

УДК 629.735

Ю.А. ВОРОБЬЕВ, А.И. НИКОЛЕНКО, А.Ю. ВОРОБЬЕВ*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СВЕРЛЕНИЮ СМЕШАННЫХ ПАКЕТОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

Приведен аналитический обзор экспериментальных исследований по сверлению пакетов «углепластик/титановый сплав» (КМУ/Тi) с использованием инструмента стандартной геометрии из различных режущих материалов. Использовались следующие материалы сверл: быстрорежущая сталь (HSS), быстрорежущий кобальт (HSS-Co) и карбид (твердосплавный материал). Отмечено, что на границе раздела КМУ/Тi высокие температуры вызывают повреждение композита в области отверстия. Различные механические и тепловые свойства материалов пакета влияют на стойкость инструмента и качество отверстий, независимо от материала режущего инструмента. Меньшая стойкость инструмента характерна для высоких шпиндельных скоростей и малых подач. Отмечено, что карбидные сверла имеют более высокую стойкость, минимальные поверхностные повреждения и вызывают меньшие повреждения пакета вследствие высоких температур.

углепластик, сверление, износ инструмента, повреждение от высокой температуры, шероховатость, заусенцы

Введение

К началу второго тысячелетия применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) и металлических слоистых композиционных материалов (МКМ) в различных отраслях промышленности достигло значительных масштабов. Часто композиты используются в соединении с другими материалами для формирования гибридной структуры, характеризующейся по сравнению с металлом повышенной прочностью при минимальном весе.

В аэрокосмической отрасли давно наметились тенденции к увеличению объема использования композитов и титановых сплавов ввиду их высоких механических характеристик, которые могут быть гарантированы при высоких нагрузках, имеющих место при эксплуатации военных и гражданских самолетов. В настоящее время соединение болтами и клепка остаются основными методами для сборки композитных обшивок с металлическим или композитным каркасом. При этом очень важным фактором, влияющим на ресурс соединения, является качество выполнения отверстий под крепежные элементы [1]. Чтобы минимизировать погрешности

установки, композитные панели и элементы каркаса, как правило, сверлят совместно в пакете [2]. Однако, сверление смешанных пакетов, например, КМУ/Тi – сложная задача для инженеров-технологов ввиду различных требований к качеству и режимам механической обработки для каждого из материалов. Поэтому специалистами интенсивно проводятся исследования процессов механической обработки, как композитов в отдельности, так и в соединении с металлами [1 – 6]. Касательно сверления деталей из титановых сплавов, исследовались силовая модель, износ инструмента и явление повышения температуры при сверлении [3 – 6]. При сверлении композитов большинство экспериментов были направлены на исследование влияния механики процесса на качество отверстий, и, прежде всего, расслаивание композита [1]. Из анализа последних публикаций и результатов обширных экспериментов следует, что при сверлении углепластиков требуется низкая скорость подачи и высокая скорость вращения шпинделя [4 – 8]. Напротив, для титановых сплавов требуется высокая скорость подачи и низкая скорость вращения шпинделя [9]. В статье пред-

ставлен анализ проблемы механического сверления смешанных пакетов КМУ/Тi, описаны получаемые параметры качества отверстия (чистота поверхности и повреждения).

1. Экспериментальная часть

В экспериментах использовался ПКМ висмаилемид графита, разработанный компанией Boeing, состоящий из волокон графита IM-6 и терморепактивной матрицы 3501-6 с ориентацией слоев

[45/90/-45/0/45/0/-45/90/-45/0/45/90/-45/90/90].

Толщина КМУ составляла 7,62 мм (толщина монослоя 0,2 мм), листов сплава Ti₆Al₄V – 3,1 мм [11].

