Конкурсная работа на соискание премии «Авиастроитель года» по итогам 2017 года

Разработка устройства регистрации виброактивности и реализация импортонезависимой методики исследования динамики процесса резания авиационных полимеркомпозитных материалов

ЧИГРИНЕЦ Е.Г., канд. техн. наук, начальник группы
Шевченко Н.О., ведущий специалист

Ростовский вертолетный производственный комплекс Публичное акционерное общество «Роствертол» имени Б.Н. Слюсаря

Степень технологического развития стран во многом определяется долей использования полимерных композиционных материалов (ПКМ) в наукоемких отраслях, таких как авиастроение, кораблестроение, ракетно-космическая промышленность, автомобилестроение, 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.

Производство новых летательных аппаратов (ЛА) требует постоянного совершенствования, разработки и внедрения новых материалов и технологических процессов, обеспечивающих постоянно растущие требования к качеству и эксплуатационной надежности. Ответом на эти требования стало расширяющееся в последние 20 лет применение полимерных композиционных материалов в авиационных конструкциях.

ПКМ представляют большой коммерческий и технологический интерес благодаря своим особым свойствам: высокие удельные прочность, жесткость и модуль упругости; хорошая демпфирующая способность и коррозионная стойкость; высокая усталостная прочность и низкий коэффициент теплового расширения. Отличные прочностные характеристики и низкая удельная плотность композитов, по сравнению с металлами, позволяет уменьшить массу готовой детали без потери жесткости и надежности. Кроме того, использование ПКМ позволяет получать изделия с заданными физико-механическими свойствами.

Одним из требований современного производства является максимальная производительность механообработки при требуемых показателях качества, что особо актуально в производстве высоконагруженных и особо ответственных авиационных конструкций, таких как лонжероны несущих и рулевых винтов вертолета Ми-28 и Ми-35. Для этого необходимо проводить достаточное количество испытаний, варьируя режимы обработки, конструктивно-геометрические параметры инструмента, стратегии обработки. Набор статистической информации трудоемкий процесс, требующий больших материальных затрат. Эти трудности обусловили проведение интенсивных исследований ведущими научными школами и промышленными корпорациями Италии, Франции, Германии, США и др., основной целью которых являлось получение количественных зависимостей влияния углов заточки инструмента, режимов обработки и т.д. на виброактивность (колебания крутящего момента резания), и, как следствие, стабильность процесса механической обработки. Данный метод используют такие корпорации как Локхид Мартин и Боинг, с применением различных динамометров и акселерометров производства Kistler (США). Данные приборы дорогостоящие, кроме того согласно Постановлению Правительства РФ от 4 августа 2015 года № 785 одним из основных направлений по импортозамещению является снижение доли зарубежных технологий на предприятиях оборонно-промышленного комплекса. Руководствуясь программой по импортозамещению, реализуемой в АО «Вертолеты России», авторами разработано и изготовлено устройство регистрации и записи виброактивности процесса резания достаточно простой конструкции с применением только российских комплектующих. Предложена и реализована на предприятии методика спектрального анализа колебаний силовых составляющих процесса резания. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования выполнены в рамках комплексной работы по совершенствованию технологии изготовления деталей авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов.

Экспериментальные исследования виброактивности процесса резания ПКМ

Постановка задач и описание образцов исследований

Боевой вертолет Ми-28Н производства ПАО «Роствертол» имеет ~1162 детали из композитов и резинотехнических изделий, из них ~175 наименований (~380 шт.) - стеклопластиковые (лопасти несущего винта (ЛНВ), рамы и дверные проемы, «фонарь» кабины летчика и др.) Стеклопластиковыми лопастями НВ оснащены также вертолеты Ми-24ПН и Ми-35М. С 2007г. на предприятии организовано производство из ПКМ лопастей рулевого винта для вертолетов Ми-2, Ми-8, Ми-24, Ми-26, Ми-28, Ми-35, а также начато освоение новых стеклопластиковых материалов ВПС-31 и КМКС с улучшенными жесткостными и прочностными характеристиками.

Возрастающие требования к эксплуатационным характеристикам и надежности авиационных конструкций обусловило вектор развитие авиастроения в сторону использования комбинированных материалов гетерогенной структуры – многослойных полимеров типа «композит-металл». 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.

