

Оценка эффективности использования твердосплавного и алмазного инструмента для обработки отверстий в смешанных пакетах

А.Е. Пашков^а, Ю.Н. Иванов^б, Н.С. Чащин^с, В.О. Иванова^д

Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия

^аpashkov@istu.edu, ^бiv_yuriy@istu.edu, ^сrufle54007@mail.ru, ^дvikulyonok@mail.ru

Статья поступила 5.09.2017, принята 7.10.2017

В статье рассматривается технология обработки точных отверстий в смешанных пакетах, содержащих разнородные материалы, такие как полимерные композиционные материалы (ПКМ) и титановые сплавы. Сочетание подобных материалов создает значительные трудности для их совместной обработки. Более того, зачастую такие соединения присутствуют в крупногабаритных сборочных единицах, что приводит к необходимости использования специального сверлильного оборудования, в частности сверлильных машин с автоматической подачей инструмента. Значительное влияние на качество и точность отверстия оказывают режимы резания и используемый инструмент. Для выявления влияния данных факторов были выбраны два спиральных сверла — цельное твердосплавное и сверло со вставками из поликристаллического алмаза. Оценка инструмента и режимов резания проводилась в части определения склонности к образованию дефектов в ПКМ вследствие возникновения высоких температур в зоне резания. Для этого в ходе эксперимента контролировалась температура на выходе из смешанного пакета. Для оценки качества и точности обработанных отверстий контролировались шероховатость и диаметры отверстий в разных сечениях. По результатам испытаний построены гистограммы, отражающие влияние режимов резания на параметры качества и точности отверстий, на основе анализа которых сделаны выводы и даны рекомендации по выбору инструмента для обработки смешанных пакетов, содержащих ПКМ и титановые сплавы. Полученные результаты способствуют совершенствованию технологии сверления отверстий в смешанных пакетах на основе рационального выбора режущего инструмента и оптимальных режимов резания, что позволяет повышать качество изготавливаемой продукции и снижать ее себестоимость.

Ключевые слова: сверление; смешанный пакет; полимерный композиционный материал; титановый сплав; тепловизионная камера; твердосплавное сверло; алмазное сверло.

Efficiency evaluation of the use of carbide and diamond tool for processing holes in mixed packages

A.E. Pashkov^a, Yu.N. Ivanov^b, N.S. Chaschin^c, V.O. Ivanova^d

Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

^apashkov@istu.edu, ^biv_yuriy@istu.edu, ^crufle54007@mail.ru, ^dvikulyonok@mail.ru

Received 5.09.2017, accepted 7.10.2017

The article deals with the processing precise holes technology in mixed packages containing the materials different by properties such as carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and titanium alloys. The combination of such materials has considerable difficulties for their joint processing. Moreover, these compounds are often present in large-sized assembly units, which leads to the need to use special drilling equipment, in particular - drilling machines with automatic tool feeding. The cutting conditions and the tool have a significant influence on the quality and accuracy of the hole. To determine the influence of these factors, two spiral drills were selected: a solid carbide drill and a drill with polycrystalline diamond (PCD). The evaluation of the tool and cutting conditions was carried out for determining the propensity to form defects in the CFRP due to the occurrence of high temperatures in the cutting zone. For this purpose, the temperature on the surface of the titanium alloy from the side of the tool exiting was monitored during the experiment. To assess the quality and accuracy of the treated holes, the roughness and diameters of the holes in different sections were checked. Based on the results of the tests, histograms reflecting the effect of cutting modes on the parameters of the quality and accuracy of the holes were constructed. Based on the analysis of histograms, conclusions were drawn and recommendations were given for selecting a tool for processing mixed packages containing CFRP and titanium alloys. The obtained results contribute the improvement of the hole drilling technology in mixed packages based on the rational choice of the cutting tool and the optimal cutting conditions, which makes it possible to improve the quality of the manufactured products and reduce their cost price.

Key words: drilling; mixed package; polymeric composite material; titanium alloy; thermal imaging camera; carbide drill; diamond drill.