Базируясь на результатах поисковых экспериментов, сверление пакета КМУ/Тi осуществляли со стороны углепластика. Такое направление сверления приводит к наименьшему расслаиванию на выходе сверла из КМУ. Эксперименты по сверлению выполнялись на модифицированном вертикально-фрезерном станке с ЧПУ и редуктором с применением СОЖ. Двигатель станка обеспечивал пять значений скорости вращения шпинделя – 325, 660, 1115, 1750 и 2750 об/мин. Были использованы три типа материалов для рабочей части сверл: быстрорежущая сталь (HSS), быстрорежущий кобальт (HSS-Co) и карбид (твердосплавный материал). Выбранные типы сверл и материалы их рабочей части охватывают весь диапазон уровней используемой

геометрии и твердости.

Эксперименты были направлены на исследование влияния режущих материалов, параметров технологического процесса (подачи и скорости вращения шпинделя) на износ инструмента и качество отверстий. Износ инструмента измерялся на передней и задней поверхности сверла с помощью оптического микроскопа. Качество отверстия в Ti-сплаве и КМУ оценивалось по критериям целостности материала, шероховатости и заусенцев. Для определения качества просверленного отверстия использовались методы микроскопии: сканирующий электронный микроскоп использовался для исследования отдельных фрагментов поверхности отверстия, а также для изучения развития дефектов в каждом из слоев.

2. Анализ полученных результатов

На рис. 1 показаны образцы КМУ/Тi, просверленные со стороны углепластика с использованием HSS-Co сверла (подача 0,13 мм/об, частота вращения 660 об/мин). Следует обратить внимание, что размеры заусенца увеличиваются с каждым последующим просверленным отверстием. Влияние материала сверл на износ инструмента, повреждение КМУ, размеры заусенцев в Ti и шероховатость поверхности отверстия будут проанализированы далее.

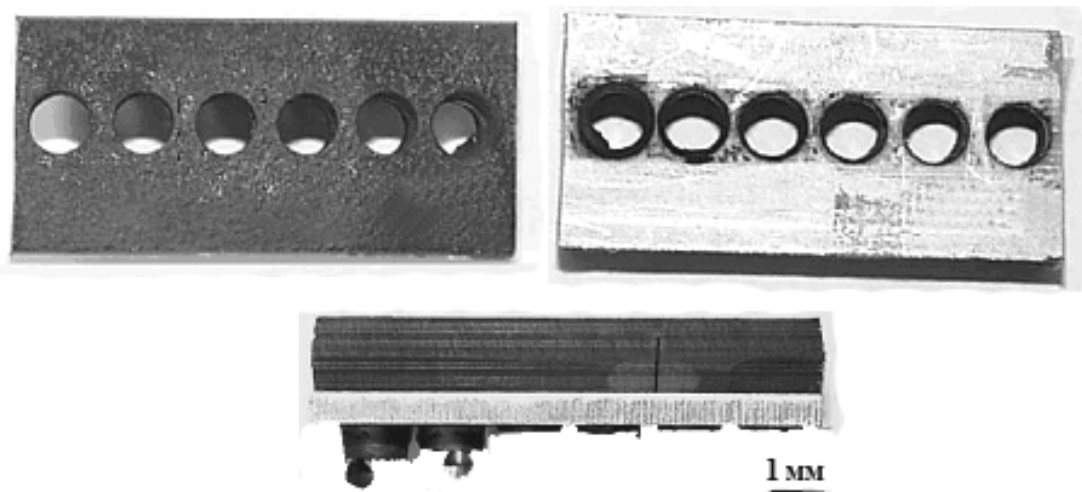


Рис. 1. Виды сверлу, снизу и сбоку на пакет КМУ/Тi

2.1. Изготовление отверстия и износ инструмента. На рис. 2 показаны микрофотографии, изображающие износ сверл. У HSS сверл (рис. 2, б) наблюдался наибольший износ после наименьшего количества просверленных отверстий. У HSS-Co и HSS сверл (соответственно рис. 2, в и б) наблюдался боковой и канавочный износ.

Незначительный боковой износ начинал формироваться на карбидном сверле (рис. 2, а). Для всех сверл наименьший износ наблюдался в угле при вершине. Также был обнаружен чрезвычайно сильный износ инструмента на винтовых режущих кромках HSS и HSS-Co сверл.

