



Разработка технологии и оптимизация процесса механической обработки многослойных полимерных композитов типа «стеклопластик-титан»

Краткое описание работы, выполненной в 2016 г. и представленной на соискание премии «Авиастроитель года» 2016 г. в номинации «За создание новой технологии»

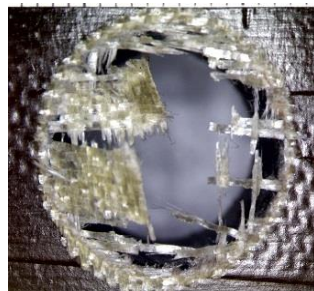
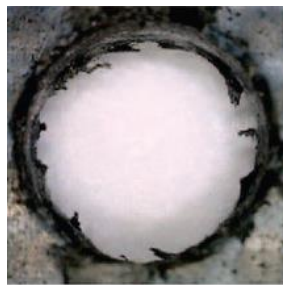
Чигринец Е.Г.

Ростовский вертолетный производственный
комплекс ПАО «Роствертол» им. Б.Н. Слюсаря

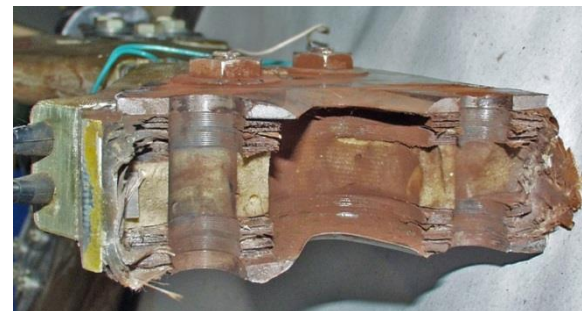


Доля полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкции современных летательных аппаратов неуклонно растет. Большое число особо ответственных авиационных конструкций из ПКМ подвергается механической обработке, в частности, для получения крепежных отверстий, обеспечивающих крепление композитных конструкций (см. слайд 2). Эти узлы называются особо ответственными, что означает их исключительную значимость в обеспечении живучести летательного аппарата.

Наиболее сложная операция механообработки композитов – сверление, сопряжена с рядом технологических проблем: образование расслоений, разлохмачиваний, растрескиваний, которые снижают эксплуатационную надежность и долговечность изделия. Размеры данных дефектов для каждого изделия строго регламентируются.



Основные дефекты обработки отверстий в ПКМ



Разрушенная лопасть рулевого винта Ми-2

Кроме того, поскольку обработка отверстий в авиационных конструкциях из ПКМ выполняется на заключительных этапах технологического процесса, экономические потери в случае брака значительны и влечет за собой увеличение себестоимости. Следовательно, наблюдается снижение конкурентоспособности конечного продукта. В государственной программе «Развитие авиационной промышленности на 2013-2025 годы», утвержденной распоряжением Правительства №2509-р от 24.12.2012, повышение конкурентоспособности и увеличение доли российской авиационной техники на мировом рынке отмечено как приоритетное направление, а высокая себестоимость изготовления как один из основных сдерживающих фактора развития авиастроения.



Элементы несущей системы и оперения вертолета Ми-28
из полимерных композитов



Несущий винт



Рулевой винт



Ми-28 «Ночной охотник»



Стабилизатор

Примеры изделий из многослойного полимерного композита
«стеклопластик-титан»



Лонжерон лопасти несущего винта Ми-28, Ми-35



Лонжерон лопасти рулевого винта Ми-26



Лопасть несущего винта Ми-28, Ми-35



Лонжерон и лопасть рулевого
винта Ми-28



Лонжерон стабилизатора Ми-26



Лопасть рулевого винта Ми-2

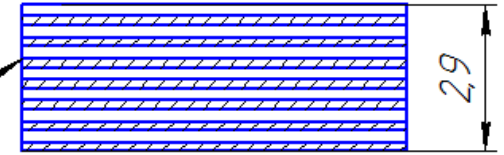
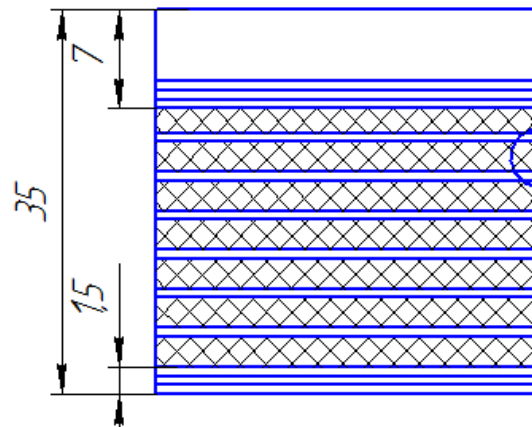
Цель работы: Разработка технологии, оптимизация и повышение производительности процесса сверления отверстий в многослойных полимерных композитах типа «стеклопластик-титан», выявление характерных особенностей и рекомендаций по их обрабатываемости.

Задачи:

1. Теоретические и экспериментальные исследования теплообразования в зоне резания, разработка и реализация методик компьютерного моделирования распространения тепла в стеклопластике, армированном слоями титановой фольги; определение критических температур, приводящих к деструкции термореактивных связующих.
2. Исследование возможностей разработки и обучения искусственных нейронных сетей в качестве моделей, обеспечивающих адекватный прогноз качества процессов сверления ПКМ типа «стеклопластик-титан».
3. Выявление закономерностей стружкообразования, его влияния на показатели качества, и разработка на этой основе рангового критерия, характеризующего процесс пакетирования и удаления стружки.
4. Экспериментальное исследование виброактивности и стабилизация процесса сверления за счет снижения колебаний силовых составляющих процесса резания.
5. Выявление влияния конструктивно-геометрических параметров инструмента на качество и стабильность процесса сверления, определение оптимальных углов заточки и соответствующих им режимов обработки.
6. Разработка и апробация в условиях серийного авиационного предприятия практических рекомендаций по обработке отверстий в особо ответственных конструкциях из армированных металлом полимерных композитов.



Изготовление лонжерона методом сухой спиральной намотки



- стеклопластик ВПС-7
- пакет усиления
- титановая фольга ОТ4-0-0,1

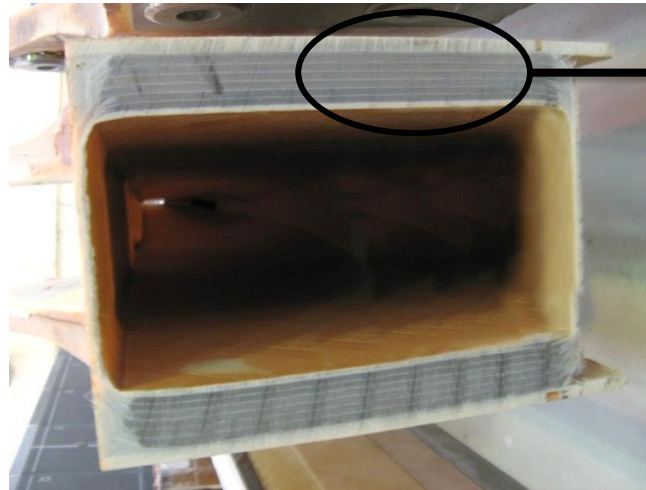
Схема армирования комлевой части лонжерона ЛНВ



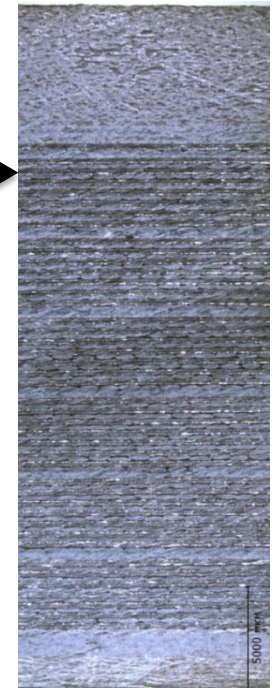
Схема сборки лопасти ЛНВ



Образцы комлевой части лонжерона (250×120, 120×50)