Введение

В производстве современных самолетов важную роль играют легкие и прочные материалы из-за необходимости снижения веса летательного аппарата без потери эксплуатационных характеристик. Например, в конструкции Boeing 787 Dreamliner масса полимерных композиционных материалов (ПКМ), армированных углеводородным волокном, составляет около 57 т (50 %), масса титановых сплавов — около 17 т (15 %). Превосходные свойства углепластиков и титановых сплавов способствуют все большему увеличению их доли в составе авиационной техники. Общемировые тенденции не обошли и российскую авиапромышленность, проекты SSJ-100 и MS-21 нацелены на широкое применение ПКМ и титановых сплавов.

Одной из важнейших задач в авиастроении является получение надежных соединений ПКМ с металлическими сплавами (смешанные пакеты, пакеты). В подавляющем большинстве соединения выполняются путем установки соединительных элементов в полученные сверлением отверстия. Надежность соединений зависит прежде всего от качества отверстий. Ухудшение этого параметра может привести к высоким нагрузкам в соединении, что повлечет за собой снижение характеристик ресурса или разрушение.

Сверление ПКМ совместно с титановыми сплавами является сложной задачей из-за конфликтующих условий обработки. Исследованиями ряда авторов установлены существенные отличия в механизме резания лезвийным инструментом этих материалов [1–7]. Если при обработке металлических сплавов процесс является результатом пластических деформаций, то в случае с ПКМ имеет место только хрупкое разрушение.

Пластические деформации, наряду с трением, становятся причиной повышенного тепловыделения в зоне резания, а низкая теплопроводность титанового сплава (в 3–5 раз меньше, чем у стали, и в 15–25 раз меньше, чем у алюминия) способствует значительному повышению температуры. В свою очередь, воздействие высоких температур может привести к разрушению связующего ПКМ [8–12] (для большинства углепластиков, используемых в авиации, эта температура составляет 180–190 °С). Высокая адсорбционная способность ПКМ не позволяет применять в процессе сверления смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) в достаточном количестве, в лучшем случае используется масляный туман. Абразивный характер углеродных волокон приводит к преждевременному износу инструмента и, как следствие, к росту температуры, снижению качества отверстий и превышению установленных на них допусков.

Многообразие специфических ограничений связанных с обработкой смешанных пакетов, затрудняет выбор оборудования, инструмента и технологических условий обработки.

Для обеспечения высокой стабильности и качества лучше использовать жесткое стационарное оборудование [13–15], однако это не всегда возможно. При проведении ряда сборочных операций необходимо компактное сверлильное оборудование [16–18], которое можно доставить к месту обработки. Таким оборудованием являются сверлильные машины с автоматической

подачей (СМАП). По некоторым данным, в современном самолете доля отверстий, обработанных с использованием подобных машин, составляет порядка 40 %. На российском рынке представлены СМАП таких фирм, как Atlas Copco, Seti-Tec, Recoules, Lubbering и др. Выбор той или иной машины зависит от конкретных условий обработки: свободного пространства для установки машины, состава и толщины смешанного пакета, требуемой точности и шероховатости отверстия и др. [19, 20]. При прочих равных условиях предпочтение следует отдавать СМАП, построенным на модульном принципе и обладающим возможностью изменения частоты вращения шпинделя и подачи. Это позволяет при необходимости быстро производить ремонт путем замены того или иного модуля, а также использовать одну и ту же сверлильную машину для смешанных пакетов разной толщины и состава, а также для разных операций (сверление, развертывание и др.).

Наибольшую трудность представляет выбор режущего инструмента и режимов резания. Многие инструментальные фирмы в последнее время пополнили свои каталоги инструментом для обработки ПКМ. Инструмента для СМАП, адаптированного для обработки пакетов, содержащих титановые сплавы и ПКМ, в большинстве каталогов не представлено. Такой инструмент, как правило, имеет резьбовой хвостовик под конкретную модель СМАП и изготавливается по спецзаказу. Стоимость и сроки поставки специального инструмента значительно выше, чем у инструмента, изготавливаемого серийно. В некоторых случаях специальный инструмент можно заменить на стандартный, но при этом особое внимание необходимо уделить выбору режимов резания.

Данное исследование нацелено на сравнение специального сверла для СМАП и стандартного сверла из каталога. Исследуемый инструмент оценен с точки зрения выделения тепла при резании, что особо важно при обработке ПКМ. Качество отверстий оценивалось по двум основным параметрам: диаметр и шероховатость.

