

УДК 621.9+004.9

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ АРМИРОВАННОГО ТИТАНОМ СТЕКЛОПЛАСТИКОВОГО ЛОНЖЕРОНА ЛОПАСТИ НЕСУЩЕГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТА

Чигринец Е.Г.

*Ростовский вертолетный производственный комплекс,
Роствертол, ул. Новаторов, 5, Ростов-на-Дону, 344038, Россия
e-mail: egchigrinets@gmail.com*

Выполнены исследования по выявлению влияния конструктивно-геометрических параметров сверл на качество обработанных отверстий, производительность, динамику и теплофизику процесса механической обработки высокопрочного полимерного композиционного материала — стеклопластика, армированного титановой фольгой и применяемого в изготовлении высоконагруженной лопасти несущего винта (ЛНВ) вертолета Ми-28.

Представлены результаты определения оптимальных режимов обработки для исследуемых геометрий инструмента, зависимости высотных параметров шероховатости, характера и величины расслоений в местах входа-выхода сверла от типа инструмента и режимов обработки. С использованием разработанной компьютеризированной системы измерения крутящего момента определена виброактивность процесса сверления и ее связь с показателями качества. Выполнено компьютерное моделирование теплообразования в зоне резания методом конечных элементов в среде Comsol Multiphysics.

Ключевые слова: сверление армированного стеклопластика, расслоения, моделирование тепловых потоков, крутящий момент.

Введение

Степень технологического развития стран во многом определяется долей использования полимерных композиционных материалов (ПКМ) в наукоемких отраслях, таких, как авиастроение, кораблестроение, ракетно-космическая промышленность, автомобилестроение, производство спортивных товаров, энергетика, медицина и т.д. Как известно, процессы получения компонентов этих материалов, а также процессы получения из ПКМ деталей и агрегатов предусматривают наличие в стране мощной научной и производственной базы.

ПКМ представляют большой коммерческий и технологический интерес благодаря своим особым свойствам: высоким удельным прочностью, жесткости и модулю упругости; хорошей демпфирующей способности и коррозионной стойкости; высокой усталостной прочностью и низкому коэффициенту теплового расширения. Отличные прочностные характеристики и низкая удельная плотность композитов по сравнению с металлами позволяют уменьшить массу готовой детали без потери жесткости и надежности. Кроме того, использование ПКМ по-

звояет получать изделия с заданными физико-механическими свойствами.

По данным National Aeronautics and Space Administration (NASA), в аэрокосмической отрасли чаще всего используются композиты на основе терморепактивных смол, такие, как: стеклопластики на основе эпоксидных связующих: «Hexcel F-161», GE-101, «Ferro 2209», G-11, E-720; полиамид—стекловолокно, эпоксидорганопластик (с волокном «Кевлар-49») марки F-164, полиамид-кевлар «Skybond 703», эпоксиглепластик HУ-E-134 и ряд других [1], причем в наиболее нагруженных элементах конструкции чаще всего применяются комбинированные материалы — полимерные композиты, армированные металлом. В самолете Boeing 787 Dreamliner доля полимеров порядка 50%. В частности, фюзеляж полностью выполнен из композиционных материалов с использованием многослойных структур композит—металл, а средняя секция крыла выполнена из пакетов алюминий—углепластик—алюминий [2].

Замена металлических корпусных деталей и узлов наружного контура и мотогондолы на композитные с обеспечением их полной взаимозаменяемости в конструкции газотурбинных двигателей ПС-90А2, ПС-12, Д30КУ-154 позволяет снизить массу изделия на 20—30% и повысить усталостную долговечность [3].

В данной работе исследовался стеклопластик ВПС-7, армированный титановой фольгой и применяемый для изготовления лонжеронов ЛНВ и рулевых винтов (РВ) вертолета Ми-28. ЛНВ — особо ответственный узел вертолета, испытывающий большие динамические знакопеременные нагрузки и вибрации. К эксплуатационной надежности узла предъявляются высокие требования.

Лонжерон изготавливается методом сухой спиральной намотки 12 слоев стеклолент на металлическую оправку с последующим отверждением в пресс-форме. В комлевой части с третьего по девятый слой устанавливают комбинированные пакеты усиления, состоящие из титановой фольги ОТ4-0-0,1×220 и кордножгутовой высокомодульной стеклоткани (рис. 1).

Серийный технологический процесс изготовления ЛНВ предусматривает получение посадочных отверстий $\varnothing 33H7$ в комле лонжерона под втулку несущего винта. Маршрут обработки состоит из операций сверления, двух этапов рассверливания, расфрезеровывания, двух этапов зенкерования и трех этапов развертывания. Несмотря на то что отношение глубины обработки к диаметру сверла составляет 2:1, в случае ПКМ можем говорить о глубоком сверлении. Для минимизации таких дефектов, как расслоения и прижоги на обрабатываемых поверхностях, после врезания сверла на каждые 2 мм, его выводят из отверстия.

Проблемы обеспечения качества отверстий в полимерных композитах после операций сверления

Одной из важных задач изготовления изделий из ПКМ является получение соединений композит—металл и композит—композит крепежными элементами через отверстия, обработанные осевым инструментом. Трудность обеспечения качества и производительности механической обработки отверстий обусловлена тем, что жесткость инструмента ограничена размерами отверстия и осложнен отвод стружки из зоны резания. Композиты являются особой группой анизотропных материалов со

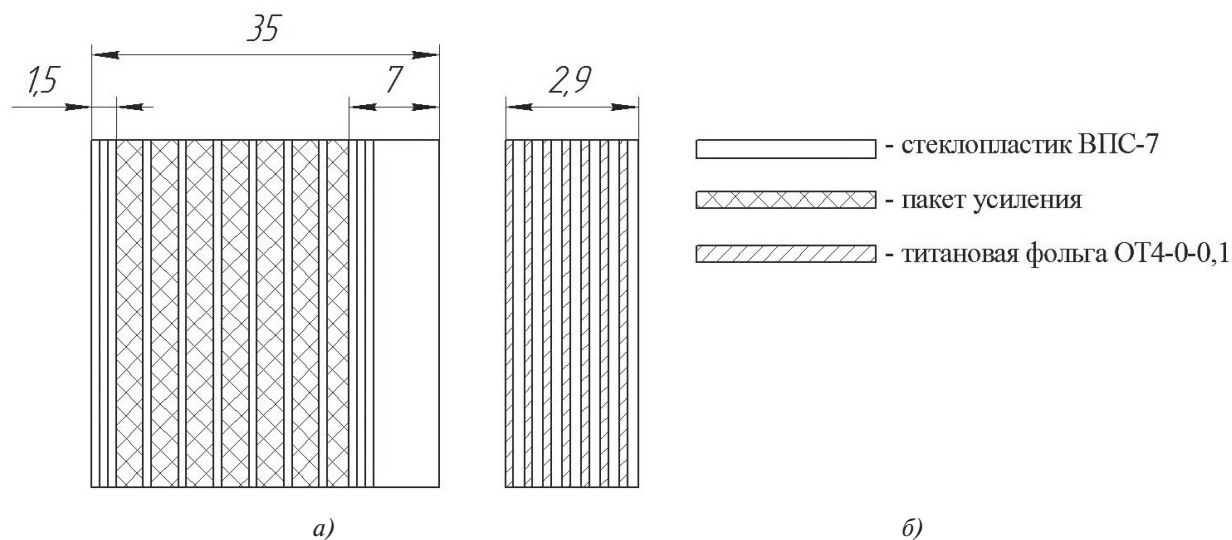


Рис. 1. Схема укладки пакетов усиления в комлевой части лонжерона (а), схема расположения слоев титана и стеклопластика в пакете усиления (б)

специфическими свойствами, поэтому на полимеры не распространяются закономерности механической обработки металлов.