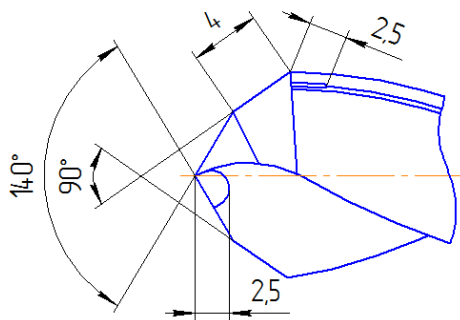


Комлевая часть лонжерона ЛНВ

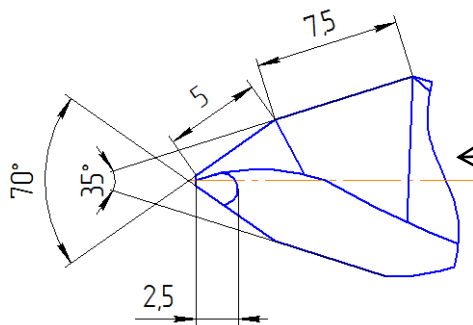


В начале проведены предварительные поисковые эксперименты, основной целью которых являлось определение оптимальной геометрии режущего инструмента. Исследованы различные заточки спиральных сверл – тройная, двойная, параболическая заточки, заточка по радиусу, заточка с подрезающими режущими кромками. Отмечено, что наилучший результат показала двойная заточка, поэтому данный тип сверл был подвержен детальному исследованию.

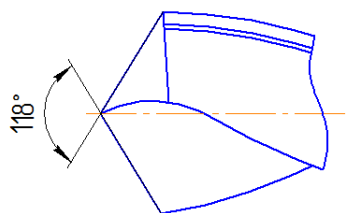
На предприятии ПАО «Роствертол» были изготовлены спиральные сверла из быстрорежущей стали Р6М5. Стружечные канавки полированы для облегчения схода стружки. Данные типы заточки были подвержены всестороннему исследованию и сравнению со стандартной геометрией, применяемой на предприятии.



Сверло с двойной заточкой тип 1 (СДЗ тип 1)



Сверло с двойной заточкой тип 2 (СДЗ тип 2)



Стандартная заточка с геометрией по ГОСТ

Проведены эксперименты по исследованию стружкообразования в зависимости от режимов обработки и типу применяемой заточки. На рисунке можем видеть образование стружки различных видов: витая стружка титана и стеклопластика, стружка надлома и большое количество пылевидных частиц.

Главной особенностью обработки отверстий в данном материале является пакетирование стружки, которое негативно сказывается на качестве. При использовании стандартной заточки и СДЗ тип 2 в стружечных канавках можем видеть плотные пакеты стружки, которые негативно воздействуют на обработанную поверхность и снижают производительность.



а) стандартное сверло



б) СДЗ тип 1



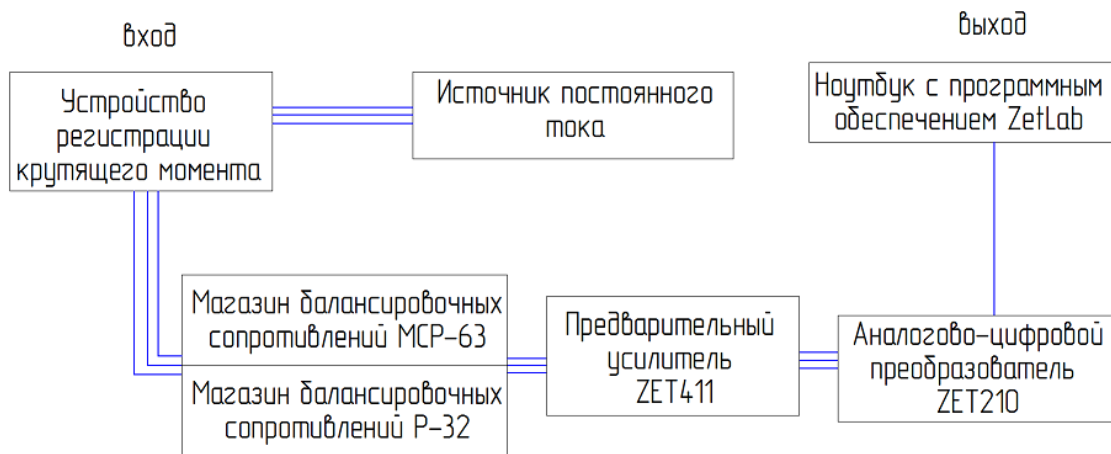
в) СДЗ тип 2

Таблица – Ранговый критерий пакетирования

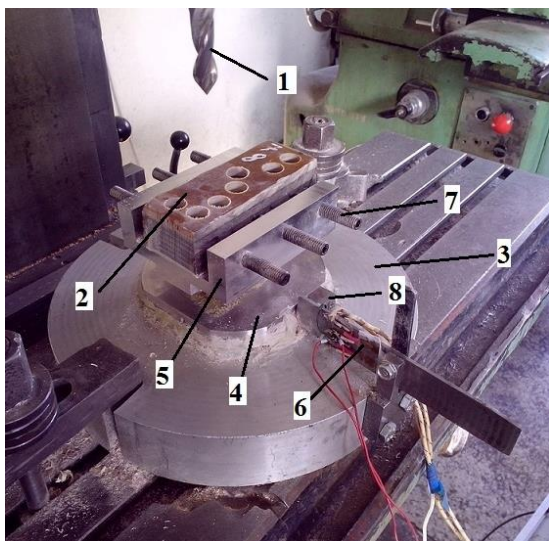
Режимы обработки		Степень пакетирования стружки		
V, м/мин	S, мм/об	Сверло ГОСТ	СДЗ тип 1	СДЗ тип 2
7,5	0,2	III	I	II
7,5	0,6	III	I	IV
7,5	0,8	IV	II	IV
12	0,2	IV	II	II
12	0,6	III	II	IV
12	0,8	IV	IV	IV
19	0,2	III	IV	I
19	0,6	IV	II	IV
19	0,8	IV	IV	IV

Экспериментальные исследования и накопленная статистическая информация позволила разработать ранговый критерий определения степени пакетирования, по которому из таблицы можем заключить, что СДЗ тип 1 показало лучшие результаты на всех режимах обработки.

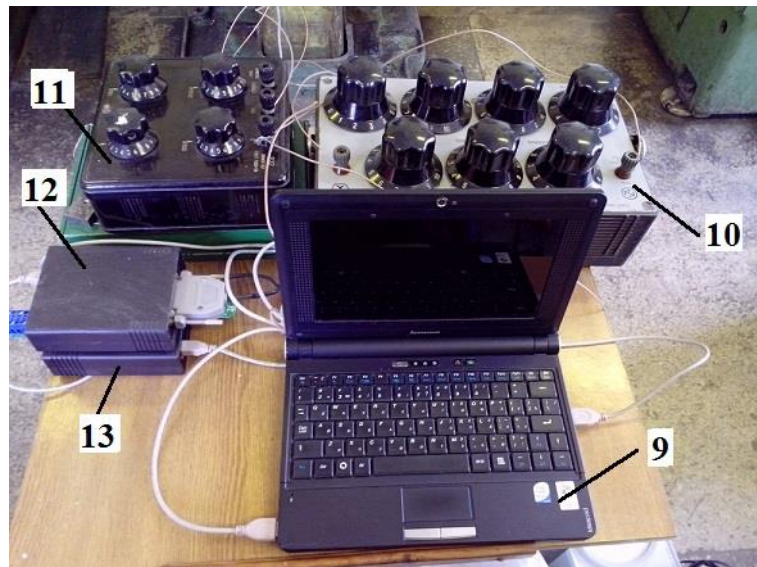
Следующим этапом стало исследование виброактивности процесса резания через показания крутящего момента. Применение стандартных измерительных приборов не принесло результата, поэтому было спроектировано и изготовлено компьютеризированное устройство регистрации и записи крутящего момента. На слайде представлена его принципиальная схема и аппаратная часть