Методика испытаний. *Обрабатываемые материалы.* В качестве образца для проведения исследований был выбран смешанный трехслойный пакет следующего состава:

1-й слой — титановый сплав ВТ 6 ОСТ 1.90218-76 толщиной 6 мм;

2-й слой — углепластик на основе препрега Hexply M21/IMA194 (объемная доля эпоксидной смолы 34 %) толщиной 15 мм;

3-й слой — титановый сплав ВТ 6 ОСТ 1.90218-76 толщиной 6 мм. Все перечисленные компоненты были вырезаны с размерами в плане 320x250 мм и скреплены между собой болтами.

Экспериментальное исследование. Экспериментальные исследования проводились с использованием СМАП Atlas Copco PFD-1500. Эта сверлильная машина имеет пневматический двигатель, обеспечивающий мощность на шпинделе 1,5 кВт. Она построена на модульном принципе, что позволяет путем замены редукторов осуществлять быструю смену частоты оборотов шпинделя и подачи. Для дробления стружки в СМАП

организована прерывистая подача с амплитудой 0,15 мм и частотой 2,5 колебания за оборот.

Эскиз станда для исследования обработки отверстий с использованием СМАП представлен на рис. 1. Сверло 1 закреплено в шпинделе 9, направляющей для сверла служит втулка 7, которая установлена в носовике 8. Сверло выполняет обработку отверстия в образце 3. Фиксация кондуктора 6 на обрабатываемом образце

выполняется при помощи двух быстросъемных трубицин 4, расположенных симметрично относительно оси сверления, зазор между кондуктором и смешанным пакетом обеспечивается технологическими ножками 5. Съемка процесса резания производится тепловизионной камерой 1. Камера установлена на штативе на расстоянии 500...700 мм от зоны резания.

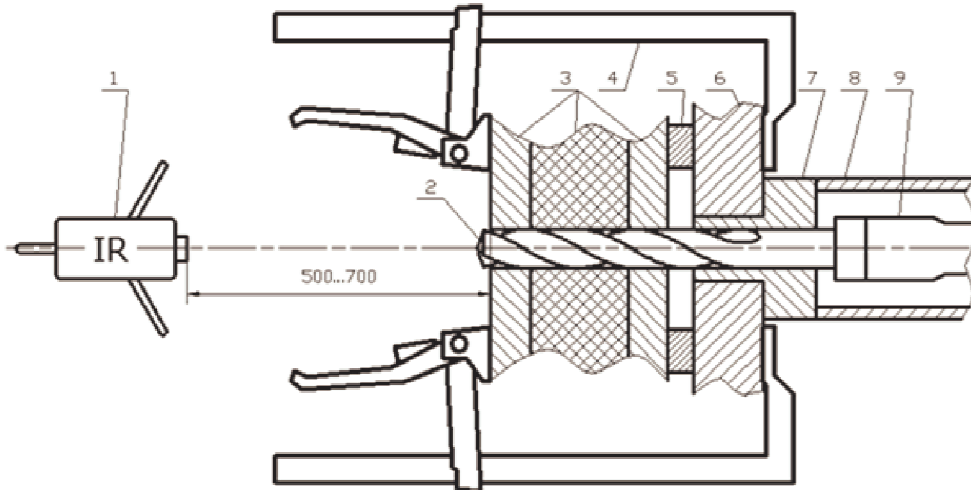


Рис. 1. Эскиз станда для исследования обработки отверстий с использованием СМАП

Инструментом для испытаний были выбраны два спиральных сверла. Одно из них — специальное сверло PRECORP 86PT для СМАП с резбовым хвостовиком (рис. 2 а). Режущая часть сверла изготовлена из твердого сплава и имеет вставки из поликристаллического

алмаза (PCD). Второе сверло — стандартное HAM PRÄZISION 271 Nirodrill с цилиндрическим хвостовиком (рис. 2 б). Режущая часть сверла изготовлена из твердого сплава с покрытием из карбонитрида титана (TiCN).