Сверление отверстий в слоистых армированных ПКМ сопровождается большим количеством технологических проблем, в числе которых невозможность использования смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), усадка отверстий, повышенный износ режущего инструмента, сложность получения отверстий высокого качества ввиду низкой адгезионной связи наполнителя со связующим [4]. Характерными дефектами, сопровождающими процесс сверления полимерных композитов, являются расслоения, разломачивания, сколы в местах входа-выхода сверла, оплавление полимерной матрицы и появление прижогов на обработанных поверхностях [5].

Расслоения снижают усталостную прочность, прочность на сжатие, интенсифицируют влагопоглощение, снижая эксплуатационную надежность изделия. Авторами работ [6—9] отмечено, что на образование расслоений оказывают влияние режимы обработки, причем подача в большей степени, чем скорость резания. Увеличение подачи приводит к возрастанию силовых составляющих процесса резания, под действием которых происходит проминание несрезанных слоев композита.

В работе [10] отмечено скачкообразное возрастание осевой силы резания (до 400%) при переходе режущей кромки сверла со слоя композита на слой металла.

Характеристика процесса сверления отверстий в полимерных композиционных материалах во многом определяется свойствами наполнителя. Имеющие высокую твердость и истирающую способность стекловолокна вызывают повышенный абразивный износ и округление режущих кромок. Износ увеличивает контактные силы трения по задней поверхности сверла, что влечет за собой повышение температуры в зоне резания и образование расслоений. Отмечено преобладает абразивного износа над всеми остальными видами [4, 11].

О. Isbilir [11] выявил только два этапа износа режущего инструмента: период приработки и период установившегося износа. Период катастрофического износа, характерный для металлов, отсутствует. Аналогичные выводы сделаны в работе [4], где автор предлагает использовать технологический критерий износа инструмента. Сущность критерия заключается в смене инструмента при приближении величин дефектов к их максимально допустимым значениям.

В работах [2, 10] применялись двух-, трехслойные пакеты композит-металл, с достаточно большой толщиной слоев (более 5 мм), причем поли-

мер располагался либо между металлическими пластинами, либо сверху. При данной схеме армирования слои металла выполняют роли технологических подкладок, рекомендованных к использованию в работе [4] и минимизирующих расслоение.

Сверление отверстий в лонжероне ЛНВ сопряжено со специфическими трудностями. Слои титана и стеклопластика имеют малую толщину — 0,1 и 0,2 мм соответственно. Поэтому в процессе резания одновременно участвуют два различных материала, требования к обработке которых взаимно исключаются.

Операции обработки отверстий в композитах выполняют на заключительных этапах технологического цикла изделия — при подготовке к сборке и при сборке. Перечисленные трудности обеспечения качества отверстий в слоистых полимерных композитах, в частности необходимость занижения режимов обработки и использование большого числа переходов с целью минимизации дефектов, определенная вероятность брака дорогостоящих деталей, повышенный износ инструмента, обуславливают значительное удорожание технологии обработки и повышение себестоимости готовой продукции, что влечет за собой снижение конкурентоспособности на мировом рынке.

Анализ работ, посвященных обработке армированных металлом композитов, показал, что процессы сверления комбинированных многослойных стеклопластик-титановых композиций, практически не изучены и нет достаточных исследований, позволяющих определить основные закономерности сверления глубоких отверстий в слоистых композит-металлических структурах, аналогичных применяемым в изготовлении лонжерона ЛНВ вертолета Ми-28.

Экспериментальные исследования стружкообразования и качества обработанных отверстий

В экспериментах использовались сверла $\varnothing 15$ мм из быстрорежущей стали Р6М5 с различной заточкой угла при вершине 2φ : стандартное спиральное с $2\varphi = 118^\circ$, сверло с двойной заточкой (СДЗ) тип 1 с $2\varphi = 140^\circ$, $2\varphi_1 = 90^\circ$ и СДЗ тип 2 с $2\varphi = 70^\circ$, $2\varphi_1 = 35^\circ$.

На рис. 2 представлены снимки стружкообразования при различных геометриях инструмента. Обработка велась на проход без использования смазочно-охлаждающей жидкости и цикла ввода/вывода инструмента из зоны резания.

Наблюдения показывают, что в стружечных канавках стандартного сверла располагаются плот-

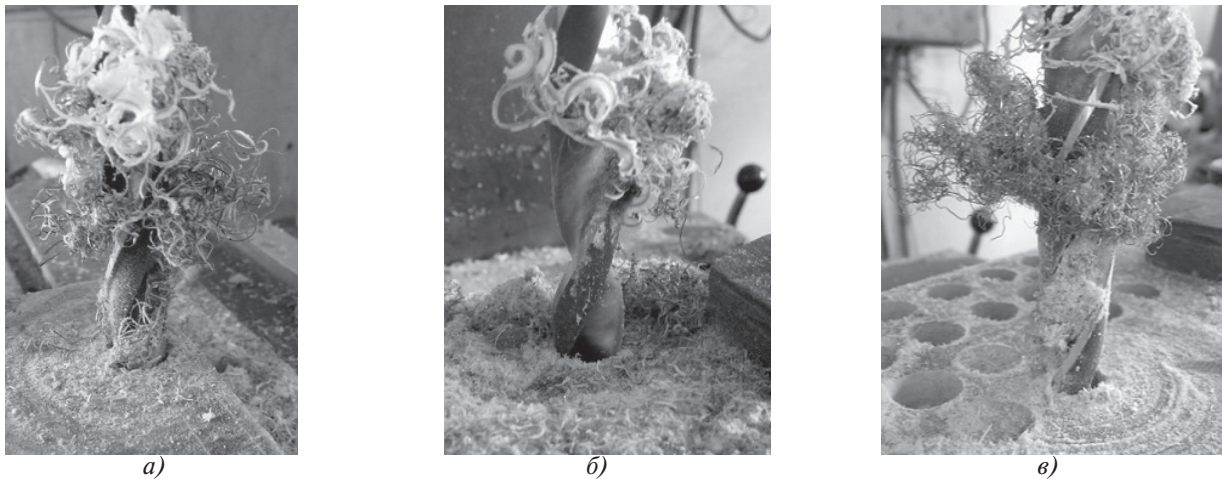


Рис. 2. Характер образования стружки при сверлении: *a* – стандартным сверлом; *б* – СДЗ тип 1; *в* – СДЗ тип 2 ($V=7,5$ м/мин, $S=0,2$ мм/об)

ные пакеты стружки, тогда как у сверла с двойной заточкой типа 1 пакетирование практически отсутствует. СДЗ типа 2 показало промежуточный результат: пакетирование наблюдается на определенных режимах обработки.