На основании выше изложенного были поставлены следующие **задачи:**

1. Экспериментальное исследование виброактивности и стабилизация процесса сверления за счет снижения колебаний силовых составляющих процесса резания.
2. Выявление влияния конструктивно-геометрических параметров инструмента на качество и стабильность процесса сверления, определение оптимальных углов заточки и соответствующих им режимов обработки.

В экспериментах по исследованию колебаний крутящего момента резания – виброактивности, использовались вырезанные из комлевой части лонжерона лопасти несущего винта вертолета Ми-28 образцы размерами 120×50 мм. Толщина образцов соответствовала толщине стенке лонжерона и равнялась 35 мм. Схема армирования достаточно сложная и имеет слоистое строение. Основными элементами исследуемого полимерного композита являются стеклопластик ВПС-7 и титановая фольга ОТ4-0-0,1х220 (рис.1).

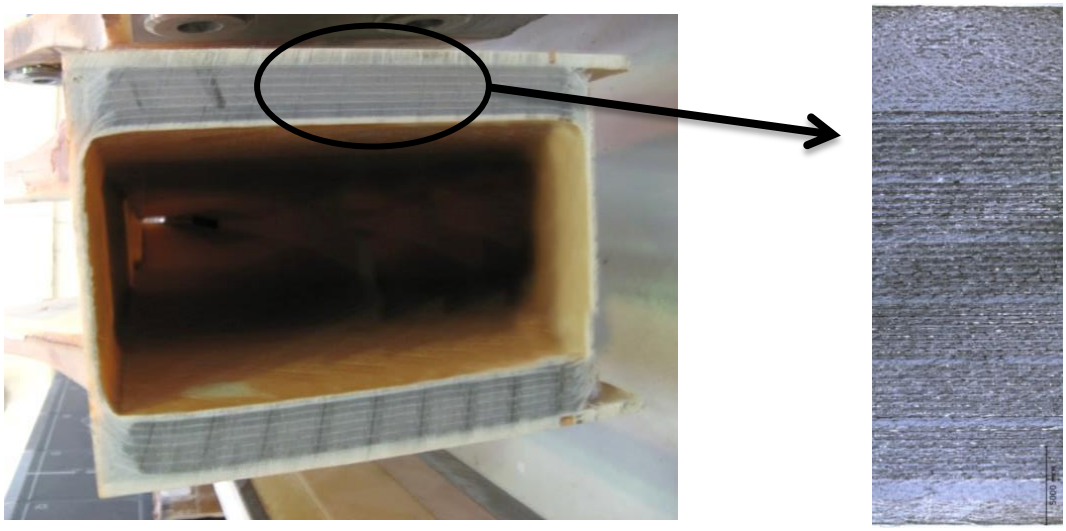


Рис. 1 Комлевая часть лонжерона лопасти несущего винта вертолета Ми-28

Принцип работы и калибровка прибора

С помощью спроектированного и изготовленного прибора регистрации и записи крутящего момента, принципиальная схема которого представлена на рис. 2 и общий вид на рис. 3, отслежена силовая составляющая процесса резания.