Блок-схема устройства

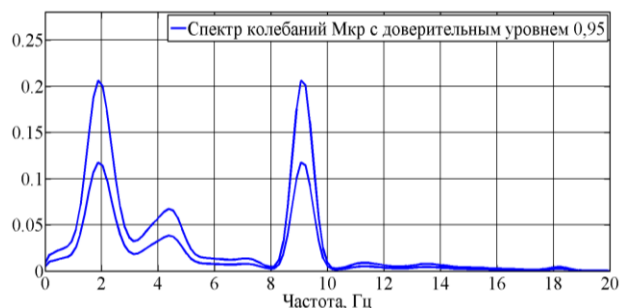
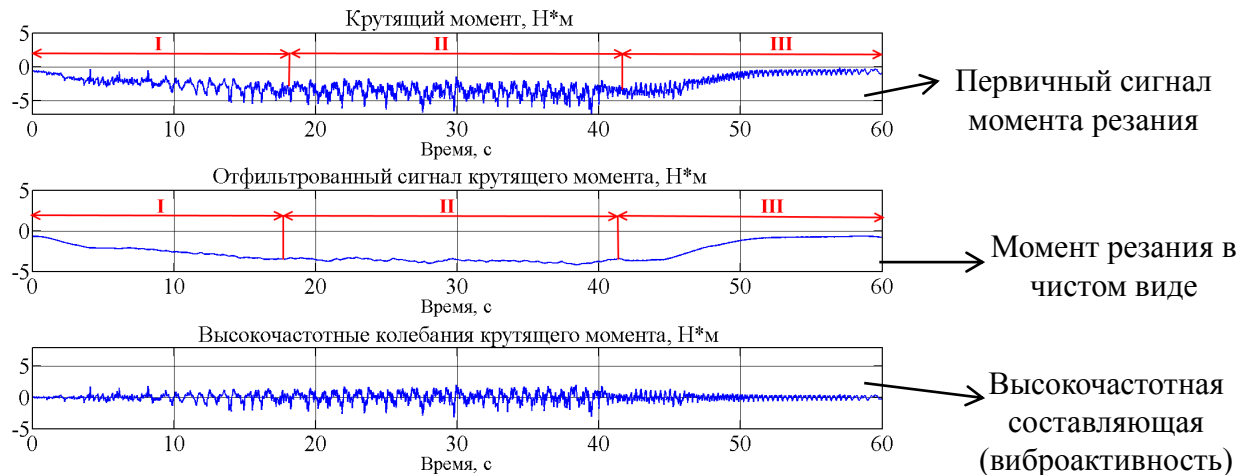


Устройство регистрации крутящего момента

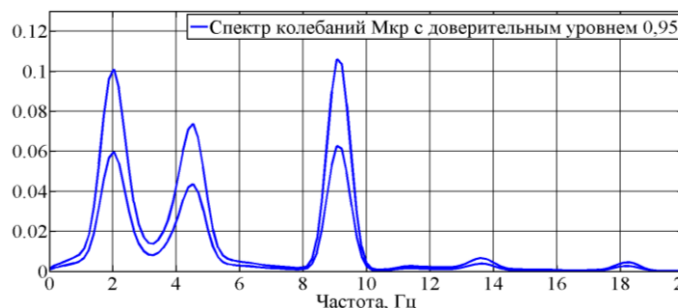


Аппаратная часть записи

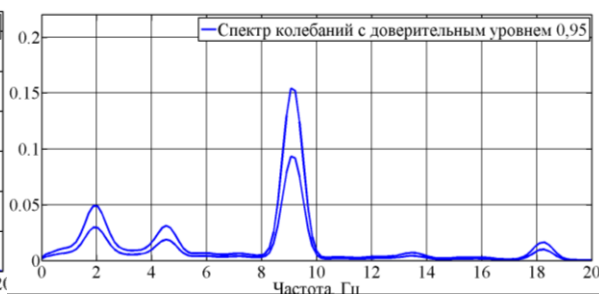
После получения выходного сигнала колебаний крутящего момента, выполнен его спектральный анализ по разработанной автором методике на основе фильтра Савицкого-Голея.



Стандартное сверло



СДЗ тип 1



СДЗ тип 2

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. Наблюдаем снижение виброактивности процесса резания при использовании СДЗ взамен стандартной геометрии на 30-200% (в зависимости от режимов обработки), что говорит о более стабильном процессе резания при постоянной производительности.

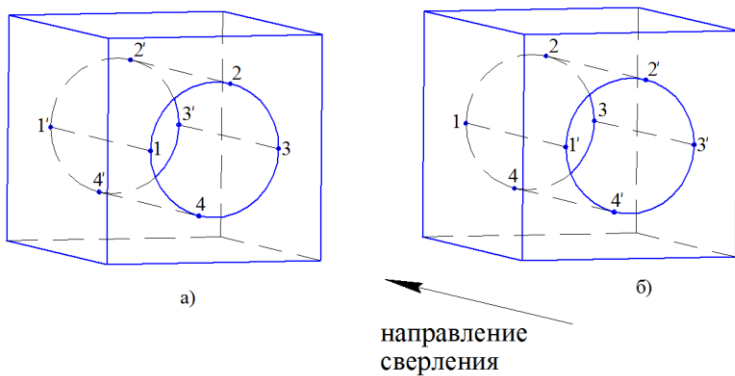
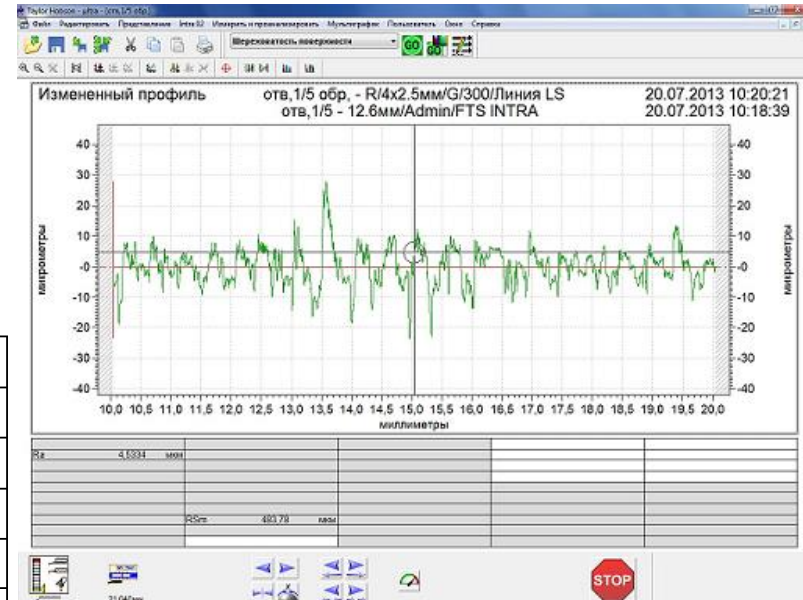
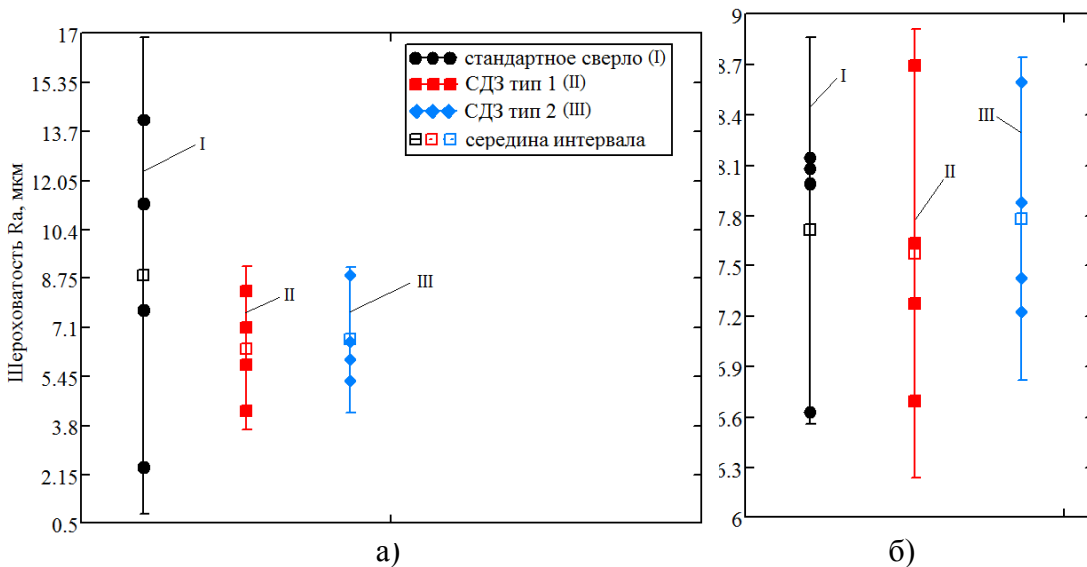