Двойная заточка позволяет увести стружечный слой от обработанной поверхности и направить по дну стружечной канавки, увеличив вектор скорости вдоль оси сверла. Кроме того, в точке В (пересечении режущих кромок АВ и ВС) происходит «переламывание» стружки, что облегчает ее транспортировку по стружечным канавкам и предотвращает образование плотных пакетов (рис. 3). Изменяя направление пакета стружки вдоль оси сверла, мы предотвращаем его воздействие на обработанную поверхность отверстия.

Величины расслоений Δ при различных видах сверл и режимов обработки, измеренные инстру-

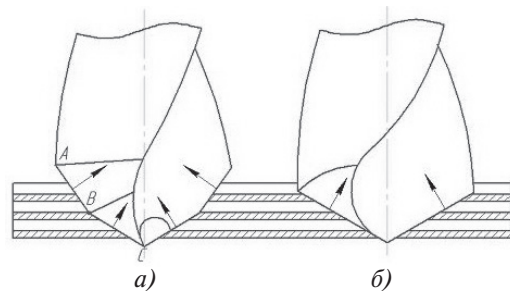


Рис. 3. Схема движения стружки: *a* – СДЗ тип 1; *б* – стандартное сверло

ментальным микроскопом как разность максимального поврежденного радиуса и номинального радиуса отверстия, приведены в таблице .

Шероховатость поверхности измерена контактным способом профилометром Taylor Hobson. Профиль микронеровностей обработанной поверхности показан на рис. 4.

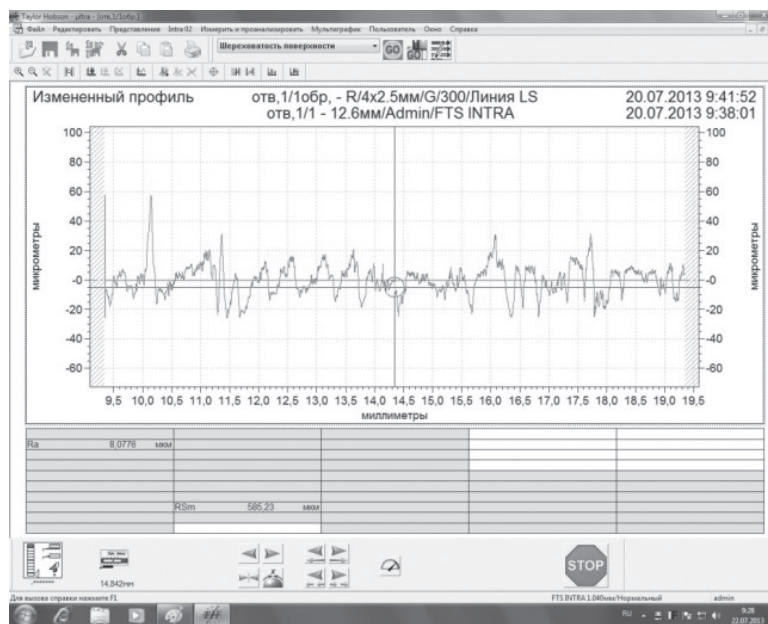


Рис. 4. Пример скриншота с экрана монитора устройства для измерения параметров профиля микронеровностей на обработанной поверхности стандартным сверлом ($V = 7,5$ м/мин, $S = 0,2$ мм/об)

Величина расслоений на входе и выходе из отверстий

Режимы обработки		Расслоения, мм					
V , м/мин	S , мм/об	Стандартное сверло		СДЗ тип 1		СДЗ тип 2	
		Вход	Выход	Вход	Выход	Вход	Выход
7,5	0,2	1,05	0,7	0,5	0,5	0,6	0,7
		1,0	0,9	0,4	0,4	0,7	0,55
		1,1	0,8	0,3	0,5	0,65	0,7
7,5	0,6	1,2	0,9	0,6	0,6	0,75	0,5
		1,4	0,9	1,0	0,9	0,85	0,35
		1,6	1,0	1,2	0,8	0,7	0,8
7,5	0,8	1,25	1,4	0,8	1,0	0,95	0,5
		1,6	1,3	1,4	1,1	1,0	0,5
		1,75	1,4	1,3	0,6	0,9	0,7
12	0,2	0,8	0,7	0,35	0,6	0,7	0,6
		0,8	0,8	0,6	0,4	0,8	0,6
		0,8	0,7	0,5	0,5	0,8	0,8
12	0,6	1,3	0,8	0,7	0,8	1,0	0,6
		1,0	0,6	1,0	0,7	1,0	0,4
		1,2	0,9	1,1	0,4	0,95	0,55
12	0,8	1,6	1,2	1,0	1,0	1,1	0,5
		1,6	1,0	1,4	1,1	1,05	0,6
		1,9	1,2	1,3	1,2	1,0	0,7
19	0,2	1,0	0,8	0,55	0,5	0,5	0,8
		0,8	0,7	0,35	0,4	0,4	0,4
		0,9	0,6	0,45	0,5	0,7	0,6
19	0,6	1,25	0,6	0,8	0,8	0,8	0,9
		1,3	0,7	1,2	1,0	0,95	0,65
		1,4	0,85	1,0	0,75	1,2	0,7
19	0,8	1,6	1,4	0,8	1,0	1,05	0,2
		1,5	1,0	1,1	1,0	1,2	0,6
		1,45	1,1	1,3	1,1	1,2	0,8

Анализ экспериментальных данных показал зависимость качества отверстий от характера стружкообразования. У СДЗ тип 1 пакетирование стружки практически отсутствует, что обеспечивает снижение величины расслоений до 60% в сравнении со стандартной геометрией и до 40% в сравнении с заточкой типа 2. Из таблицы можем видеть возрастание величины расслоений с возрастанием подачи, что подтверждено в работах [7–10]. Оптимальные режимы обработки армированного стеклопластика $V = 7,5 \div 12$ м/мин, $S = 0,2$ мм/об. Увеличение скорости резания до 19 м/мин вызывает образование прижогов на обрабатываемой поверхности.

Для всех типов сверл значение шероховатости, измеренной в направлении движения сверла, ниже,

чем в обратном направлении. Данный факт говорит о «проминании» слоев титановой фольги под действием осевой силы. Построенный доверительный интервал разброса шероховатости после серии опытов на одних и тех же режимах (рис. 5) меньше у СДЗ типа 1, что говорит о получении более стабильных показателей качества.

