с низким содержанием наполнителя обеспечивают лучшее качество поверхности, но композиты с более высоким содержанием обеспечивают эффект лучшей изоляции концов волокон, что приводит к уменьшению ворсистости и распушивания волокон. На практике влияние количества наполнителя на качество отверстий просверленных в слоистых композитах вполне определяется по расслаиванию на входе и выходе инструмента; поверхностной шероховатости стенок отверстия и характеристикам стружки во время сверления.

Представлен сравнительный анализ осевой силы и качества обработанной поверхности при сверлении однонаправленного эпоксидного стеклопластика с 60% содержанием стеклянных волокон толщиной 10 мм [9]. В экспериментах использовались различные типы сверл. Оптимальные параметры для каждого инструмента определялись по анализу качества отверстия и отклонению величины осевой силы относительно ее средней величины.

В экспериментах использовалось 9 мм сверла из твердого сплава DK560UF(K40) фирмы Promat и быстрорежущей стали, с углом при вершине 118° , стандартной конфигурации, рис.3. Скорость резания принималась равной 50, 100 и 140 м/мин, подача – 0,02, 0,04, 0,08 и 0,16 мм/об.



а



б

Рис.3 – Спиральные сверла: а – сверло из быстрорежущей стали; б – твердого сплава [9]

При сверлении, материал под действием поперечной режущей кромки испытывает изгиб, волокна разламываются и выдергиваются, образуется сетка волосяных трещин в матрице материала. Это находит свое отражение в разрушении связующего и наполнителя, расслоении и уменьшении диаметра отверстия [10].

Цель работы. Целью данной статьи является анализ существующего представления о появлении дефектов качества при сверлении слоистых композиционных материалов с различным содержанием наполнителя, а также влияние при сверлении направления армирования. На основе известных экспериментальных и теоретических исследований образования дефектов поверхности отверстия сделать выводы, и предложить рекомендации по выбору инструмента и технологических параметров сверления. Также обсуждается прогнозирование качественных и количественных характеристик возникающих дефектов и их зависимость от технологических параметров сверления.

Постановка проблемы. Количество наполнителя и порядок его укладки в композитах является априорным фактором, который во многом определяет дальнейшую стратегию обработки отверстия. Знание механических свойств наполнителя в совокупности с его известным весовым или объемным содержанием и порядком расположения (армирования) определяют, прежде всего, выбор типа инструмента, материала режущей части, его геометрию и стойкость.

Механические свойства композита во многом определяются весовым содержанием наполнителя, его типом и укладкой в связующем. Влияние этих факторов, даже при оптимальном выборе технологических параметров обработки, приводит к низкому качеству сверления и интенсивному изнашиванию инструмента. Изучению влияния количества наполнителя и его укладки на качество просверленных отверстий было уделено не так много внимания, как геометрическим параметрам инструмента и параметрам сверления. Однако в последнее время количество исследований неизменно увеличивается, что вызвано, по всей видимости, появлением новых композиционных материалов, усложнением структуры композитов и расширением применения механической обработки.

Результаты исследований. При сверлении заготовок с низким содержанием наполнителя можно видеть длинную вьющуюся стружку. Короткая стружка начинает появляться для заготовок с 50% содержанием стеклоткани, но из-за малой прочности стружка превращается в порошок при перемещении. Далее для 60% стружка становится сегментной и для 70% образуется стружка в виде порошка и пыли. Следовательно, вид образующейся стружки может служить свидетельством качества получаемого отверстия. Для длинной витой стружки получается лучшее качество отверстия. Однако низкое содержание наполнителя в целом не обеспечивает удовлетворительных механических свойств композита, поэтому можно рекомендовать не понижать весовое содержание наполнителя ниже 40%.

Как уже было сказано выше, при сверлении композита происходит разрыв, рассоединение, деформирование и перерезание волокон наполнителя. При этом волокна сминаются и хрупко разрушаются.

Исследования Jawali [11] показали, что лучшая связь волокон наблюдается для 40% армирования, что обеспечивает максимальное значение прочности на разрыв.