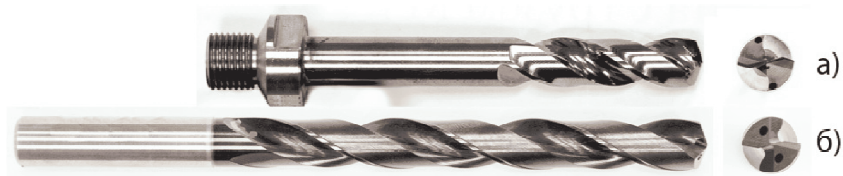


Рис. 2. Исследуемый инструмент: а — сверло PRECORP 86PT; б — сверло HAM PRÄZISION 271 Nirodrill

Основные характеристики исследуемых сверл приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики исследуемого инструмента

Характеристика	PRECORP 86PT	HAM PRÄZISION 271 Nirodrill
Тип заточки	двойная с подточкой перемычки	двойная с подточкой перемычки
Материал	твердый сплав	твердый сплав
Покрытие или вставки	вставки из PCD	покрытие TiCN
Диаметр, мм	12,004	12,005
Радиальное биение, мм	0,008	0,009

Характеристика	PRECORP 86PT	HAM PRÄZISION 271 Nirodrill
Угол при вершине, град.	155°/130°	150°/140°
Угол спирали, град.	35°	30°
Передний угол на периферии, град.	44°	36°
Задний угол на периферии, град.	9°	6°
Ширина ленточки, мм	1,35	0,91
Обратная конусность, мм	0,01 (на базе 5 мм, только на длине вставки PCD, далее цилиндр Ø11,984 мм)	0,122 (на базе 100 мм, на всей длине сверла)

В ходе испытаний частота вращения шпинделя варьировалась следующим образом: 140, 200, 270, 360, 400, 530 об/мин, при этом подача оставалась постоянной и составляла 0,05 мм/об. Обработка велась с подачей масляного тумана в зону резания (ACCU-LUBE

Assu-Lube LB-5000, расход 0,3 г/мин). Отверстия обрабатывались сериями, не менее трех штук подряд, с неизменными условиями. Обработка велась до достижения на сверле износа 0,1 мм. Результаты испытания сведены в табл. 2.

Таблица 2

Проведенные испытания

Инструмент	Подача, мм/об.	Скорость резания, м/мин					
		5,28	7,54	10,18	13,57	15,08	19,98
PRECORP 86PT	0,050	+	+	+	+	+	+
HAM PRÄZISION 271 Nirodrill	0,050	+	+	+	+	+	-

Примечание: (+) — испытание производилось; (-) — испытание не производилось.

Измерения. Весь комплекс исследований сопровождался бесконтактным измерением температуры на выходе сверла из отверстия. Для этих измерений применялась тепловизионная камера Flir SC7700M (см. рис. 1). С большой долей вероятности можно предположить, что температура на выходе сверла, зафиксированная тепловизионной камерой, является максимальной, достигнутой при сверлении, так как тепловыделение при сверлении титанового сплава значительно выше, чем при обработке углепластика, а момент выхода

сверла соответствует максимальному времени работы сверла в отверстии и максимальной глубине сверления.

График изменения температуры в зависимости от скорости резания приведен на рис. 3. На графике показаны максимальные температуры в центре отверстия и на периферии. С точки зрения достижения критических температур, при которых повреждается углепластик, наибольший интерес представляет значение температуры на периферии.

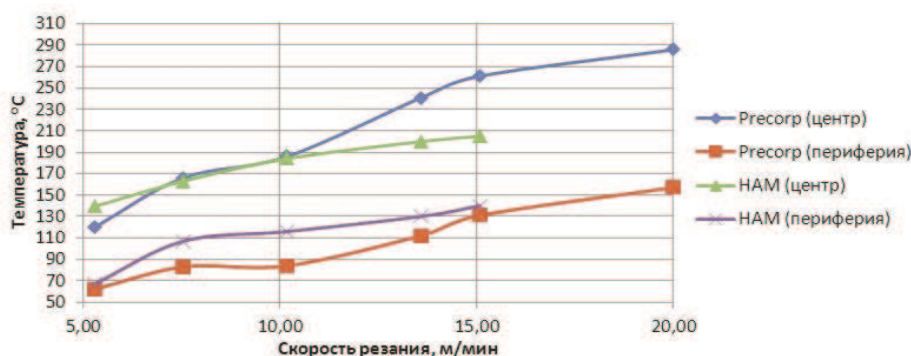


Рис. 3. Зависимость температуры от скорости резания

Шероховатость отверстий измерялась при помощи профилометров. Для отверстий в титановом сплаве применялся контактный профилометр Taylor Hobson Form Talysurf i200, для отверстий в углепластике — оптический профилометр Bruker Contour GT-K1. Анализируемая область представляла собой прямоугольник, вытянутый в осевом направлении, размером 1,2x4 мм.