При использовании HSS и HSS-Co сверл оказа-

лись поврежденными большинство отверстий в отличие от сверления карбидными сверлами. Стойкость инструмента определялась с помощью системы ЧПУ (при достижении максимальной осевой силы ~ 3700 Н сверло считалось изношенным) или визуально, замечая износ лезвия и дым. Для HSS и HSS-Co сверл комбинация малой скорости и малой подачи вредна для ресурса инструмента из-за длительного времени его вхождения в пакет. Результатом этого является существенное увеличение температуры инструмента. Рост шпиндельной скорости увеличивал генерирование тепла из-за трения в режущей зоне, уменьшая при этом стойкость инструмента.

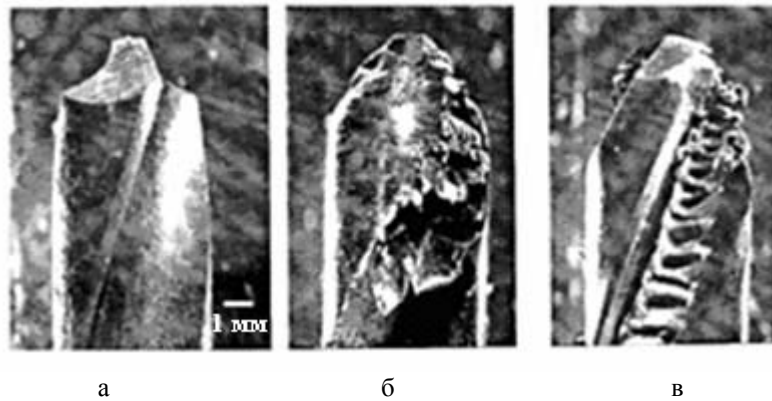


Рис. 2. Микрофотографии износа а – карбидного, б – HSS и в – HSS-Co сверл после 10, 1 и 1 отверстий соответственно, при подаче 0,08 мм/об и скорости 1750 об/мин

Титановые сплавы нагреваются во время сверления с высокой скоростью, не рассеивая при этом тепло столь же быстро из-за низкой теплопроводности. Выделение тепла было основным фактором снижения качества отверстия при сверлении пакета КМУ/Ti, так как высокая температура в области сверления отрицательно сказывается на ресурсе инструмента и способствует ускоренному разрушению матрицы композита. Как результат – получено меньше отверстий для HSS-Co и HSS сверл, когда использовались высокие шпиндельные скорости и медленная подача. Износ инструмента начинается по внешним кромкам лезвий, т. к. скорость резания на периферии сверла является максимальной. Это приводит к более интенсивному трению между ин-

струментом и материалом, усиленное выделение тепла, которое в свою очередь ведет к увеличению износа инструмента.

В отличие от HSS и HSS-Co сверл, карбидные сверла не приходят в негодность даже после того, как ими было выполнено более 30 отверстий. У карбидных сверл наблюдался наименьший износ, т. к. карбид имеет большую стойкость в горячем состоянии. Сверла быстро изнашиваются при подаче свыше 0,2 мм/об и скорости вращения шпинделя свыше 1750 об/мин. Боковой износ карбидного сверла увеличивается с увеличением подачи и шпиндельной скорости. Осевая сила, испытываемая карбидным сверлом, растет незначительно с увеличением количества отверстий, в отличие от HSS и

HSS-Co сверл. Следовательно, высокие скорости и высокая подача существенно не влияют на ресурс карбидных сверл, так как выделение тепла – не глав-

ный фактор, влияющий на их износ. На рис. 3 показан износ инструмента по времени для различных сверл.