Схема измерения: а) в направлении подачи, б) в обратном

Шероховатость поверхности измерялась контактным способом с помощью профилометра. В виду слоистого строения исследуемого материала измерения вели в двух направлениях по представленной схеме.



Профиль микронеровностей



Доверительные интервалы шероховатости (V=7,5 м/мин, S=0,6 мм/об):

а) в направлении подачи, б) в обратном

Шероховатость в пределах Ra5-10,5 мкм. Высота микронеровностей, измеренная в направлении подачи инструмента ниже, чем в обратном. Связано с проминанием титановых слоев и характерно для всех типов инструментов

Упругое восстановление отверстий (усадка) – не более 0,06 мм для всех типов инструмента

Требование к качеству отверстий (на этапе сверления) – расслоения не более 1 мм.

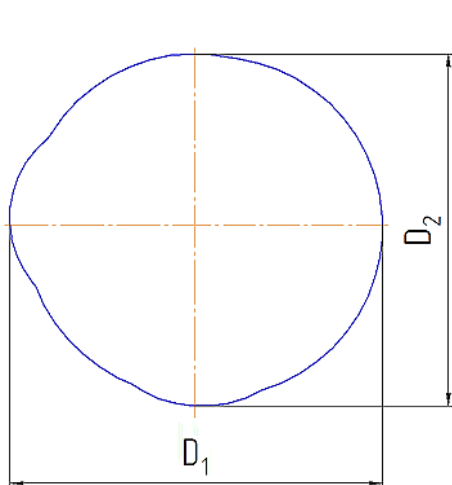


Схема контроля точности формы отверстий

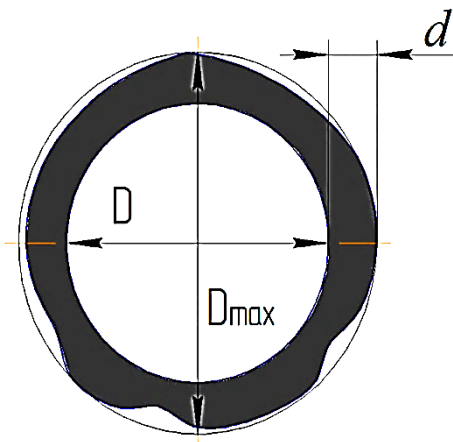


Схема определения размеров расслоений

Тип инструмента	Отклонение от круглости, мкм
Стандартное (ГОСТ)	40-60
СДЗ тип 1	10-15
СДЗ тип 2	20-30

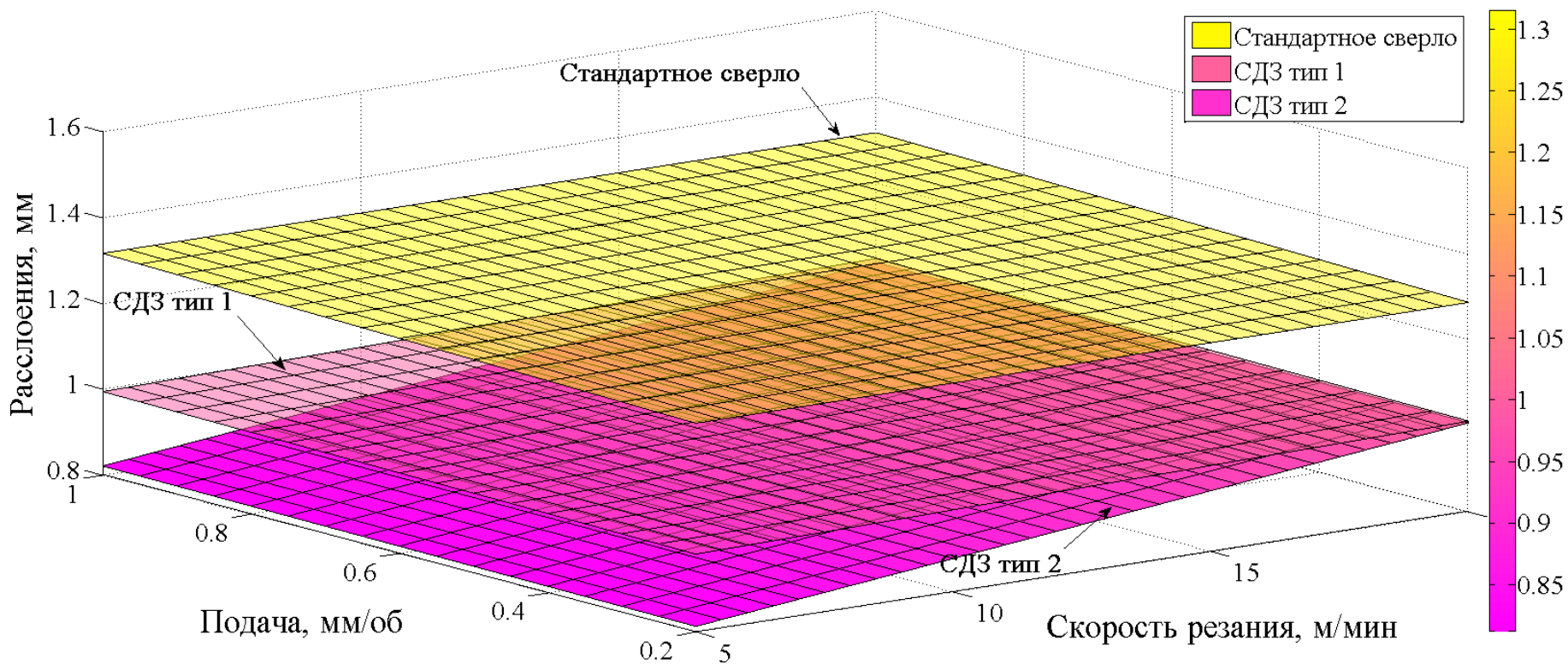
Результатом серии опытов по определению зависимости размеров дефектов отверстий – расслоений от режимов обработки стали матрицы данных, которые для удобства последующего использования необходимо было преобразовать в эмпирические модели, обеспечивающие возможность предсказания дефектов и выбора рациональных режимов. Традиционно для этих целей используются регрессионные одно-, двух- и многофакторные модели первого или второго порядка. Однако, в последние годы большую популярность приобрели модели на основе искусственных нейронных сетей, что обусловлено их большей гибкостью и расширением применения компьютерной техники в экспериментальных исследованиях. В настоящей работе использовались оба подхода, эффективность которых сравнивалась после обработки серии экспериментов.