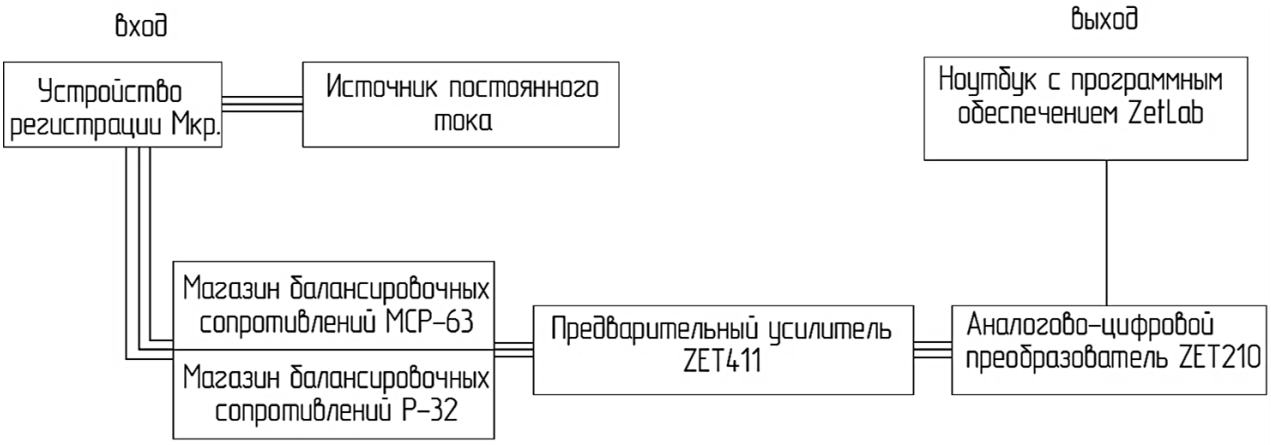
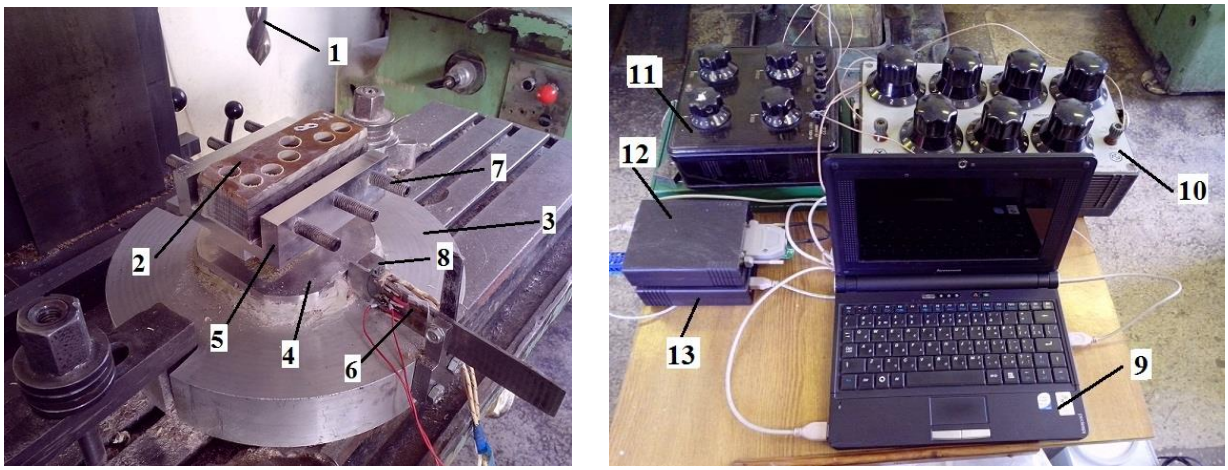


Рис. 2 Блок-схема устройства регистрации и записи крутящего момента



а) б)

1 – сверло; 2 – обрабатываемый образец; 3 – корпус прибора с запрессованным подшипником качения; 4 – вращающийся вокруг вертикальной оси стол; 5 – ложемент для крепления образца; 6 – планка с тензометрическими датчиками; 7 – зажимные элементы; 8 – упор, неподвижно закрепленный на столе 4; 9 – ЭВМ на базе ноутбука; 10 – магазин балансировочных сопротивлений МСР-63; 11 – магазин балансировочных сопротивлений Р-32; 12 – предварительный усилитель ZET411; 13 – аналогово-цифровой преобразователь ZET210

Рис. 3 Общий вид прибора регистрации и записи крутящего момента, а) устройство регистрации, б) аппаратная часть записи

Устройство регистрации и записи крутящего момента, представленное на рис. 3, имеет следующий принцип работы. Стол 4 соединен с корпусом 3 через шкив и подшипник качения и вращается вокруг вертикальной оси. На стол 4 установлен ложемент 5 с закрепленным в нем через подвижные упоры 7 обрабатываемым образцом 2. Во время контакта режущего инструмента 1 с образцом 2 возникает крутящий момент резания, вращающий стол 4 с ложементом 5 вокруг вертикальной оси. Неподвижно закрепленный на столе 4 упор 8 упруго деформирует пластину 6. Расположенные на пластине 6 тензометрические датчики преобразуют упругие деформации в электрический сигнал и выводят его на ЭВМ 9 через

предварительный усилитель 12 (ZET411) и аналогово-цифровой преобразователь 13 (ZET210) в виде графической и цифровой информации. Для минимизации помех и настройки прибора применяются магазины балансировочных сопротивлений позиций 10 (МСР-63) и 11 (Р-32). На ЭВМ установлено программное обеспечение с открытым исходным кодом, а усилитель ZET411 и АЦП ZET210 произведены в России ЗАО «Электронные технологии и метрологические системы». Тензометрические датчики и магазины балансировочных сопротивлений также российского производства.