Экспериментальное исследование виброактивности процесса сверления

Для контроля крутящего момента было спроектировано и изготовлено устройство регистрации и записи, принципиальная схема которого представлена на рис. 6, аппаратная часть — на рис. 7.

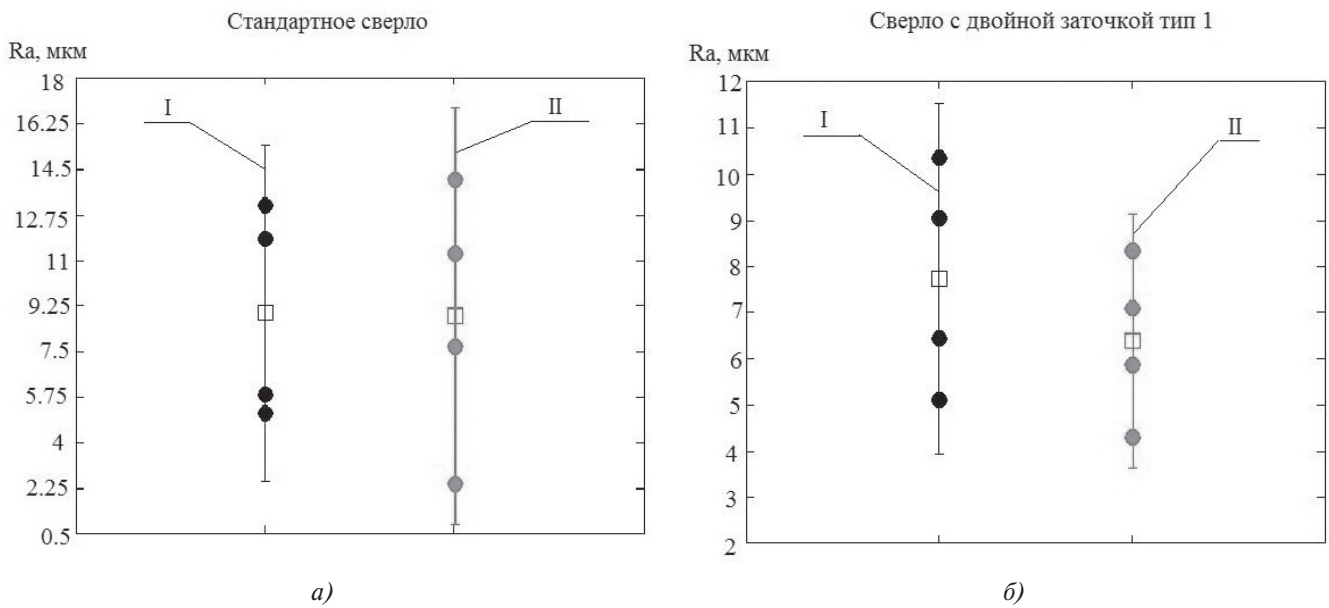


Рис. 5. Доверительный интервал разброса шероховатости в зависимости от геометрии режущей части сверла ($V=7,5$ м/мин, $S=0,65$ мм/об): I — доверительный интервал шероховатости, измеренной в направлении обратном движению сверла (против подачи); II — доверительный интервал шероховатости, измеренной в направлении движения сверла (по подаче); □ — измеренная шероховатость, мкм; • — середина доверительного интервала



Рис. 6. Блок-схема устройства регистрации и записи крутящего момента

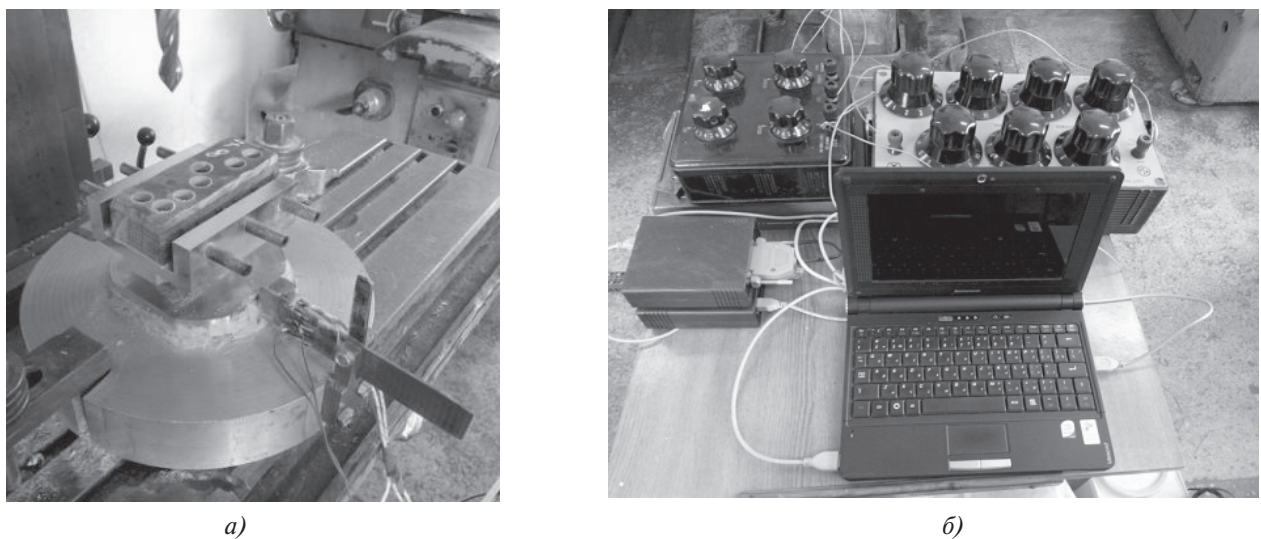


Рис. 7. Устройство регистрации крутящего момента (а), аппаратная часть записи (б)

Устройство работает следующим образом. После проведения калибровки прибора образец закрепляется в ложементе, соединенном с плитой основа-

ния через подшипник качения. После начала сверления под действием крутящего момента ложемент с образцом начинают колебаться вокруг вертикаль-

ной оси и упруго деформировать закрепленную в основании балку с расположенными на ней тензометрическими датчиками, преобразующими упругие деформации балки в электрический сигнал. Сигнал через предварительный усилитель ZET411 поступает на аналогово-цифровой преобразователь ZET210 и выводится на экран ЭВМ в виде цифровой и графической информации.

Спектральный анализ колебаний крутящего момента выполнен средствами программного модуля *Welch spectral estimator* с уровнем доверительной вероятности 0.95 в среде MATLAB. Расположение пиков на оси частот соответствовало нескольким первым гармоникам возбуждающего сигнала, частота которого была равна частоте вращения шпинделя, а мощность пиков характеризовала интенсивность колебаний технологической системы на каждой из частот спектра. Фильтрация данных проведена с помощью полиномиального сглаживающего фильтра Савицкого—Голея, заданного функцией *sgolayfilt*. Данный фильтр осуществляет полиномиальную аппроксимацию отдельных кадров входного сигнала по критерию минимума квадратичной ошибки, что применяется для «сглаживания» зашумленных сигналов с широким спектром.