Измерение диаметра отверстий производилось при помощи высокоточного трехточечного нутромера фирмы Mitutoyo в одном сечении для титанового сплава и в двух сечениях (со стороны входа и выхода) — в ПКМ.

Анализ результатов. Диаметр отверстий. Получение точных отверстий в пределах допуска является одной из основных целей при сверлении смешанных пакетов. Разные свойства материала, такие как модуль упругости, тепловое расширение и теплопроводность, затрудняют получение отверстий с малыми допусками. На рис. 4 и 5 показаны зависимости среднего диаметра отверстий от скорости резания для исследуемых сверл. Средние значения диаметров вычислялись из серии отверстий для каждого слоя пакета. Также на рисунках указаны отклонения от среднего значения в серии.

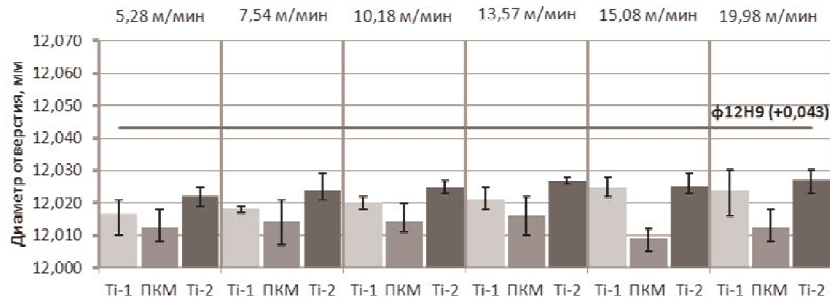


Рис. 4. Зависимость диаметра отверстий от скорости резания (сверло PRECORP 86PT, D = 12.004 мм)

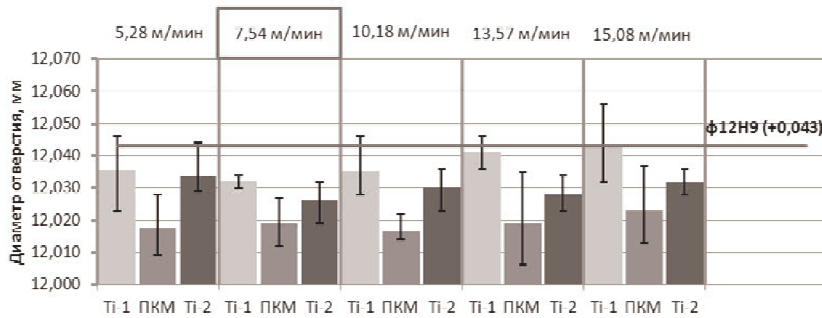


Рис. 5. Зависимость диаметра отверстий от скорости резания (сверло HAM PRÄZISION 271 Nirodrill, D = 12.005 мм)

Результаты показали, что при прочих равных условиях точность отверстий, полученных специальным сверлом PRECORP, выше, чем у отверстий, обработанных универсальным сверлом HAM. В слое ПКМ во всех испытаниях диаметр отверстия меньше, чем в титановом сплаве. При увеличении скорости резания увеличивается разность между диаметром отверстия в ПКМ и титановом сплаве. Это связано с различными тепловыми расширениями обрабатываемых материалов и нарастанием температуры при увеличении скорости резания. Для отверстий, обработанных сверлом PRECORP, диаметр в слое титанового сплава на выходе больше, чем на входе. Сверло HAM, наоборот, обеспечивает больший диаметр отверстия в слое титана на входе. Данный факт, вероятно, связан с большей обратной конусностью у сверла HAM и, следовательно, некоторым биением сверла в кондукторной втулке сверлильной машины в момент входа в первый слой. При сверлении последнего слоя, сверло направляется по уже частично просверленному отверстию и имеет меньшее биение, что, в свою очередь, обеспечивает получение более точного отверстия. Специфика обра-

ботки отверстий с использованием СМАП такова, что предпочтительными являются сверла с небольшой обратной конусностью.

Сверло PRECORP обеспечивает точность отверстий не грубее H9 (+0,043) на всех исследуемых режимах резания. Для сверла HAM выделилась область наиболее стабильного резания. Скорость резания 7,54 м/мин обеспечивает получение более точных отверстий с допуском H9 (+0,043). Другие исследуемые скорости резания обеспечили получение отверстий по H10 (+0,070).