В связи с ограниченностью числа экспериментальных данных в качестве регрессионной модели принималась двухфакторная модель, геометрически представляющая собой плоскость и описываемая уравнением:

$$F(x, y) = ax + by + c, \text{ где } x - \text{ скорость резания; } y - \text{ подача; } a, b, c = \text{const}$$

Для выполнения процедуры идентификации использовался численный метод сопряженных градиентов, сущность которого заключается в нахождении локальных экстремумов функции на основе информации о ее значениях и градиенте с использованием функции невязок вида:

$$\phi(a, b, c) = \frac{\sum_{i=0}^n |d_i - F(x, y)|}{n}, \text{ где } d_i - \text{ величина расслоений } i\text{-го опыта; } n - \text{ общее количество опытов}$$



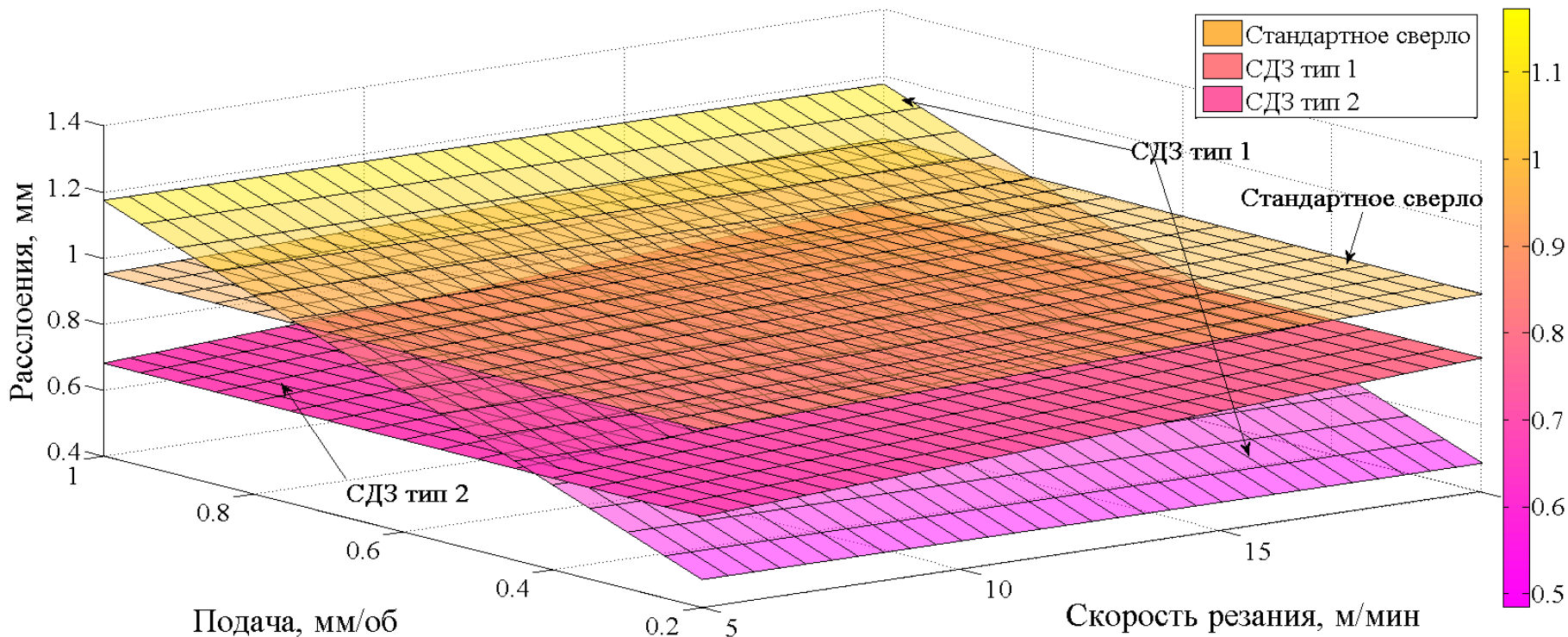
Линейные двухфакторные модели зависимостей расслоений на входе в отверстие от режимов обработки

$$F = 1,278283 + 3,623031 \times 10^{-2} \times Y$$

$$F = 1,911205 \times 10^{-3} \times X + 1,512558 \times 10^{-2} \times Y + 0,96799$$

$$F = 1,285501 \times 10^{-2} \times X + 8,725667 \times 10^{-3} \times Y + 0,7463913$$

где F – функция, описывающая модель; X – скорость резания, Y – подача



Линейные двухфакторные модели зависимостей расслоений на выходе из отверстия от режимов обработки

$$F = 3,832832 \times 10^{-3} \times X + 1,445863 \times 10^{-2} \times Y + 0,9156087$$

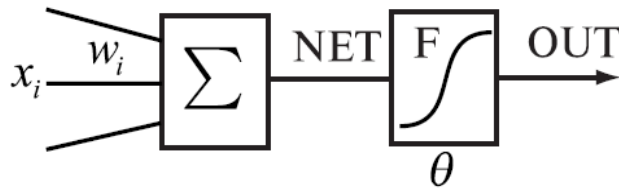
$$F = 8,591095 \times 10^{-1} \times Y + 0,3127128$$

$$F = 1,285501 \times 10^{-2} \times X + 8,725667 \times 10^{-3} \times Y + 0,7463913$$

где F – функция, описывающая модель; X – скорость резания, Y – поддача

Искусственные нейронные сети представляют собой набор математических и алгоритмических методов, созданных для моделирования функций мозга, и, подобно ему, имеют многослойную иерархическую структуру и способность к обучению.

Основным блоком ИНС является формальный или искусственный нейрон (он же узел сети), представляющий собой или математическую, или алгоритмическую, или программно реализованную модель, чьи элементы являются прямыми аналогами компонент биологического нейрона.



Искусственный нейрон
(узел сети)

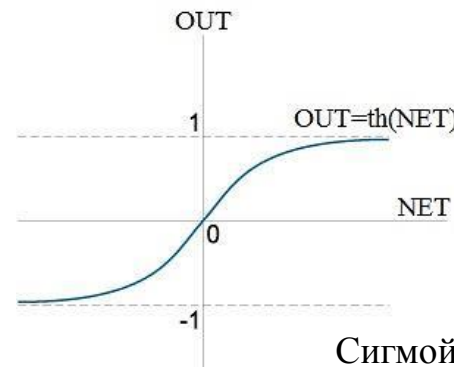
На каждый вход нейрона подается сигнал x_i , при этом с каждым входом связан синаптический вес w_i . В теле нейрона с помощью взвешенного сумматора (1) вычисляется функция отклика (2), т.е. реализуется нелинейное отображение многомерного пространства входов в скалярный выход.

$$NET = \sum_{i=0}^n w_i x_i \quad (1)$$

$$OUT = F(NET - \theta) \quad (2)$$

В данном исследовании в разработке нейронной сети применялась сигмоидная функция активации в виде гиперболического тангенса (3), графическое представление которой изображено на рисунке ниже.