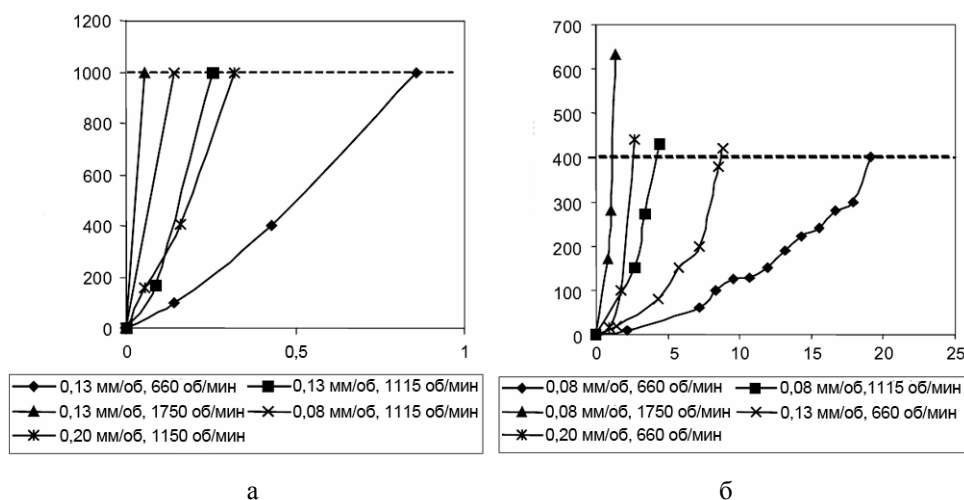


Рис. 3. Износ инструмента по времени: а – для HSS-Co сверл; б – для карбидных сверл

2.2. Повреждения в пакете. Применение HSS и HSS-Co сверл приводит к повреждению пакета: отслаиванию волокон на границе раздела КМУ/Ti и заусенцам на выходе из Ti.

Наблюдались два типа повреждения на выходе из композитной детали (рис. 4). Первый – кольцо обесцвечивания, расположенное вокруг отверстия. Второй – кольцо повреждения, которое вызвано как высокой температурой в зоне отверстия, так и повреждениями от металлической стружки. Зона обесцвечивания образовывалась за счет нагрева в процессе сверления, однако, нарушения целостности волокон и композита при этом не наблюдалось. Максимальное повреждение композита замечено при использовании HSS и HSS-Co сверл, минимальное – для карбидных сверл (по крайней мере, для выполненного количества отверстий). В процессе сверления сформировались кольцевые повреждения, расположенные в выходном слое композита на границе раздела КМУ и Ti (рис. 4). Диаметры кольца обесцвечивания и кольца повреждения увеличивались с увеличением числа просверленных отверстий. Наиболее интенсивное увеличение размеров колец характерно для HSS и HSS-Co сверл. На рис. 4, б показано разрушение композита в резуль-

тате перегрева матрицы. Рис. 4, в показывает расслаивание композита на границе контакта с Ti, вызванное высокой температурой и металлической стружкой. Минимальные повреждения наблюдались при использовании карбидных сверл, так как карбид имел более высокую стойкость в горячем состоянии по сравнению с HSS и HSS-Co сверлами, в результате чего, лезвия оставались более острыми, более эффективно резали материал и выделялось меньше тепла. В случае HSS-Co сверл диаметр повреждения увеличивается при меньших подачах и скорости менее чем 400 об/мин, в связи с тем, что при более низкой подаче увеличивается время вхождения инструмента в образец. Диаметр повреждения увеличивается для HSS-Co и HSS сверл также с увеличением скорости вращения шпинделя. Повреждения карбидными сверлами были незначительными, поэтому они не замерялись. Образование заусенцев на выходе из Ti пластины зависит от шпиндельной скорости и подачи (рис. 5). При постоянной скорости высота заусенца уменьшается с увеличением подачи. При постоянной подаче высота заусенца увеличивается при росте шпиндельной скорости. Высота заусенца увеличивается с увеличением количества просверленных отверстий. Например, вы-