Для образцов с низким содержанием наполнителя на образование стружки доминирующее влияние оказывают вязкопластические свойства материала. Генерируемое тепло аккумулируется возле вершины инструмента, что приводит к разогреву и высокой температуре, которая порождает пластическое скольжение (сдвиг). В результате появляется длинная витая стружка. В случае высокого содержания наполнителя преобладает упругое хрупкое разрушение волокон. Таким образом, получается сегментный тип стружки. Более подробно механизм резания описан в [12].

Механизм возникновения расслаивания на входе и выходе инструмента достаточно полно описан в литературе. Расслаивание трактуется как следствие вкручивающего и вдавливающего действия сверла. В начальной стадии сверления механизм расслоения обычно носит название поверхностного шелушения. Более серьезные повреждения в виде расслаивания происходят на выходе инструмента. Наиболее действенным способом избежать появления этого дефекта является сверление в подкладную плиту.

Общие выводы по влиянию весового содержания наполнителя на качество просверленных отверстий и изнашивание инструмента состоят в следующем:

- сверление заготовок с 70% содержанием армирования дает неприемлемую шероховатость поверхности стенок отверстия;
- лучшее качество получено для заготовок с 30% содержанием наполнителя, увеличение этой характеристики приводит к ухудшению поверхностной шероховатости, увеличению расслоения на выходе инструмента и образованию вторичного распушивания волокон на перерезанных концах;
- увеличение содержания наполнителя приводит к росту интенсивности изнашивания инструмента за счет увеличения числа контактов вершины инструмента, и термического разогрева материала;
- увеличение содержания наполнителя приводит к ухудшению качества обработанного отверстия на выходе инструмента, разогреву режущих кромок инструмента и текучести материала позади режущих кромок;
- для материала с низким содержанием наполнителя характерен разогрев вершины инструмента, что приводит к пластическому течению материала и порождает длинную вьющуюся стружку, в то время как сверление материала с высоким содержанием наполнителя дает сегментную и пылевидную стружку.

В [13] рассмотрено влияние дополнительного наполнителя TiO₂ и графита на изменение величины осевой силы, крутящего момента и расслаивание при сверлении слоистого эпоксидного стеклопла-

стика. Стеклопластик с 60% содержанием стеклянных волокон содержал 3, 6 и 9% графита и 1, 2 и 3% TiO_2 , и при этом весовое количество связующего оставалось постоянным 40%. Сверление осуществлялось спиральным сверлом из быстрорежущей стали с углом при вершине 118° , с двумя диаметрами – 6,35 мм и 4,7 мм. Частота вращения шпинделя принималась равной 525, 951, 1625 и 2650 об/мин. Анализ полученных экспериментальных данных позволил авторам сделать вывод о том, что увеличение скорости приводит к уменьшению величины осевой силы для обоих диаметров сверл. С ростом содержания материала наполнителя с 1 до 3% TiO_2 и с 3 до 6 % графита осевая сила уменьшается для всех интервалов скоростей и имеет тенденцию к дальнейшему снижению. Расслаивание на выходе уменьшается для высоких скоростей резания в области рассматриваемого диапазона скоростей. Это происходит, вероятнее всего, в результате того, что температура резания возрастает с увеличением скорости шпинделя, следовательно, возникает размягчение матрицы и расслаивание уменьшается. Эффект от добавления наполнителей в виде TiO_2 и графита показал, что повышение процента уменьшает величину расслаивания и осевую силу, что является подтверждением того, что лучшая связь материала связующего с волокнами матрицы приводит к росту мощности усилия разрушения.

В работе [14] также рассматривается сверление эпоксидных стеклопластиков с добавлением наполнителей в виде TiO_2 и ZnP. Показано, что такая модификация (увеличение процентного содержания) увеличивает прочность материала, причем добавление ZnS более эффективно по сравнению с TiO_2 . Анализ сверления таких материалов ступенчатым спиральным сверлом с углом при вершине 118° трех геометрических размеров показал, что лучшие результаты по качеству отверстий дает обработка с меньшим типоразмером. Также были проведены эксперименты по сверлению образцов после их выдержки в морской воде 8, 16 и 24 часа. Лучшую обрабатываемость дали заготовки после 16 часов выдержки в морской воде и добавление ZnS более благоприятно действует на процесс сверления, чем добавление TiO_2 .