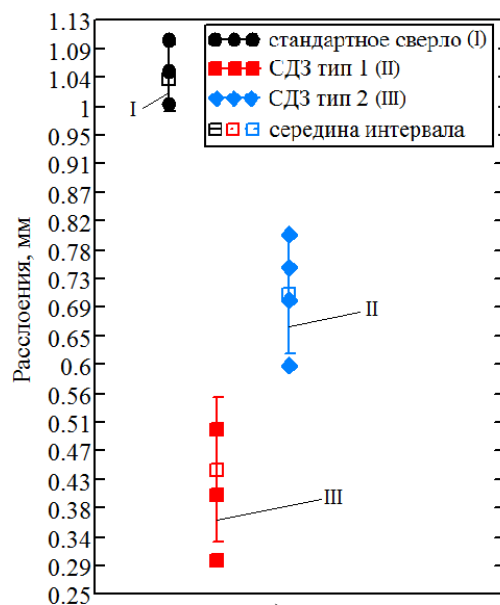
$$OUT = th(NET) = \frac{e^{NET} - e^{-NET}}{e^{NET} + e^{-NET}} \quad (3)$$



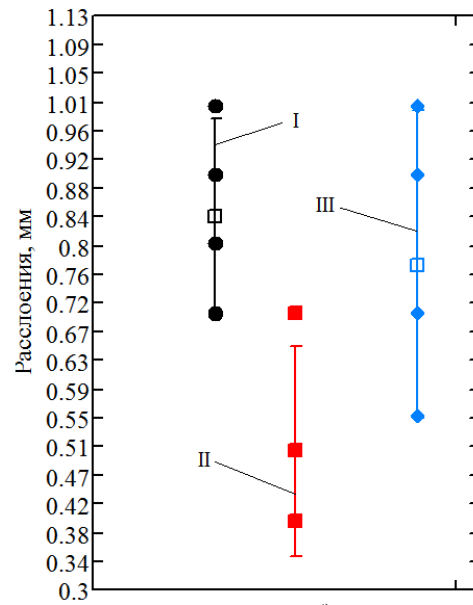
Сигмоидная функция активации

Перед построением нейронных сетей необходимо сформировать обучающие наборы. В качестве файла экспериментальных данных будем использовать сформированную матрицу данных. Для повышения обучаемости будущих сетей, получения более точных результатов, а также ввиду специфики обрабатываемой детали и невозможности сбора большого количества статистических данных провели виртуальные эксперименты, которые представляют собой размножение экспериментальных данных при каждом наборе скоростей резания и подач внутри доверительных интервалов, определенных по результатам опытов.

В качестве оценки математического ожидания случайной величины – величины расслоений, использовалось среднее арифметическое значение. Затем оценивалась статистическая дисперсия случайной величины, на основании которой в предположении нормальности распределения строились доверительные интервалы с уровнем достоверности 0,95 в среде Mathcad.

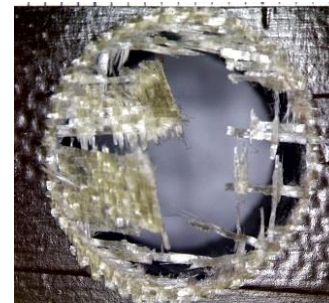


а)

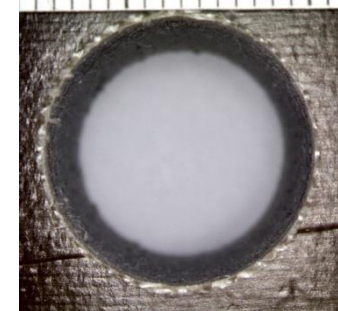


б)

Доверительные интервалы расслоений при $V=7,5$ м/мин,
 $S=0,2$ мм/об: а) вход отверстия, б) выход отверстия

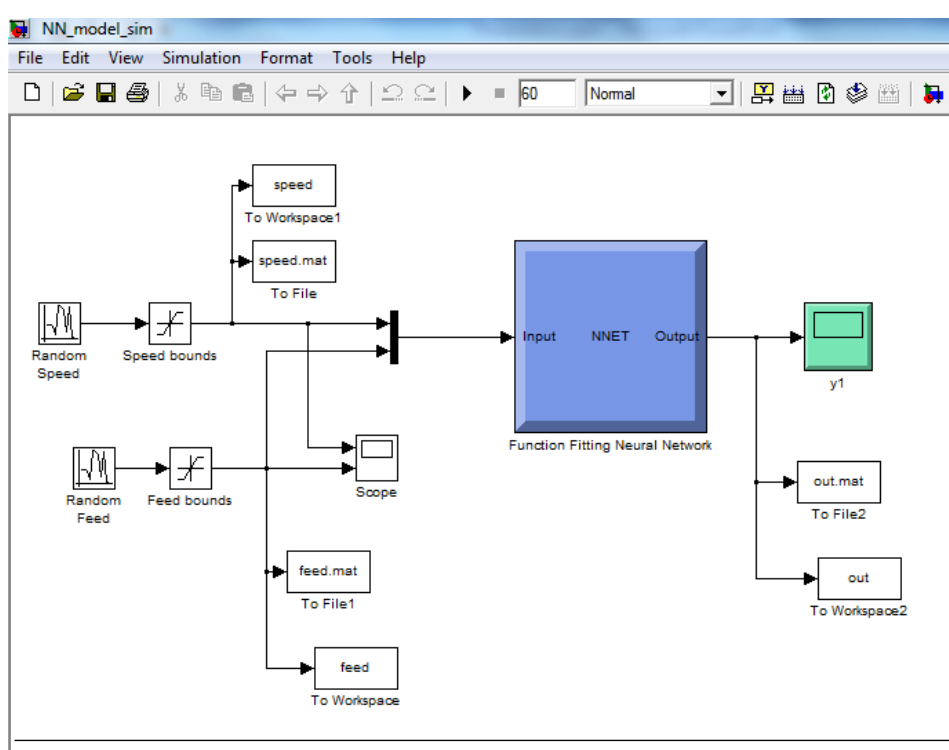
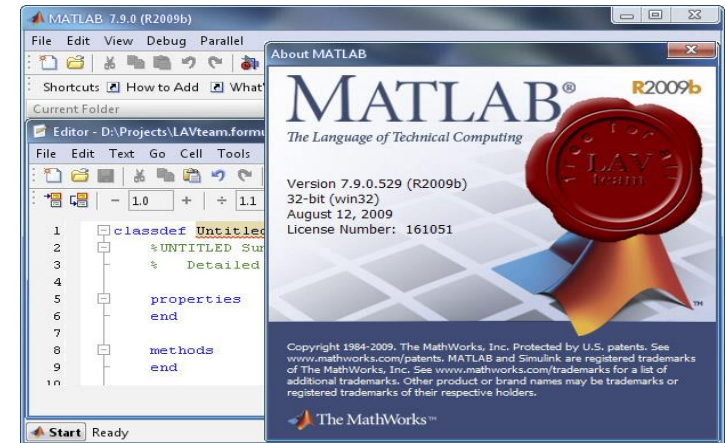


Выход отверстия
стандартного сверла



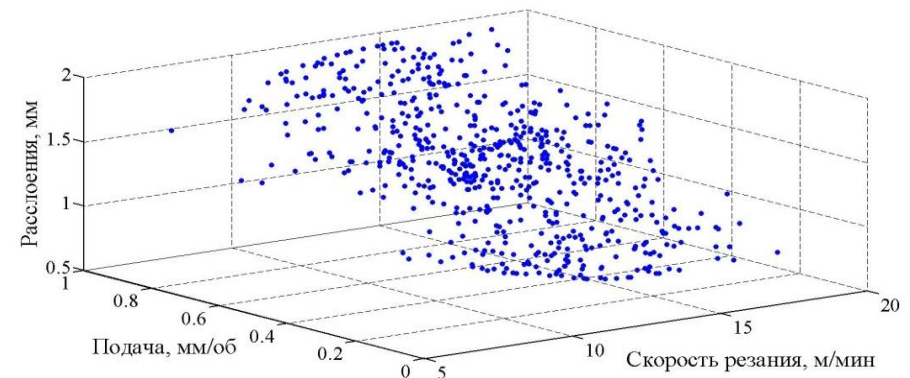
Выход отверстия
СДЗ тип 1

Построение нейронных сетей выполнялось с помощью инструмента *Neural Network Fitting Tool* среды MATLAB. Исследование работы создаваемых сетей проводили в графической среде имитационного моделирования Simulink с использованием модель-шаблона, генерирующей массив нормально распределенных подач и скоростей резания, подавая их на вход сети.