После получения двух спектральных линий производится раскрытие структуры *hpsd*, в которой содержатся значения частоты и два столбца интенсивностей спектральных линий.

Каждый столбец интенсивностей вместе со столбцом частот рассматривается как функция, заданная таблично. Чтобы определить расположение пиков на частотной оси, производится последовательный просмотр значений интенсивности вибраций, и при нахождении экстремальной точки она заносится как пик. Для более точного определения резонансной частоты каждого пика его вершина аппроксимируется многочленом второго порядка, и для него вычисляются положение экстремума и само экстремальное значение.

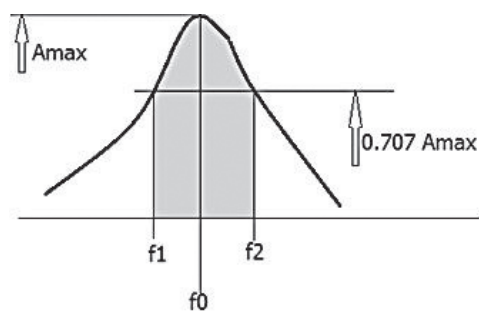


Рис. 8. Определение интегральной мощности пика

Когда найдены все пики, определяются их границы на уровне 0.707 для последующего вычисления полосы пропускания, добротности Q и интегральной мощности пика внутри этих границ (рис. 8).

Затемненная область под графиком колебаний представляет собой интегральную мощность пика. Добротность Q может быть вычислена по формуле

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f}, \quad (1)$$

где f_0 — резонансная частота; $\Delta f = f_1 - f_2$ — ширина полосы.

С помощью отслеживания амплитуды и частоты колебаний крутящего момента (рис. 9) осуществлялся поиск оптимальных режимов обработки и конструктивно-геометрических параметров инструмента.

Результаты вибрационного мониторинга показали, что амплитуда колебаний у СДЗ типа 1 в 1,5–2 раза ниже в сравнении с типом 2 и стандартным, что говорит о более стабильном процессе резания. Данный факт полностью подтверждается значительным снижением пакетирования и величины расслоений.

Тепловые явления при обработке ПКМ

Использование полимерных композитов в конструкциях современной авиационной техники ог-

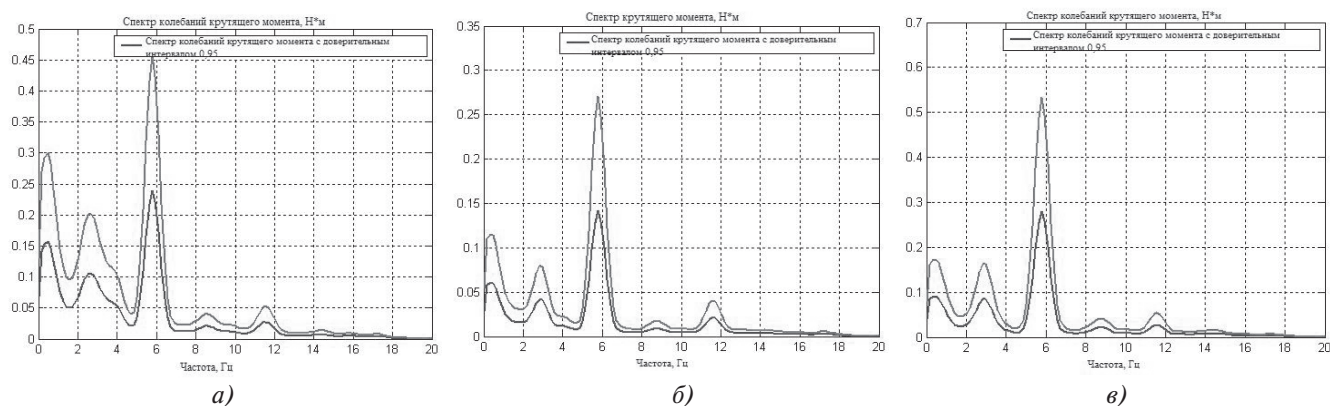


Рис. 9. Спектральный анализ колебаний крутящего момента: а — стандартное сверло; б — СДЗ тип 1; в — СДЗ тип 2

раничивается недостаточной изученностью совместного сверления комбинированных пакетов композит—металл. Многочисленные публикации по рассматриваемой проблеме содержат весьма противоречивую информацию о требованиях к режимам резания, стратегиям, подходам к формированию технологических переходов и геометрическим параметрам режущего инструмента. В отличие от металлов, когда основным источником тепла и нагрева до 1000 °С [12] при резании являются пластические деформации, при обработке композитов, ввиду хрупкости матрицы и наполнителя, пластические деформации очень малы, и теплообразование происходит, в основном, за счет трения поверхностей инструмента и композита. Повышение температуры ПКМ в зоне резания до значений температуры стеклования и выше вызывает оплавление полимерной матрицы и образование прижогов на обработанных поверхностях [10]. Термические повреждения снижают межслойную прочность и прочность по границе раздела волокно—эпоксидная смола, что, в свою очередь, ведет к образованию расслоений, сколов и разлохмачиваний.

Выделяющееся в зоне резания тепло распределяется между инструментом, стружкой и обрабатываемой деталью. Стеклопластики имеют в десятки и сотни раз меньшую теплопроводность по сравнению с металлами, что не может не сказаться на соотношении теплового баланса. Основная доля температуры, порядка 70—90% [4, 12], переходит в режущий инструмент и может быть вычислена по формуле

$$\vartheta = \frac{\lambda_c}{(\lambda_c + \lambda_{\text{п}})}, \quad (2)$$

где $\lambda_c, \lambda_{\text{п}}$ — коэффициенты теплопроводности стали и полимера соответственно.

Контроль температуры в зоне резания выполнен бесконтактным способом с использованием пирометра MS-6530. Эти результаты позволили получить оценки мощности источника тепла при сверлении.

Моделирование температурных полей

Моделирование тепловых процессов выполнено методом конечных элементов с помощью модуля теплообмена программного комплекса Comsol Multiphysics. Средства подготовки данных пакета Comsol позволяют описать поставленную задачу решением дифференциального уравнения теплопроводности с граничными условиями, соответствующими входящему потоку тепла q_0 с поверхности резания, прямому теплообмену между поверхностями отверстия и инструмента, а также тепло-

вому инфракрасному излучению с обрабатываемой поверхностью:

$$\begin{aligned} \delta_{\text{ts}} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(k \nabla T) &= Q; \\ n \cdot (k \nabla T) &= q_0 + h_{\text{trans}}(T_{\text{ext}} - T) + \epsilon \sigma (T_{\text{ambtr}}^4 - T^4), \end{aligned} \quad (3)$$

где T — температура внутри и на поверхности тела, К; δ_{ts} — масштабный коэффициент; ρ — плотность, кг/м³; c_p — удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); k — теплопроводность, Вт/(м·К); Q — интенсивность объемных тепловых источников, Вт/м³; h_{trans} — конвективный коэффициент теплопереноса от поверхности отверстия в воздух, Вт/(м³·К); T_{ext} — температура окружающей среды, в которую тепло передается по механизму теплопроводности; ϵ — излучательная способность поверхности; σ — постоянная, соответствующая излучению черного тела, Вт/(м³·К⁴); T_{ambtr} — температура среды, в которую излучается тепло, К.