Для соотнесения величины выводимого на ЭВМ электрического сигнала к величине крутящего момента резания выполнена калибровка прибора следующим образом.

В ложементе прибора закреплена балка длиной 0,35 м, которая использовалась как рычаг для создания крутящего момента (рис. 4). С помощью механического динамометра на рычаг воздействовали усилием от 0,5 кг до 2,5 кг с шагом 0,5 кг. Величины создаваемого крутящего момента и возникающее напряжение упруго деформированной балки заносились в таблицу 1.

Таблица 1

Крутящий момент и соответствующие ему напряжения

Крутящий момент, Нм	1,72	3,43	5,15	6,86	8,58
Напряжение, В	5,0	10,0	15,0	22,0	25,5

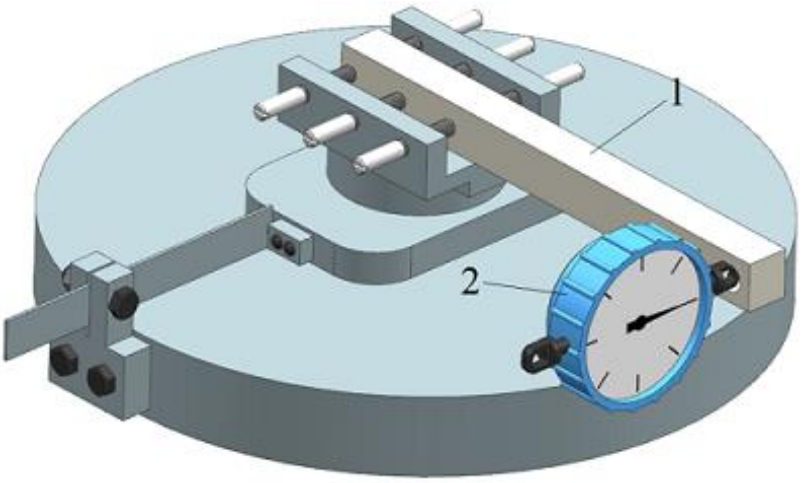


Рис. 4 Калибровка прибора регистрации и записи крутящего момента: 1 – рычаг, 2 – механический динамометр

Зависимость крутящего момента от деформации пластины описывается линейной функцией (1):

$$y(x) = ax + b, \tag{1}$$

где x – крутящий момент, Нм; y – напряжение, В; a – коэффициент тарировки; $b = const$ – свободный член (точка пересечение прямой с осью ординат).

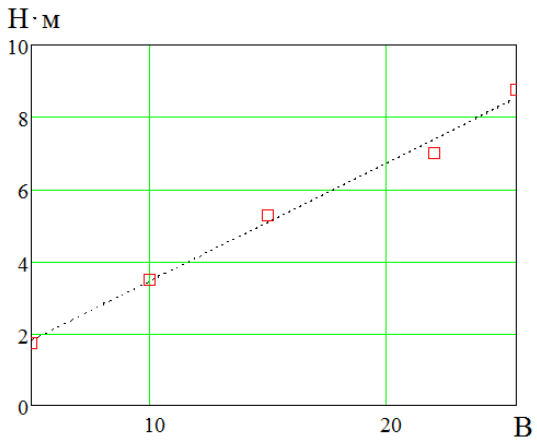
Для определения коэффициента тарировки проведем идентификацию однофакторной модели методом наименьших квадратов. Для этого составим матрицы x (2) и $Array$ (3).

$$x = \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ 15 \\ 22 \\ 25.5 \end{pmatrix} \tag{2}$$

$$Array = \begin{pmatrix} 1.74 & 1.75 & 1.76 \\ 3.19 & 3.5 & 3.51 \\ 5.24 & 5.25 & 5.26 \\ 6.99 & 7 & 7.01 \\ 8.74 & 8.75 & 8.76 \end{pmatrix} \tag{3}$$

Строки матрицы *Array* представляют собой результаты измерения функции отклика (крутящего момента) при фиксированном значении управляющего фактора x (напряжения). Выборочные средние для каждого значения управляющего фактора вычислены с помощью подпрограммы *Average* (4). Определив параметры линейной однофакторной регрессии, построили регрессионную модель, наилучшим образом описывающую экспериментальную зависимость (рис. 5).