Модель-шаблон нейронной сети

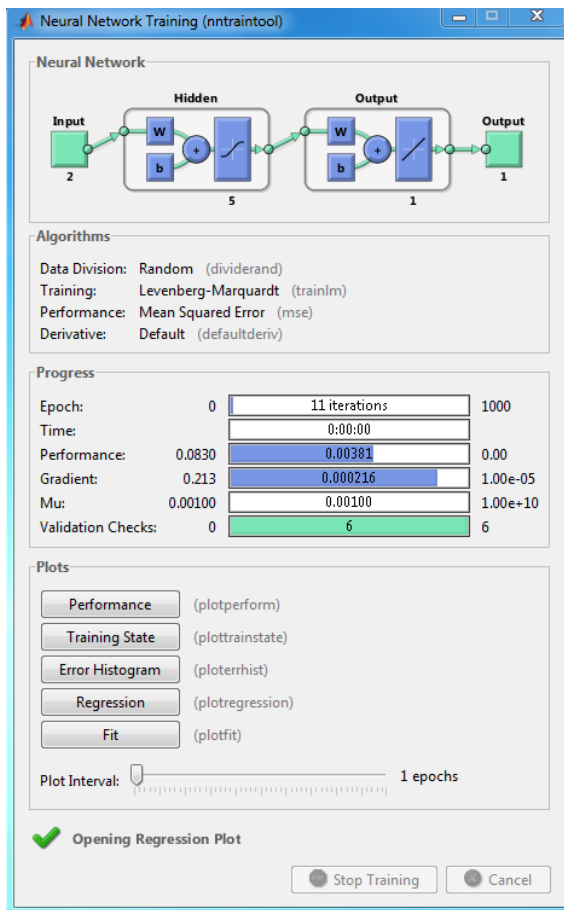
На выход нейронной сети подаются соответствующие режимам обработки значения расслоений. Симуляция оканчивается созданием точечной трехмерной диаграммы, пример которой представлен на рисунке ниже.



Трехмерная точечная диаграмма нейросети

После ввода входных данных в рабочее поле проведем перераспределение всего обучающего набора на три случайно выбираемых подмножества данных:

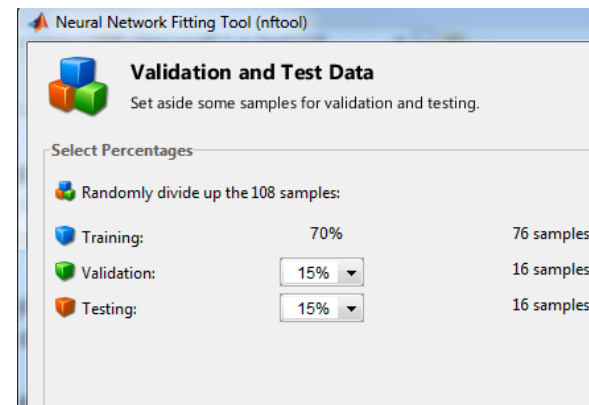
1. Обучение, составляющего 70% данных всего обучающего набора.
2. Проверка валидности – 15% обучающего набора.
3. Тестирование качества аппроксимации – 15% обучающего набора.



Окно тренировки сети

Процедура, с помощью которой происходит настройка нейронной сети, называется **алгоритмом обучения**.

Поскольку в рамках поставленной задачи исследования у нас известны входы нейронной сети – режимы обработки (скорость резания и подача) и выходы – размеры дефектов отверстий (расслоений) обучение выполнено с использованием алгоритма **обратного распространения ошибки**, который относится к методу обучения «с учителем».



Окно распределения обучающего набора

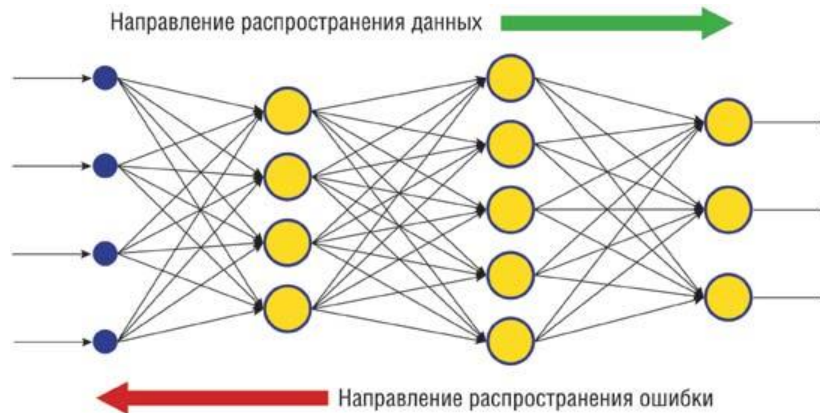


Рис. 14 Алгоритм обратного распространения ошибки

После обучения нейронной сети можем ознакомиться с его результатами в виде гистограмм ошибок (рис.15) и регрессионных линий (рис. 16).

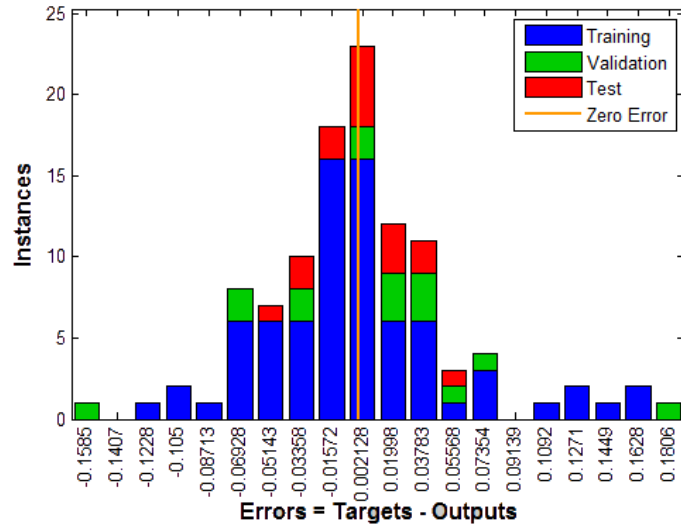


Рис. 15 Гистограмма ошибок

На рис. 15 по горизонтали представлены отклонения загруженных данных от результатов предсказания нейронной сетью, по вертикали – количество отклонений.

На рис. 16 значение коэффициента регрессии R превышает 0,97. Это означает, что 97% предсказанных нейросетью данных совпадает со значениями обучающих данных и сеть обладает достаточной точностью предсказания.