Так как размеры источника теплообразования — режущей кромки пренебрежимо малы по сравнению с размерами тела, то будем полагать, что мы имеем дело с точечным источником тепла. Моделирование велось в физическом разделе Heat Transfer подраздела Conduction.

На первом этапе была создана двумерная модель пакета усиления (рис. 10,а) и конечно-элементная сетка (рис. 10,б).

Для входящих в пакет усиления стеклопластика и титана заданы толщины каждого слоя, физические и теплофизические свойства: плотность, модуль упругости, теплопроводность, теплоемкость, относительная диэлектрическая проницаемость. Для титана также были заданы удельная электропроводность и коэффициент Пуассона. Скорость движения точечного источника тепла определена через значение подачи инструмента.

Граничные условия заданы программным кодом, описывающим движение источника тепла вдоль поверхности отверстия параллельно его оси:

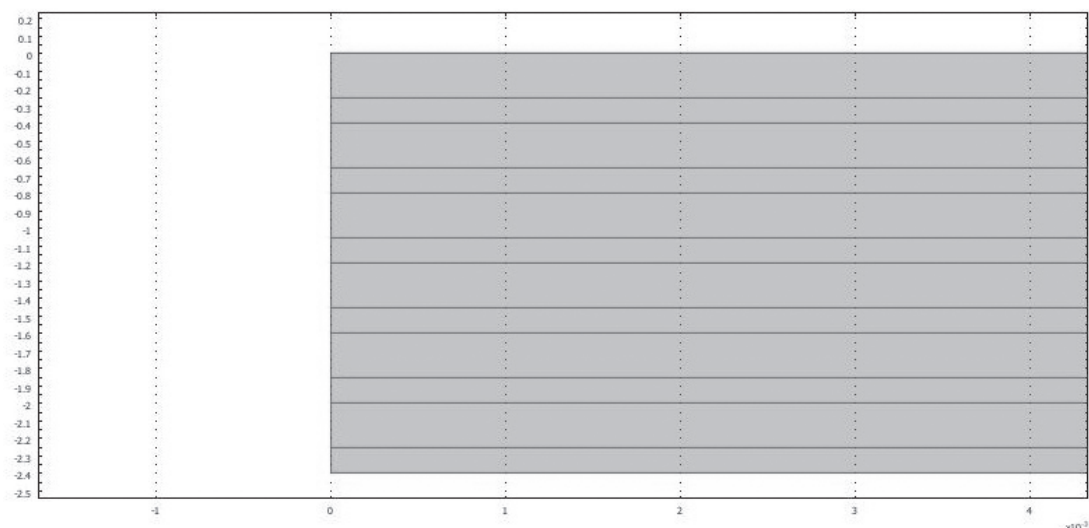
$$\text{int} = \text{intensity}(\text{where}) * \text{delta}(y - \text{ypath}); \quad (4)$$

$$\text{intensity}(x) = 6e5 + \text{flc}1 \text{hs}(x - 0.25e-3, 0.05e-3) * 9e5; \quad (5)$$

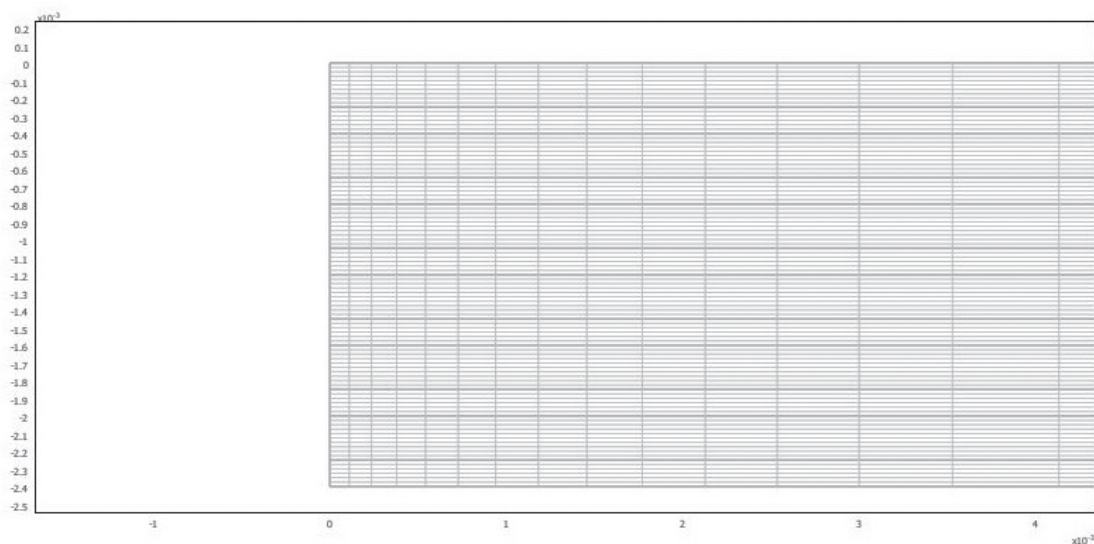
$$\text{delta}(x) =$$

$$= \cos(x * \text{pi} / (2 * 0.025e-3)) * (\text{abs}(x) \leq 0.025e-3). \quad (6)$$

Вблизи источника тепла размеры ячеек конечно-элементной сетки уменьшаются для увеличения точности расчетов. Результаты нестационарного



а)



б)

Рис. 10. Двумерная модель пакета усиления (а), конечно-элементная сетка (б)

анализа распространения температуры и тепловых потоков в комбинированном пакете в разные промежутки времени представлены на рис. 11, где увеличение яркости соответствует росту температуры, а линии показывают распространение потоков тепла. Как видно на рис. 11,2, локальное затемнение у поверхности отверстия после прохождения режущей кромки сверла обусловлено повышенной теплопроводностью титана по сравнению со стеклопластиком и, следовательно, более интенсивным отводом тепла из зоны резания.

Распространение тепловых потоков в течение всего процесса резания пакета усиления представлено на рис. 12. На рисунке видны шесть максимумов температуры, возникающих при переходе процесса резания со слоя композита на слой более теплопроводного титана.

Выводы

Для исключения дефектов сверления слоистых композитов металл—стеклопластик были исследованы три типа сверл, различающихся конструктивно-геометрическими параметрами режущей части.