Шероховатость отверстий. Шероховатость поверхности обработанных отверстий влияет на контактные взаимодействия в соединении. Низкая шероховатость способствует равномерному распределению сил в болтовом или заклепочном соединении, следовательно, более высокому ресурсу изделия в целом. На рис. 6 и 7 показаны зависимости среднего значения шероховатости отверстий от скорости резания для разных сверл. Средние значения шероховатости отверстий вычислялись из серии отверстий для каждого слоя пакета. Также на рисунках указаны отклонения от среднего значения в серии.

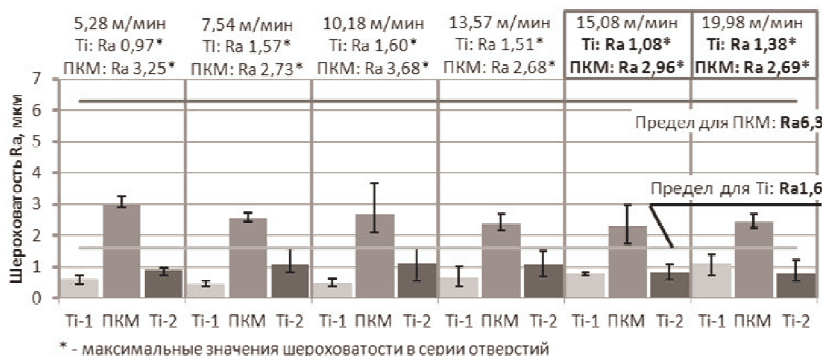


Рис. 6. Зависимость шероховатости стенок отверстий от скорости резания (сверло PRECORP 86PT, D = 12.004 мм)

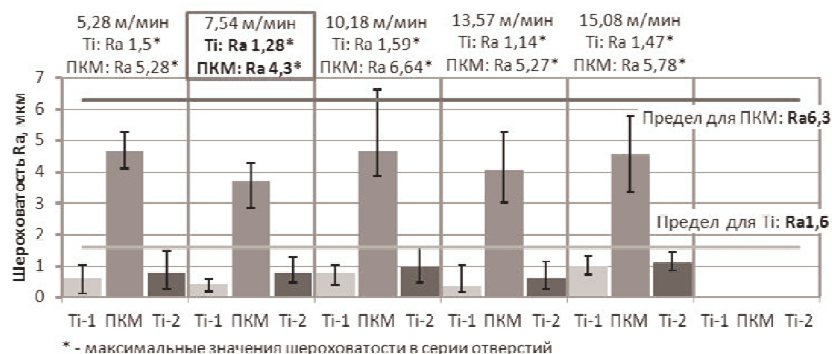


Рис. 7. Зависимость шероховатости стенок отверстий от скорости резания (сверло HAM PRÄZISION 271 Nirodrill, D=12.005 мм)

Результаты испытаний показывают, что при прочих равных условиях сверло PRECORP обеспечивает более низкую шероховатость отверстий в ПКМ. Это объясняется в первую очередь тем, что у вставки PCD сверла PRECORP более острая режущая кромка в сравнении со сверлом HAM. Сверло HAM имеет покрытие (TiCN), следовательно, радиус скругления режущей кромки больше на толщину покрытия.

Для отверстий в ПКМ, обработанных сверлом PRECORP, прослеживается зависимость от скорости резания. Увеличение скорости резания немного снижает шероховатость.

Шероховатость отверстий в титановом сплаве, для двух испытанных сверл лежит в одних и тех же диапазонах и не превышает Ra 1.6. Явной зависимости от скорости резания не выявлено.

Отверстия, обработанные сверлом HAM на скорости резания 7,54 м/мин, отличаются лучшими показателями шероховатости. Стоит отметить, что данная скорость резания обеспечила также и наивысшую точность отверстий.

Результаты и выводы

Инструмент, оснащенный вставками из поликристаллического алмаза (PCD), обеспечивает хорошие показатели по точности и шероховатости отверстий во всем диапазоне исследуемых режимов резания. Однако стоимость такого инструмента довольно велика при длительных сроках изготовления. Использование такого инструмента не всегда целесообразно с экономической точки зрения.