В целом, проведенные исследования показали, что для различных типов связующих общие закономерности, связанные с влиянием подачи и частоты вращения на величину осевой силы, сохраняются [15]. Однако, например, эпоксидное связующее обеспечивает меньшее расслаивание на выходе инструмента, чем полиэфирная смола. Причем эта закономерность подтверждается как при использовании укороченного спирального сверла, так и специального инструмента «Brad & Spur». По абсолютной величине осевая сила для эпоксидного связующего несколько выше, чем для полиэфирного, но, как отмечено в [15], при этом фактор расслаивания больше при сверлении образцов из полиэфирного связующего. Использование сверла типа

«Brad & Spur» за счет меньшего значения осевой силы обеспечивает меньшую величину расслаивания на выходе.

Сверление композитов вдоль и под углом к направлению армирования в практических приложениях встречается достаточно редко и, поэтому, особого внимания к изучению этой операции не уделялось. Экспериментальные наблюдения показали, что сверление композитов вдоль и под углом к направлению армирования по своим качественным закономерностям собственно процесса сверления не сильно отличаются от традиционного сверления поперек направления армирования [16,17].

Выводы. Из теории и практики сверления композитов известно, что с увеличением подачи растет осевая сила и это приводит к интенсификации расслаивания на входе и выходе инструмента и росту шероховатости. Это явление характерно практически для всех видов сверл. При этом для сверл из быстрорежущей стали величина возникающих дефектов больше, чем для инструмента из твердого сплава. Лучшее качество поверхности получается при сверлении твердосплавным сверлом практически для всех сочетаний подачи – s и частоты вращения шпинделя – f .

Величина шероховатости независима от типа и формы армирования, типа связующего, метода укладки и изготовления композита для выбранного инструмента, зависит, прежде всего, от сочетания величины подачи s и частоты вращения шпинделя f .

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. Faria P.E. Dimensional and Geometric Deviations Induced by Drilling of Polymeric Composite / P.E. Faria, J.C. Campos Rubio, A.M. Abrao // Journal of Reinforced Plastics and CompositeP. –2009. – V.28, N19. – P. 2353-2364. 2. Lachaud F. Drilling of composite structures / F. Lachaud, R. Piquet, F. Collombet, L. Surcin // Composite StructureP. – 2001. – V.52. – P. 511-516. 3. Мелентьев Р.Ю. Особенности механической обработки полимерных композиционных материалов / Р.Ю. Мелентьев, В.В. Натальчишин // 36. Наук праць НУК.– 2013.– №4.– С. 30-34. 4. Мелентьев Р.Ю. Особенности сверления углепластиков / Р.Ю. Мелентьев., В.В. Натальчишин // Праці Одеського політехнічного університету.– 2014.– 2(44).– С. 27-33. 5. Хавин Г.Л. Образование дефектов при сверлении слоистых композитов и механизм появления расслаивания / Г.Л. Хавин // Вісник НТУ «ХПИ»: Збірник наукових праць. Серія Технологія машинобудування. – Х.: НТУ «ХПИ».–2015.–№4(1113).– С.96-100. 6. Guo D.-M. Prediction of the cutting forces generated in the drilling of carbon-fibre-reinforced plastic composites using a twist drill / D.-M. Guo, Q. Wen, H. Gao, Y.-J. Bao // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2012. –226, N1. – P. 28-42. 7. Lee N.J. Effect of fibre content on the mechanical properties of Glass fibre mat/polypropylene compositeP. Composites Part A / N.J. Lee, J. Jang// Applied Science and Manufacturing. – 1999. – V.30, N6. – P. 815-822. 8. Won M.P. Drilling of aramid and carbon fiber polymer composites / M.P. Won, C.K.H. Dharan // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2002. – V.124, N4. – P. 778-783. 9. Lita A. Influence of tool material on dynamics of