$$Average = \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..rows(Array)-1 \\ \quad \left| \begin{array}{l} f_i \leftarrow 0 \\ \text{for } j \in 0..cols(Array)-1 \\ f_i \leftarrow f_i + Array_{i,\,j} \\ f_i \leftarrow \dfrac{f_i}{cols(Array)} \end{array} \right. \\ f \end{array} \right. \tag{4}$$



□ – экспериментальные значения, •••• – линия регрессии

Рис. 5 Зависимость крутящего момента от напряжения

Коэффициент тарировки определен как тангенс угла между линией регрессии и положительным направлением оси абсцисс и равен $a = 0{,}328$.

Методика спектрального анализа крутящего момента

После получения сигнала (реализации) крутящего момента в виде графической и цифровой информации выполнен спектральный с уровнем доверительной вероятности 0.. Использовалась функция *pwelch,* предназначенная для определения спектра мощности случайного сигнала методом Уэлча – методом усреднения модифицированных периодограмм. В основе функции *pwelch* лежит метод Бартлетта. Анализируемый сигнал делится на неперекрывающиеся сегменты, для каждого сегмента вычисляется периодограмма и затем эти периодограммы усредняются. Если корреляционная функция сигнала на длительности сигнала затухает до пренебрежимо малых значений, то периодограмма отдельных сегментов можно считать независимыми. В этом случае дисперсия периодограммы Бартлетта обратно пропорциональна числу используемых сегментов, однако с ростом числа сегментов при фиксированном общем числе отсчетов сигнала падает спектральное разрешение за счет того, что сегменты становятся короче. Внесенные Уэлчем в метод Бартлетта два усовершенствования – использование весовой функции и разбиение сигнала на перекрывающиеся фрагменты, позволяют ослабить растекание спектра и уменьшить смещение получаемой оценки спектра плотности мощности ценой незначительного ухудшения разрешающей способности, а также увеличить число сегментов и уменьшить дисперсию оценки.

После загрузки файла реализации производится его расщепление на столбец моментов времени и столбец уровня сигнала. Последний умножается на калибровочный коэффициент (весовая функция) для перевода показания прибора в значения момента. Далее производится отфильтровывание высокочастотной составляющей. Вычитанием из сигнала полного момента низкочастотной составляющей определяется сигнал высокочастотной составляющей, которая характеризует виброактивность. Низкочастотная составляющая характеризует в чистом виде момент резания. Чтобы исключить из рассмотрения холостой ход по графической диаграмме определяются моменты начала врезания и выхода сверла. После ввода этих данных спектральному анализу подвергается только часть реализации, соответствующая процессу резания.

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*. *Sgolayfilt* осуществляет полиномиальную аппроксимацию отдельных кадров входного сигнала по критерию минимума квадратичной ошибки, что применяется для «сглаживания» зашумленных сигналов с широким спектром. В данном случае сглаживающий фильтр Савицкого-Голея работает намного лучше обычных усредняющих нерекурсивных фильтров, которые имеют тенденцию вместе с шумом удалять значительную долю высокочастотных составляющих сигнала. *Sgolayfilt* лучше сохраняет высокочастотные компоненты сигналы, однако обеспечивают худшее подавление шума по сравнению с обычными нерекурсивными фильтрами.

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.

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. 6).

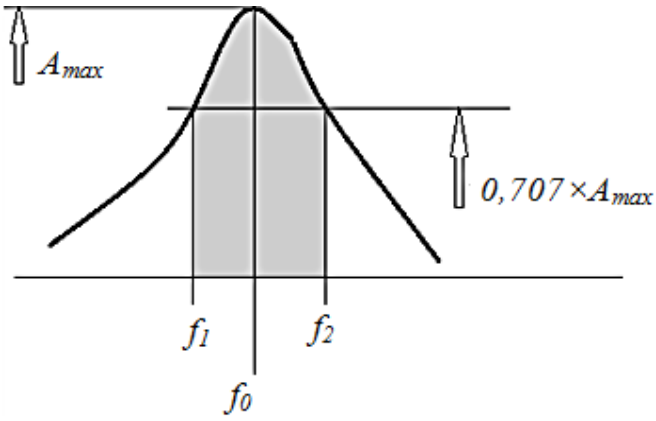


Рис. 6 Определение интегральной мощности пика

Затемненная область под графиком колебаний представляет собой интегральную мощность пика. Добротность Q может быть вычислена по формуле (5).