Твердосплавный серийно изготавливаемый инструмент (на примере сверла HAM) имеет более низкую цену и короткие сроки поставки. Он более требователен к выбору режимов резания, однако при их правильном выборе позволяет получать высококачественные отверстия.

Литература

1. Штучный Б.П. Обработка резанием пластмасс. М.: Машиностроение, 1974. 144 с.
2. Степанов А.А. Перспективы развития резания конструкционных материалов. М.: ЦН НТО машпрома, 1980. С. 254-255.
3. Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987. 176 с.

4. Ashrafi S.A., Sharif S., Farid A. A., Yahya M. Performance evaluation of carbide tools in drilling CFRP-Al stacks // Journal of Composite Materials. 2013. № 1–14. P. 236-241.

5. Чигринцев Е.Г., Сибирский В.В., Шевцов С.Н. Экспериментальное исследование качества отверстий в слоистом композите стеклопластик-титан, полученных на операциях сверления // Инженерный вестник Дона. 2015. Т. 37, № 3. С. 155.

6. Ghasemi F.A., Hyvadi A., Payganeh G., Arab N.B.M. Effects of Drilling Parameters on Delamination of Glass-Epoxy Composites // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 2011. № 5. P. 1433-1440.

7. Isbilir O., Ghassemieh E. Delamination and wear in drilling of carbon-fiber reinforced plastic composites using multilayer TiAlN // TiN PVD-coated tungsten carbide tools // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2012. № 31 (10). P. 717-727.

8. Иванов Ю.Н., Чапышев А.П., Каверзин Е.Я. Экспериментальное исследование влияния теплового расширения обрабатываемых материалов при сухом сверлении отверстий в пакетах структуры «полимерный композиционный материал-титановый сплав» // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2013. № 10 (81). С. 36-42.

9. Ismail S.O., Dhakal H.N., Ojo S.O. Thermo-mechanical modelling of FRP cross-ply composite laminates drilling: Delamination damage analysis // Composites Part B. 2017. Vol. 108. P. 45–52.

10. Davim J.P., Reis P. Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (cfrp) using design experiments // Composite Structures. 2003. Т. 59, № 4. С. 481- 487.

11. Krishnamoorthy A., Rajendra Boopathy S., Palanikumar K. Delamination analysis in drilling of cfrp composites using response surface methodology // Journal of Composite Materials. 2009. Т. 43, № 24. С. 2885-2902.

12. Melentiev R., Priarone P.C., Robiglio M., Settineri L. Effects of tool geometry and process parameters on delamination in cfrp drilling: an overview // Procedia CIRP 3rd. ("3rd CIRP Conference on Surface Integrity, CIRP CSI 2016"). 2016. С. 31-34.

13. Чашин Н.С., Иванов Ю.Н. Обработка отверстий в смешанных пакетах методом орбитального сверления // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2015. № 11 (106). С. 44–49.

14. Shyha I., Soo S.L., Aspinwall D.K., Bradley S., Dawson S., Pretorius C.J. Drilling of titanium/cfrp/aluminium stacks // Key Engineering Materials. 2010. Vol. 447; 448. С. 624-633.

15. Zitoun R., Krishnaraj V., Collombet F. Study of drilling of composite material and aluminium stack // Composite Structures. 2010. Vol. 92, № 5. С. 1246-1255.

16. Kolesnyk V., Kryvoruchko D., Hatala M., Mital D., Huturova Z., Duplak J., Alowa M. The effect of cutting temperature on carbide drilling life in the process of cfrp/steel stacks drilling // Manufacturing Technology. 2015. Vol. 15, № 3. С. 357-362.

17. Савилов А.В., Пятых А.С. Влияние вибраций на точность и качество поверхности отверстий при сверлении // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2013. № 12 (83). С. 103–111.

18. Чашин Н.С., Иванов Ю.Н., Сидорова А.В., Семенов Е.Н., Стуров А.А. Исследование технологии обработки отверстий малых диаметров в полимерном композиционном материале на робототехническом комплексе // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2017. Т. 21, № 6 (125). С. 39-48.

19. Алейников Д.П., Лукьянов А.В. Моделирование сил резания и определение вибродиагностических при-знаков дефектов концевых фрез // Системы. Методы. Технологии. 2017. № 1 (33). С. 39-47.

20. Савилов А.В., Пятых А.С. Определение коэффициентов сил резания для моделирования процесса сверления // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 2 (30). С. 69-73.