drilling and damage analysis of UD-GFRP composites / A. Lita, C. Bisu, C. Minciú // U.P.B. Sci. Bull., Series D.– 2012. –V. 74, N 3. – P. 169-178. **10.** Arul P., Vijayaraghavan L., Malhotra P.K., Krishnamurthy R. Influence of tool material on dynamics of drilling of GFRP composites / P. Arul, L. Vijayaraghavan, P.K. Malhotra, R. Krishnamurthy // Int. J Adv. Manuf. Technol. –2006. – N29. – P. 655–662. **11.** Jawali D. Physico-mechanical properties, machinability and morphological behaviour of short glass fiber reinforced nylon 6 composites / D. Jawali, B. Sid-deshwarappa, J. Siddaramaiah // Journal of Reinforced Plastics and CompositeP. – 2006. –V.25, N13. – P. 1409-1418. **12.** Velayudham A. Evaluation of drilling characteristics of high volume fraction fibre glass reinforced polymeric composite / A. Velayudham, R. Krishnamurthy, T. Soundarapandian// International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2005. – V.45, N4-5.– P. 399-406. **13.** Muruges M.C., Sadashivappa K. Influence of filler material on glass fiber /epoxy composite laminates during drilling / M.C. Muruges, K. Sadashivappa // International Journal of Advances in Engineering & Technology.– 2012. – Vol. 3, N 1. – P. 233-239. **14.** Patil D.B. Effect of sea water on drilling processes of glass fibre reinforced epoxy composite materials to analysis of delamination factor and thrust force / D.B. Patil, N.C. Vijaykumar // International Journal of Engineering Research and ApplicationP.– 2014. – V.4, N2. – P. 243-249. **15.** Faria P.E. Drilling polymeric matrix composited reinforced with glass fibres / P.E. Faria, M.K. Akama, Abrão, A.M. Reis, J.P. Davim // 18th International Congress of Mechanical Engineering, November 6-11, 2005, Ouro Preto. – P. 365-373. **16.** Devadath V.R. Study of drilled hole surface characteristics in GFRP rod generated by different drill bits / V.R. Devadath, H.P. Raju, B.R. Narendra Babu, N.L. Muralikrishna // International Journal of Emerging trends in Engineering and Development. – 2012. – V.5, N2. – P. 149-155. **17.** Abrao A.M., Faria P. E., Campos Rubio J.C., Reis P., Davim P. J. Drilling of fibre reinforced plastic: A review / A.M. Abrao, P.E. Faria, J.C. Campos Rubio, P. Reis, P.J. Davim // J. Mater. Process Technology. – 2007. – N186. – P. 1-7.

Bibliography (transliterated): **1.** Faria P.E. Dimensional and Geometric Deviations Induced by Drilling of Polymeric Composite / P.E. Faria, J.C. Campos Rubio, A.M. Abrao // Journal of Reinforced Plastics and CompositeP. –2009. – Vol.28, No19. – P. 2353-2364. **2.** Lachaud F. Drilling of composite structures / F. Lachaud, R. Piquet, F. Collombet, L. Surcin // Composite StructureP. – 2001. – Vol.52. – P. 511-516. **3.** Melentev R.Yu. Osobennosti mehanicheskoy obrabotki polimernykh kompozitsionnykh materialov / R.Yu. Melentev. V.V. Natalchishin // Zb. Nauk prats NUK.– 2013.– No4.– P. 30-34. **4.** Melentev R.Yu. Osobennosti sverleniya ugleplastikov / R.Yu. Melentev., V.V. Natalchishin // PratsI Odeskogo politehnichnogo unIversitetu.– 2014.– 2(44).– P. 27-33. **5.** Havin G.L. Obrazovanie defektov pri sverlenii sloistykh kompozitov i mehanizm poyavleniya rasslaivaniya / G.L. Havin // VIsnik NTU «HPI»: Zblrnik naukovih pratP. SerIya TehnologIya mashinobuduvannya. – Kharkov: NTU «HPI».–2015.–No4(1113).–P.96-100.