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f}, \tag{5}$$

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

Обработка полученных данных

На рис. 7 представлен пример первичного выходного сигнала крутящего момента резания. По рисунку отчетливо видны три этапа работы инструмента: I – врезание, II – процесс сверления, III – выход инструмента.

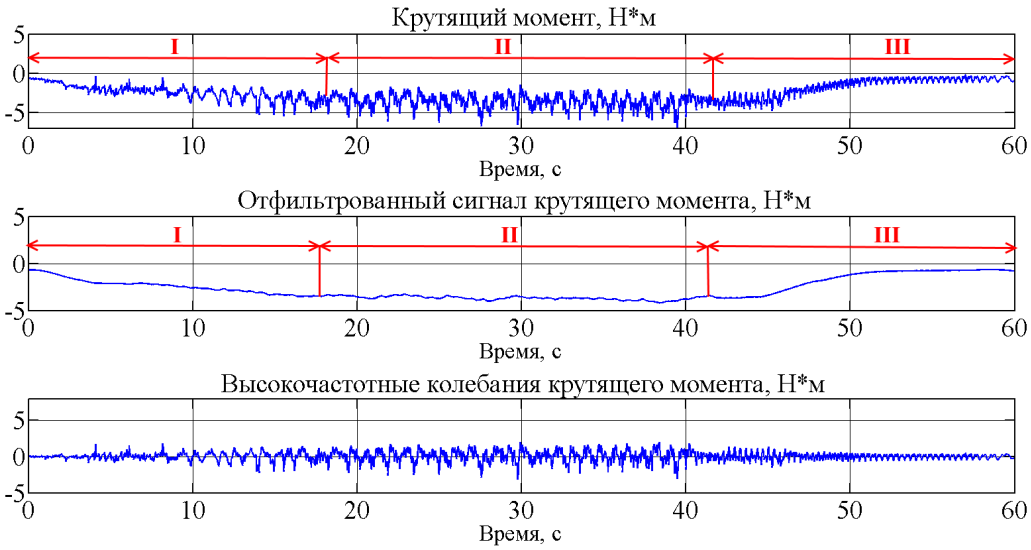


Рис. 7 Выходной сигнал крутящего момента спирального сверла:
$v = 7,5$ м/мин, $s = 0,2$ мм/об

Обработав сигналы с помощью фильтра Савицкового-Голея по методике, подробно описанной выше, получены спектральные линии колебаний крутящего момента для каждой геометрии инструмента в зависимости от режимов обработки с уровнем доверительной вероятности 0,95, где кривые I, II – верхний и нижний уровень соответственно (рис. 8).