References

1. Shtuchnyi B.P. Machining of plastics. M.: Mashinostroenie, 1974. 144 p.

2. Stepanov A.A. Prospects for the development of cutting structural materials. M.: TsN NTO mashproma, 1980. P. 254-255.

3. Stepanov A.A. Cutting of high-strength composite polymer materials. L.: Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1987. 176 p.

4. Ashrafi S.A., Sharif S., Farid A. A., Yahya M. Performance evaluation of carbide tools in drilling CFRP-Al stacks // Journal of Composite Materials. 2013. № 1-14. P. 236-241.

5. Chigrinets E.G., Sibirskii V.V., Shevtsov S.N. Experimental study of the hole quality in a layered composite of GRP-titanium, data on drilling operations // Engineering journal of Don. E-journal. 2015. Т. 37, № 3. P. 155.

6. Ghasemi F.A., Hyvadi A., Payganeh G., Arab N.B.M. Effects of Drilling Parameters on Delamination of Glass-Epoxy Composites // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 2011. № 5. P. 1433-1440.

7. Isbilir O., Ghassemieh E. Delamination and wear in drilling of carbon-fiber reinforced plastic composites using multilayer TiAlN // TiN PVD-coated tungsten carbide tools // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2012. № 31 (10). P. 717-727.

8. Ivanov Yu.N., Chapyshev A.P., Kaverzin E.Ya. Experimental Study of Thermal Expansion Effect of Machined Materials under Dry Drilling of Holes in Packages of "Polymeric Composite Material-Titanium Alloy" Structure // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2013. № 10 (81). P. 36-42.

9. Ismail S.O., Dhakal H.N., Ojo S.O. Thermo-mechanical modelling of FRP cross-ply composite laminates drilling: Delamination damage analysis // Composites Part B. 2017. Vol. 108. P. 45-52.

10. Davim J.P., Reis P. Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (cfrp) using design experiments // Composite Structures. 2003. Т. 59, № 4. P. 481-487.

11. Krishnamoorthy A., Rajendra Boopathy S., Palanikumar K. Delamination analysis in drilling of cfrp composites using response surface methodology // Journal of Composite Materials. 2009. Т. 43, № 24. P. 2885-2902.

12. Melentiev R., Priarone P.C., Robiglio M., Settineri L. Effects of tool geometry and process parameters on delamination in cfrp drilling: an overview // Procedia CIRP 3rd. ("3rd CIRP Conference on Surface Integrity, CIRP CSI 2016"). 2016. P. 31-34.

13. Chashchin N.S., Ivanov Yu.N. Processing of openings in mixed packages by the method of orbital drilling // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2015. № 11 (106). P. 44-49.

14. Shyha I., Soo S.L., Aspinwall D.K., Bradley S., Dawson S., Pretorius C.J. Drilling of titanium/cfrp/aluminium stacks // Key Engineering Materials. 2010. Vol. 447; 448. P. 624-633.

15. Zitoun R., Krishnaraj V., Collombet F. Study of drilling of composite material and aluminium stack // Composite Structures. 2010. Vol. 92, № 5. P. 1246-1255.

16. Kolesnyk V., Kryvoruchko D., Hatala M., Mital D., Hutyrova Z., Duplak J., Alowa M. The effect of cutting temperature on carbide drilling life in the process of cfrp/steel stacks drilling // Manufacturing Technology. 2015. Vol. 15, № 3. P. 357-362.

17. Savilov A.V., Pyatykh A.S. Influence of vibration on the accuracy and quality of the hole surface during drilling // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2013. № 12 (83). P. 103-111.

18. Chashchin N.S., Ivanov Yu.N., Sidorova A.V., Semenov E.N., Sturov A.A. Investigation of the technology of processing holes of small diameters in a poly-dimensional composite material on a robotic complex // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2017. Т. 21, № 6 (125). P. 39-48.

19. Aleinikov D.P., Luk'yanov A.V. The system of cutting forces and the determination of vibrodiagnostic signs of defects of end mills // Systems. Methods. Technologies. 2017. № 1 (33). P. 39-47.

20. Savilov A.V., Pyatykh A.S. Determination of the cutting force factors for modeling the drilling process // Systems. Methods. Technologies. 2016. № 2 (30). P. 69-73.