сота заусенца первого просверленного HSS сверлом отверстия при подаче 0,2 мм/об и скорости 660 об/мин была 0,9 мм; на 12-м отверстии она увеличилась до 2,84 мм. Увеличение высоты заусенца с каждым последующим выполненным отверстием характерно для всех типов сверл. При этом карбидные сверла вызывают минимальную высоту заусенца. Однако, когда карбидные сверла были проверены

при постоянной скорости, входной заусенец увеличивался с увеличением подачи и увеличением количества просверленных отверстий. Высота заусенца на выходе оставалась постоянной на всех выполненных отверстиях. Это объясняется высокой осевой силой при высокой подаче. Боковой износ инструментов из карбида также увеличивается с увеличением подачи.

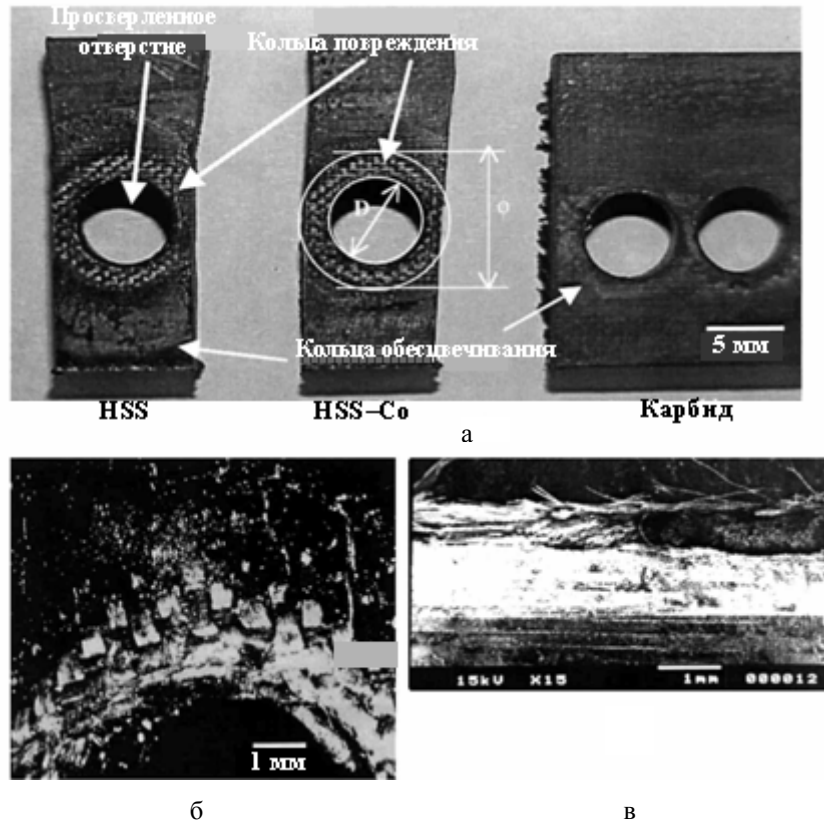


Рис. 4. Повреждения в пакете: а – на границе раздела КМУ/Ti при подаче 0,08 мм/об и скорости 1750 об/мин; б – вид сверху на поврежденную область КМУ, произведенной HSS-Co сверлом при подаче 0,08 мм/об, скорости 2720 об/мин (под микроскопом); в – вид снизу под сканирующим электронным микроскопом

Образование заусенца объясняется несколькими факторами: предельной осевой силой, существенным тепловыделением, вызванным сверлением с высокой скоростью; значительным временем контакта инструмента с пакетом; медленной подачей. При той же самой осевой силе меньшая подача способствует образованию более высокого заусенца. Также высота заусенца пропорциональна осевой силе при постоянной подаче. Когда сверло приближается к выходу из материала, в Ti пластине было

выявлено большое количество тепла в зоне резания. При проходе сверла через нижнюю поверхность Ti, последний тонкий слой сплава не становится прорезанным должным образом, так как лезвия сверла уже изношены. Нижний слой же Ti пластины становится весьма горячим, его пластичность увеличивается, позволяя материалу легче течь. Когда изношенное сверло выходит из Ti пластины, режущая кромка подталкивает Ti наружу, создавая заусенец по периметру отверстия.