6. Guo D.-M. Prediction of the cutting forces generated in the drilling of carbon-fibre-reinforced plastic composites using a twist drill / D.-M. Guo, Q. Wen, H. Gao, Y.-J. Bao // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2012. –226, No1. – P. 28-42. **7.** Lee N.J. Effect of fibre content on the mechanical properties of Glass fibre mat/polypropylene compositeP. Composites Part A / N.J. Lee, J. Jang// Applied Science and Manufacturing. – 1999. – Vol.30, No6. – P. 815-822. **8.** Won M.P. Drilling of aramid and carbon fiber polymer composites / M.P. Won, C.K.H. Dharan // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2002. – Vol.124, No4. – P. 778-783. **9.** Lita A. Influence of tool material on dynamics of drilling and damage analysis of UD-GFRP composites / A. Lita, C. Bisu, C. Minciú // U.P.B. Sci. Bull., Series D.– 2012. –Vol. 74, No 3. – P. 169-178. **10.** Arul P., Vijayaraghavan L., Malhotra P.K., Krishnamurthy R. Influence of tool material on dynamics of drilling of GFRP composites / P. Arul, L. Vijayaraghavan, P.K. Malhotra, R. Krishnamurthy // Int. J Adv. Manuf. Technol. –2006. – No29. – P. 655–662. **11.** Jawali D. Physico-mechanical properties, machinability and morphological behaviour of short glass fiber reinforced nylon 6 composites / D. Jawali, B. Sid-deshwarappa, J. Siddaramaiah // Journal of Reinforced Plastics and CompositeP. – 2006. –Vol.25, No13. – P. 1409-1418. **12.** Velayudham A. Evaluation of drilling characteristics of high volume fraction fibre glass reinforced polymeric composite / A. Velayudham, R. Krishnamurthy, T. Soundarapandian// International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2005. – Vol.45, No 4-5.– P. 399-406. **13.** Muruges M.C., Sadashivappa K. Influence of filler material on glass fiber /epoxy composite laminates during drilling / M.C. Muruges, K. Sadashivappa // International Journal of Advances in Engineering & Technology.– 2012. –Vol. 3, No 1. – P. 233-239. **14.** Patil D.B. Effect of sea water on drilling processes of glass fibre reinforced epoxy composite materials to analysis of delamination factor and thrust force / D.B. Patil, N.C. Vijaykumar // International Journal of Engineering Research and ApplicationP.– 2014. – Vol.4, No 2. – P. 243-249. **15.** Faria P.E. Drilling polymeric matrix composited reinforced with glass fibres / P.E. Faria, M.K. Akama, Abrão, A.M. Reis, J.P. Davim // 18th International Congress of Mechanical Engineering, November 6-11, 2005, Ouro Preto. – P. 365-373. **16.** Devadath V.R. Study of drilled hole surface characteristics in GFRP rod generated by different drill bits / V.R. Devadath, H.P. Raju, B.R. Narendra Babu, N.L. Muralikrishna // International Journal of Emerging trends in Engineering and Development. – 2012. – Vol. 5, No 2. – P. 149-155. **17.** Abrao A.M., Faria P. E., Campos Rubio J.C., Reis P., Davim P. J. Drilling of fibre reinforced plastic: A review / A.M. Abrao, P.E. Faria, J.C. Campos Rubio, P. Reis, P.J. Davim // J. Mater. Process Technology. – 2007. – No 186. – P. 1-7.

Поступила (received) 28.10.2015

Робота виконана по проекту М2133Ф фінансированого Министерством образования и науки Украины.

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

Khavyn Hennadyi Lvovych – Candidate of Technical Sciences, assistant professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25, e-mail: gennadiy.khavin@mail.ru;

Есип Инна Олеговна – магистрант, НТУ «ХПИ», тел.: (057)-720-66-25.

Esyp Ynna Olehovna – undergraduate, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25.