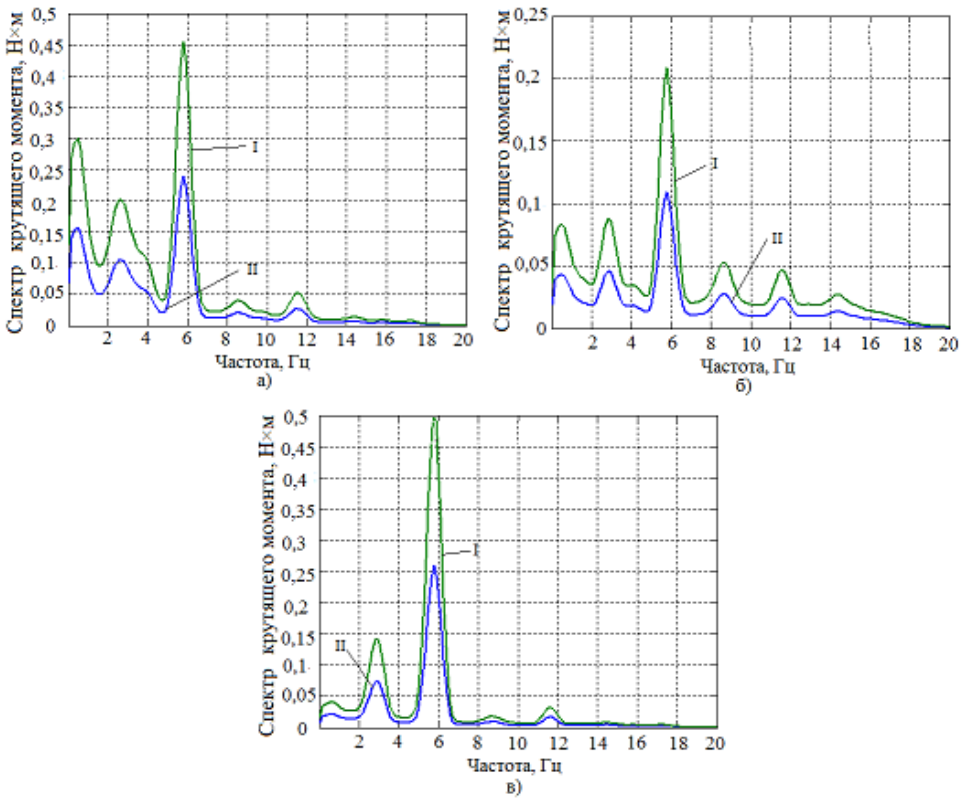


Рис. 8. Спектральный анализ колебаний крутящего момента а) сверло тип 1, б) сверло тип 2, в) сверло тип 3

Проанализировав результаты спектрального анализа крутящего момента сверления армированного стеклопластика, можно отметить, что применение сверл тип 2 и тип 3 позволяет снизить виброактивность процесса от 30 % до 200 % в зависимости от режимов обработки в сравнении со стандартным инструментом (тип 1). Сопоставив данные по виброактивности с соответствующими размерами расслоений, высотными параметрами шероховатости и пакетированием стружки, сделаем вывод о возможности получения отверстий более высокого качества в случаи меньших колебаний крутящего момента и более стабильном протекании процесса сверления.

Результаты применения разработанного устройства на предприятии ПАО «Роствертол»

В настоящее время перед производством остро стоит вопрос рационального использования режущего инструмента и сокращения издержек его использования. Это возможно заменой дорогостоящего импортного инструмента на отечественные аналоги, однако необходимо четко понимать возможности российского инструмента с точки зрения показателей точности, производительности и стойкости. Проведение испытаний стандартными методами математической статистики достаточно трудоемко, требуется большое количество испытуемого инструмента и заготовок. Но поскольку в качестве заготовок могут выступать такие дорогостоящие и особо ответственные изделия как полимеркомпозитные лонжероны несущих и рулевых винтов, брак которых недопустим, то сбор необходимых статистических данных может занять большое количество времени. Представленная методика спектрального анализа колебаний силовых составляющих процесса резания позволяет снизить трудоемкость определения оптимальных режимов обработки и геометрии режущего инструмента, обеспечивающих снижение силовой нагрузки на обработанные поверхности и получение стабильно высоких показателей качества.

По результатам вибрационного мониторинга определены конструктивно-геометрические параметры спиральных сверл для обработки армированных ПКМ (рис. 9), которые прошли

промышленные испытания на предприятии ПАО «Роствертол», получили положительное заключение и позволили завершить мероприятия по исключению из серийной технологии изготовления лопастей несущих и рулевых винтов вертолета Ми-28 импортных образцов режущего инструмента.