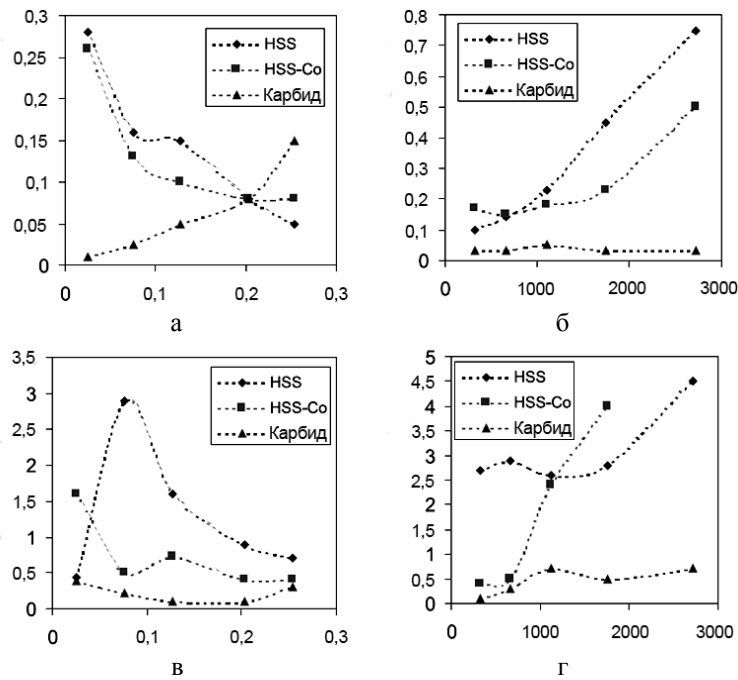


Рис. 5. Входная/выходная высота заусенца в первом отверстии Тi сплава при различных подаче и скорости: а – постоянная скорость (660 об/мин); б – постоянная подача (0,08 мм/об); в – постоянная скорость (660 об/мин); г – постоянная подача (0,08 мм/об)

У HSS и HSS-Co сверл наблюдается быстрый износ инструмента и наибольшие заусенцы. Для карбидных сверл наблюдается наименьший износ и наименьшие заусенцы.

2.3. Качество поверхности. Чистота поверхности в пакете КМУ/Тi зависит от шпиндельной скорости и подачи. Поверхность отверстия в пластине из Тi сплава была более гладкой по сравнению с поверхностью в композите. Установлен факт, что использование HSS и HSS-Co сверл при малых подачах приводит к более высоким значениям Ra в Тi сплаве, в то время как для карбидных сверл этого не наблюдается. Этому существует одно объяснение – при низкой подаче температура HSS и HSS-Co сверл повышается несущественно, однако при проходе через КМУ происходит сильный износ инструмента. В свою очередь изношенное сверло в Тi пластине с его высокой температурой делает шероховатость поверхности отверстия более высокой. При слишком высокой подаче увеличивается шероховатость отверстия в композите, т. к. сверло имеет тенденцию тянуть волокна вместо того, чтобы их резать (происходит разрыв волокон). При высоких шпиндель-

ных скоростях от высоких температур (приблизительно 270°C) в зоне резания происходит разрушение матрицы. Вначале разрыхляется граничный слой «матрица-волокно», что заканчивается серьезным повреждением композита. Также имеет место расплавление, которое приводит к уменьшению шероховатости. Однако, если волокна вытянуты из матрицы, то это вызывает повреждения, увеличивая тем самым шероховатость.