Сверло с двойной заточкой типа 1 показало лучшие результаты с точки зрения виброактивности процесса сверления — амплитуда колебаний крутящего момента ниже в сравнении с заточкой типа 2 и стандартным сверлом на 40—50%. В связи с этим процесс резания более стабилен, происходит качественное улучшение стружкообразования — пакетирование практически отсутствует. Улучшенный отвод стружки позволяет снизить величину расслоений на 60% в сравнении со стандартным сверлом и на 40% в сравнении с заточкой типа 2. Применение модифицированной геометрии режу-

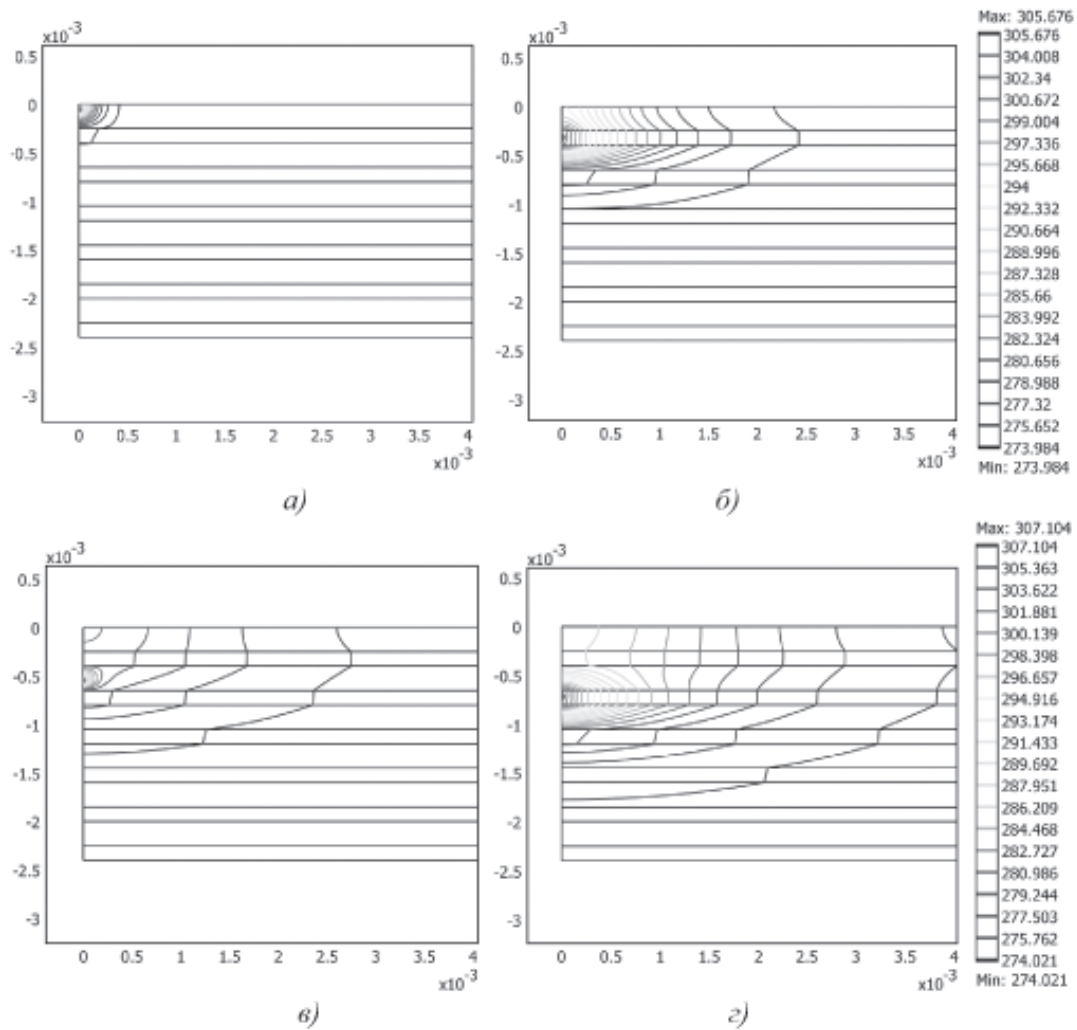


Рис. 11. Изменение теплового поля при сверлении пакета титан—стеклопластик: *а* — промежуток времени 0—1 с; *б* — промежуток времени 1—2 с; *в* — промежуток времени 2—2,5 с; *г* — промежуток времени 2,5—3 с

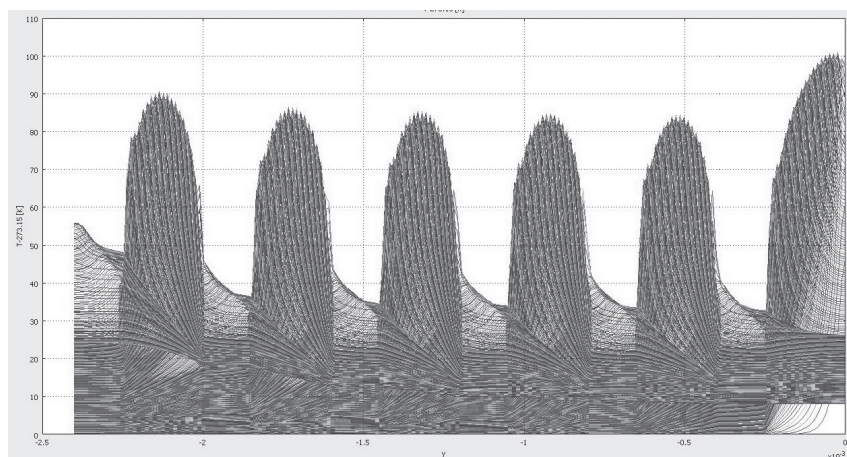


Рис. 12. Распространение температурных потоков

щей части инструмента позволяет отказаться от цикла глубокого сверления без потери качества, что позволяет добиться уменьшения машинного времени предварительной обработки посадочных отверстий в комле лонжерона с 6 до 1,5 мин.

Моделирование тепловых полей выявило прерывистое изменение температуры в процессе резания: при переходе режущей кромки со слоя композита на слой металла происходит ее скачкообразное увеличение, а существенное различие теплофизи-

ческих характеристик слоев титана и стеклопластика затрудняет отвод тепла из зоны резания.

В связи с этим отвод перегретой стружки из обрабатываемого отверстия является одним из условий облегчения теплового режима процесса, снижения вероятности прижогов и расслоений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 14-08-31612 мол_а, 15-08-00849).