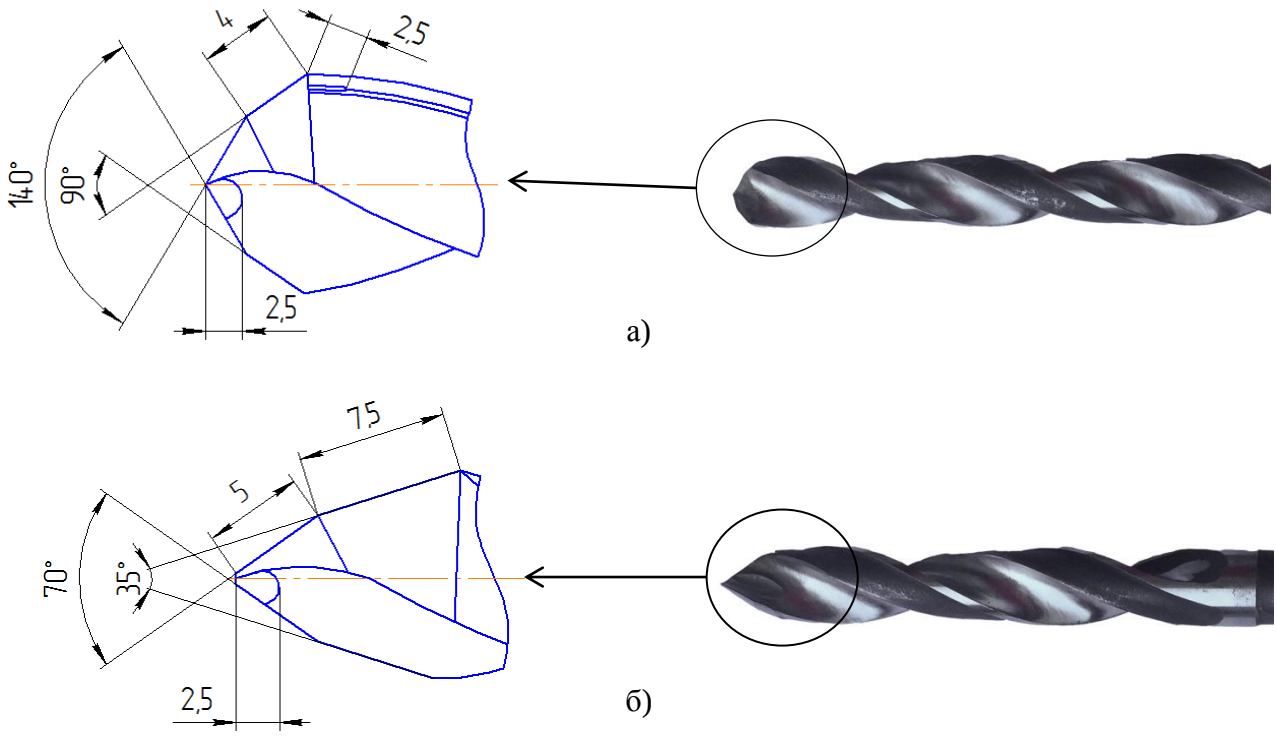


Рис. 9 Модифицированная заточка спиральных сверл, предназначенных для обработки пакетов «стеклопластик-титан»

Заключение

Разработанная методика и устройство регистрации и записи виброактивности процесса резания являются частью комплексной работы по исследованию и совершенствованию технологии изготовления деталей авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов. Ввиду значительного увеличения объемов поставок вертолетной техники как в рамках гособоронзаказа, так и инозаказчикам, перед производством остро стоял вопрос о повышении качества, надежности и снижения технологических издержек выпускаемой военной техники в условиях санкций политики импортозамещения, в особенности в рамках высокотехнологичного Лопастного производства ПАО «Роствертол». Анализ технической информации по данной проблематике ведущих мировых производителей авиационной техники и потребителей ПКМ таких как The Boeing Company, Lockheed Martin Corporation, Airbus S.A.S., Northrop Grumman Space Technology, Air Force Research Laboratory позволил обосновать не только прикладную значимость проекта, но и научную актуальность исследования, направленного на сокращение технологического отставания Российской Федерации.

Реализована методика поиска оптимальных углов заточки режущего инструмента через комплексные исследования виброактивности процесса резания с применением спроектированного и изготовленного устройства, имеющего полностью импортонезависимую аппаратную часть и программное обеспечение. Определена оптимальная геометрия режущего инструмента, обеспечивающего снижение величины расслоений в ПКМ и высотных параметров шероховатости, увеличение точности обработки и стойкости инструмента. Выявлена и

теоретически обоснована связь между конструктивно-геометрическими параметрами инструмента и значениями виброактивности.

Руководствуясь Системой управления правами на результаты интеллектуальной деятельности, реализованной в холдинге АО «Вертолеты России» и получившей сертификат соответствия стандартам Госкорпорации Ростех, техническим советом предприятия получена предварительная положительная оценка и направлена заявка в Роспатент.

Отдельные научные результаты, полученные в рамках данного проекта, использовались при выполнении плановых НИОКР Южного научного центра Российской академии наук (2015-2017 г.г.) и гранта Российского фонда фундаментальных исследований 15-08-00849А («Разработка численных и экспериментальных методов создания оптимальной структуры армированных стекло- и углепластиков авиационного применения»).

Разработанные методики и полученные результаты способствуют цифровой трансформации производства и могут быть использованы не только в рамках АО «Вертолеты России», но и всех предприятий отрасли ввиду значительного увеличения доли композиционных материалов в общей массе летательных аппаратов.