Заключение

Экспериментальное изучение сверления отверстий в пакетах КМУ/Тi проводилось с использованием сверл, изготовленных из различных материалов, параметры технологического процесса также варьировались. Самая существенная проблема, которая возникла при сверлении образцов – низкая теплопроводность Тi сплава, вызывающая усиленное выделение тепла в зоне сверления и увеличение температуры инструмента. Высокая температура приводит к увеличению диаметра зоны повреждения на границе пластин и ускоренному износу инструмента. Это, в свою очередь, вызывает увеличение

силы резания, высоты заусенцев, а высокая температура – расслаивание композита и увеличение шероховатости. В случае HSS и HSS-Co сверл максимальная температура зарегистрирована при высоких шпиндельных скоростях и низкой подаче.

Таким образом, увеличение скорости вращения шпинделя ведет к увеличению износа инструмента, увеличению заусенцев на входе и выходе из Ti пластины, увеличению диаметра зоны повреждений и уменьшению числа отверстий, просверленных одним сверлом. Увеличение подачи приводит к увеличению осевого давления на сверло и крутящего момента для обоих материалов, уменьшению заусенцев на входе и выходе, уменьшению зоны повреждения композита и шероховатости в Ti, увеличению шероховатости в КМУ и увеличению числа просверленных отверстий. Осевое усилие и подача скажутся на величине зоны повреждения и высоте выходного заусенца.

Из трех проверенных материалов для сверл, карбидные сверла имеют самую высокую стойкость, обеспечивают минимальные значения усилия резания, наименьшие заусенцы, зоны повреждения и максимальное качество отверстия.

При сверлении HSS и HSS-Co сверлами:

– увеличение подачи приводит к увеличению осевой силы и крутящего момента для КМУ/Ti пакета, к уменьшению входных и выходных заусенцев, увеличению шероховатости в обоих материалах и увеличению количества просверленных отверстий, образующееся при сверлении тепло вызывает повреждение в композите;

– увеличение скорости шпинделя приводит к увеличению износа инструмента, увеличению входных и выходных заусенцев, зоны повреждения композита и уменьшению количества просверленных отверстий.

Рекомендуется для сверления пакетов КМУ/Ti использовать карбидные сверла при частоте вращения 660 об/мин и подаче 0,08 мм/об.

Литература

1. Abrate S. Machining of composite materials in composites engineering handbook. – New York: Marcel Dekker, 1999. – P. 777-810.
2. Hung N.P., Loh N.L., Venkatesh V.C. Machining of metal matrix composites in machining of ceramics and composites. – New York: Marcel Dekker, 1999. – P. 295-356.
3. Galloway D.F. Some experiments on the influence of various factors on drill performance // Trans ASME. – 1997. – Vol. 79. – P. 191-231.
4. Agapiou J.S., Stephenson D.A. Analytical and experimental studies of drill temperature // Trans ASME. – 1994. – Vol. 116. – P. 54-60.
5. Ho-Cheng H., Dhran C.K. Delamination during drilling in composite laminates // Trans ASME. – 1990. – Vol. 112. – P. 236-239.
6. Jain S, Yang D.C.H. Effects of feed rate and chisel edge on delamination in composites drilling // Trans ASME. – 1993. – Vol. 115. – P. 398-405.
7. Ramulu M, Young P, Kao H. Drilling of graphite/bismaleimide composite material // J Mater Eng Performance. – 1999. – Vol. 8. – P. 330-338.
8. Colligan K, Ramulu M. Experimental investigation of pitting of hole surfaces when drilling graphite/epoxy materials // ASME Bound Volume. – 1992; MD-Vol. 35. – P. 11-25.
9. Colligan K. New tool drills both titanium and carbon composites // Machinist. – 1994. – Vol. 138 (10). – P. 56-58.
10. Masarweh W.A., Hough Jr. Performance analysis for drilling in thermoplastic composite-aluminum stacks // Compos Mater Technol. – 1992. – Vol. 45. – P. 253-259.
11. Ramulu M., Branson T., Kim D. A study on the drilling of composite and titanium stacks // Composites Structures. – 2001. – Vol. 54. – P. 67-77.

Поступила в редакцию 12.02.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ф.В. Новиков, Харьковский национальный экономический университет, Харьков.