Библиографический список

1. Буланов И.М., Воробей В.В. *Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов*: Учеб. для вузов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. — 516 с.
2. Официальный сайт компании Boeing. URL: <http://www.boeing.com/boeing/commercial/787family/background.html> (дата обращения: 5.04.2015).
3. Рубцов С.М. Применение современных полимерных композиционных материалов в элементах и узлах газотурбинных авиационных двигателей: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. — Пермь: ПГТУ, 2009. — 17 с.
4. Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов. — Л.: Машиностроение, 1987. — 175 с.
5. Ghasemi F.A. Effects of Drilling Parameters on Delamination of Glass-Epoxy Composites / F.A. Ghasemi, A. Huvadi, G. Payganeh, N.B.M. Arab // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 2011, no. 5(12), pp. 1433-1440.
6. Okutan E. A Study on the Derivation of Parametric Cutting Force Equations in Drilling of GFRP Composites / E. Okutan, S. Karabay, T. S'nmazcelik, E. Avcu // Journal of Mechanical Engineering. 2013, no. 59, pp. 97-105.
7. Murugesh M.C. Influence of filler material on Glass fiber epoxy composite laminates during drilling / M.C. Murugesh, K.Sadashivappa // International Journal of Advances in Engineering & Technology. 2012. Vol. 3, iss. 1, pp. 233-239.
8. Durao L.M. Comparative analysis of drills for composite laminates / L. M. Durao, D.J. Goncalves, J. M. Tavares, V. H. de Albuquerque, A.T. Marques // Journal of Composite Materials. 2011, no. 46(14), pp. 1649-1659.
9. Gaitonde V.N. A study aimed at minimizing delamination during drilling of CFRP composites / V.N. Gaitonde, S.R. Karnik, J.C. Rubio, A.E. Correia, A.M. Abrao, J.P. Davim // Journal of Composite Materials. 2011, no. 45(22), pp. 2359-2368.
10. Wang B. Mechanism of damage generation during drilling of carbon/epoxy composites and titanium alloy stacks / B. Wang, H. Gao, B. Cao, Y. Zhuang, Z. Zhao // Engineering Manufacture. 2014. Vol. 228, iss. 7, pp. 698-706.
11. Isbilir O. Delamination and wear in drilling of carbon-fiber reinforced plastic composites using multilayer TiAlN/TiN PVD-coated tungsten carbide tools / O. Isbilir, E. Ghassemieh // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2012, no. 31(10), pp. 717-727.
12. Иванов Ю.Н., Чапышев А.П., Каверзин Е.Я. Экспериментальное влияние теплового расширения обрабатываемых материалов при сухом сверлении отверстий в пакетах структуры «полимерный композиционный материал — титановый сплав» // Вестник ИРГУ. 2013. №10 (81). С. 36-42.

TITANIUM-REINFORCED GLASS FIBER PLASTIC MAIN ROTOR BLADE BEAM DRILLING PROCESS OPTIMIZATION

Chigrinets E.G.

*Rostvertol Helicopters,
Novatorov str., 5, Rostov-on-Don, 344038, Russia
e-mail: egchigrinets@gmail.com*

Abstract

High-tension polymeric composite materials (HTPCM) are widely used in aviation industry due to their high strength-density ratio and modulus of rigidity; good shock-absorbing capacity; corrosion resistance and low thermal-expansion coefficient. HTPCM tooling, however, is associated with a number of difficulties. Its low thermal conductivity affects the heat balance: the main part of heat, about 90%, is concentrated in the cutting area and at the drill tool, whereas up to 70% of heat leaves the cutting area with chip scrap while tooling metals. This high temperature causes partial melting of

polymeric matrix, tempering of tools and processed surface. Composites anisotropy of properties leads to differences in chip formation along and perpendicular to the reinforcing fibers and their high hardness causes increased wear of the drilling tool. Delaminations, caused by axial force and torque of the cutting process, are formed in the places of drilling tool entering and exit.

The purpose of this work is to study the impact of the structural and geometric parameters of drilling tools on the quality of the processed holes, productivity, dynamics and thermal physics of the high strength

polymeric composite material machining - titanium foil reinforced glass fiber plastics.

Extra loaded polymeric composite constructions implement titanium foil reinforcing packs, allocated between the layers of reinforcing glass- or carbon ribbon. To provide required accuracy in size of apertures' macro- and micro-geometry, elimination of tempering and delaminations of the material one has to use sharp-ground tools and carry out processing in stages. This work studied drilling process of fiber-glass laminate at various schemes of high-speed steel drill tools sharpening.

The work presents the results of processing rates optimization for the studied tools geometries; dependence of unevenness tallness parameters; the character and value of delamination in the places of drilling tool entering and exit, depending on the tools type and processing rates, as well as qualitative image of chip formation. Using the developed computerized real-time measuring system for power characteristics of drilling process, we found blunting criterion and efficient life of the cutting tools under study. The pyrometric registration data on average temperature in cutting area allowed perform finite elements modeling of thermal processes occurring while multilayer plastic, reveal the sources and directions of the thermal flows, and, finally, develop recommendations for technology improvements of apertures processing in glass fiber beams of main and steering rotors.

Keywords: glass fiber reinforced plastic drilling, delaminations, thermal flows modeling, torque.

References

1. Bulanov I.M., Vorobei V.V. *Tekhnologiya raketnykh i aerokosmicheskikh konstruksii iz kompozitsionnykh materialov* (Rocket and aerospace composite structures technology), Moscow, MGTU im. N.E. Baumana, 1998, 516 p.
2. Boeing, <http://www.boeing.com/commercial/787/>
3. Rubtsov S.M. *Primenenie sovremennykh polimernykh kompozitsionnykh materialov v elementakh i uzlakh gazoturbinykh aviatsionnykh dvigatelei* (Use of modern polymeric composite materials for parts and structural components of gas-turbine aviation engines), Doctor's thesis, Perm', PGTU, 2009, 17 p.
4. Stepanov A.A. *Obrabotka rezaniem vysokoprochnykh kompozitsionnykh polimernykh materialov* (Machining of high-strength composite polymeric materials), Leningrad, Mashinostroenie, 1987, 175 p.
5. 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, no. 5(12), pp. 1433-1440.
6. Okutan E., Karabay S., S'nmazzelik T., Avcu E. Study on the Derivation of Parametric Cutting Force Equations in Drilling of GFRP Composites. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, no. 59, pp. 97-105.
7. Murugesh M.C., Sadashivappa K. Influence of filler material on Glass fiber epoxy composite laminates during drilling. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 2012, vol. 3, issue 1, pp. 233-239.
8. Durao L.M., Goncalves D.J., Tavares J.M., Albuquerque V.H., Marques A.T. Comparative analysis of drills for composite laminates. *Journal of Composite Materials*, 2011, no. 46(14), pp. 1649-1659.
9. Gaitonde V.N., Karnik S.R., Rubio J.C., Correia A.E., Abrao A.M., Davim J.P. A study aimed at minimizing delamination during drilling of CFRP composites. *Journal of Composite Materials*, 2011, no. 45(22), pp. 2359-2368.
10. Wang B., Gao H., Cao B., Zhuang Y., Zhao Z. Mechanism of damage generation during drilling of carbon/epoxy composites and titanium alloy stacks. *Engineering Manufacture*, 2014, vol. 228, issue 7, pp. 698-706.
11. 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, no. 31(10), pp. 717-727.
12. Ivanov Yu.N., Chapyshev A.P., Kaverzin E.Ya. *Vestnik IrGU*, 2013, no. 10(81), pp. 36-42.