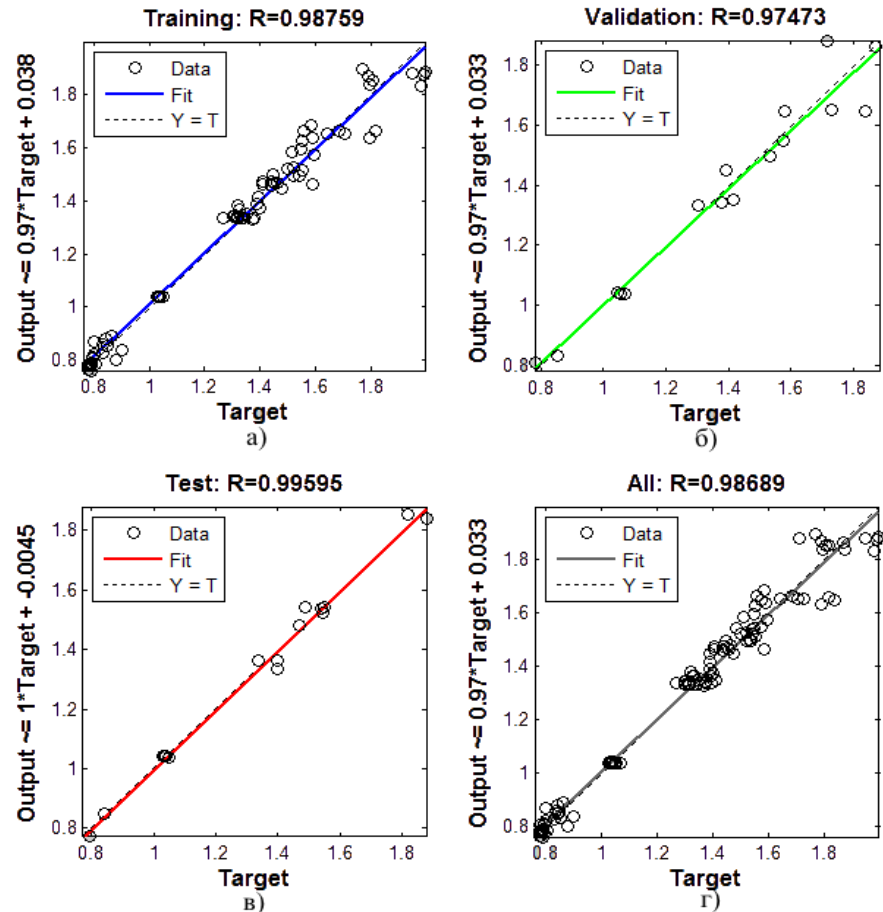


Рис. 16 Графики рассеяния обучающих данных от предсказаний нейронной сети на стадиях: а) тренировки, б) валидации, в) тестирования, г) всех данных

После того как ИНС научилась давать уже известные результаты, за счет способности к обобщению сеть могут быть получены новые результаты, если на вход подать вектор, который не встречался при обучении. Так реализуется возможность нейронной сети предсказывать результаты экспериментов.

В моделировании зависимостей размеров расслоений от режимов обработки использовалась двухслойная нейронная сеть, структура которой представлена на рис. 17. На скрытый слой нейронной сети подаются входные сигналы, которые преобразуются с помощью нелинейной функции *tansig*, представляющей собой сигмоиду в виде гиперболического тангенса. После этого сигналы поступают на выходной слой, где они обрабатываются линейной передаточной функцией *purelin* и подаются на выход сети.

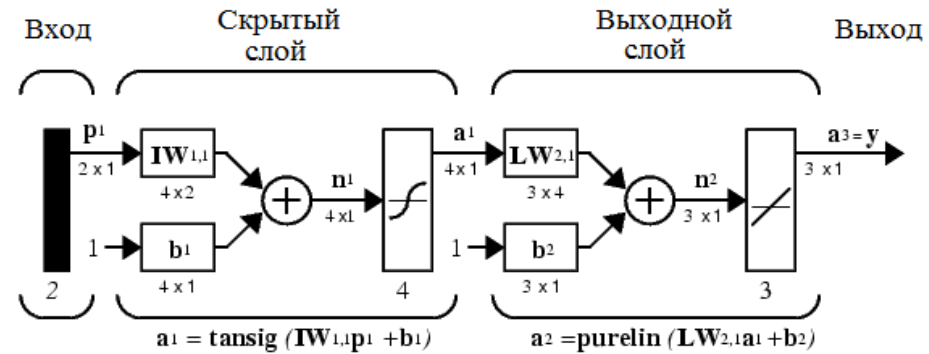


Рис. 17 Общий вид двухслойной нейронной сети

На рис. 18 (слайд 22) представлены отклики нейронных сетей расслоений на входе в отверстие, зависящих от подачи при постоянной скорости резания. Для наглядности сравнения из трехмерных двухфакторных моделей, полученных методом сопряженных градиентов (слайды 14-15), были выделены линейные однофакторные зависимости размеров дефектов от подачи при постоянной скорости резания (рис. 19, слайд 22). Сопоставляя результаты моделирования градиентным методом и нейронными сетями (слайд 14), можем видеть явное сходство характера кривых – с возрастанием подачи величина расслоений увеличивается. Однако, интервалы изменения размеров дефектов в случае линейных зависимостей лежат в более жестких пределах и существенно завышены при подачах до 0,5 мм/об. Таким образом, модели, полученные из экспериментальных данных методом сопряженных градиентов, показали недостаточно согласованный с экспериментом количественный прогноз размера дефектов, что ограничивает их применение на практике. Поэтому для прогнозирования размеров расслоений при сверлении отверстий в сложно слоистом стеклопластике рекомендовано использовать искусственные нейронные сети.

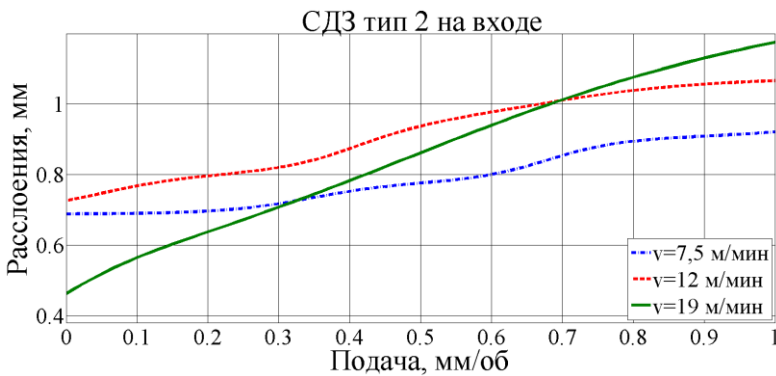
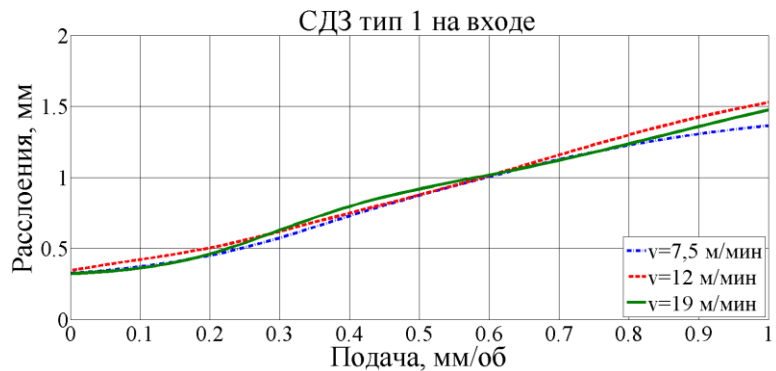
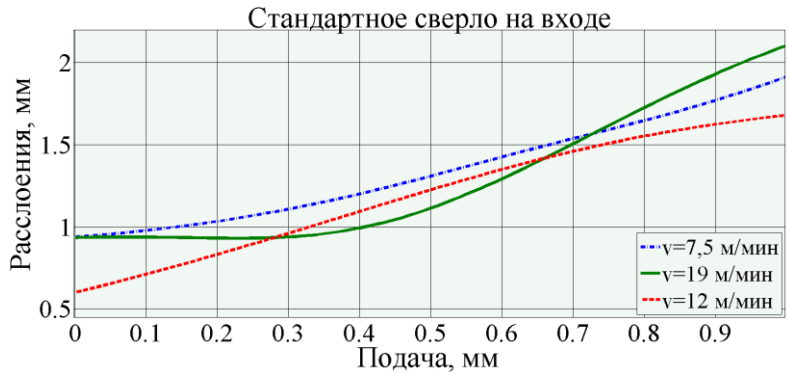


Рис. 18 Отклики нейронных сетей

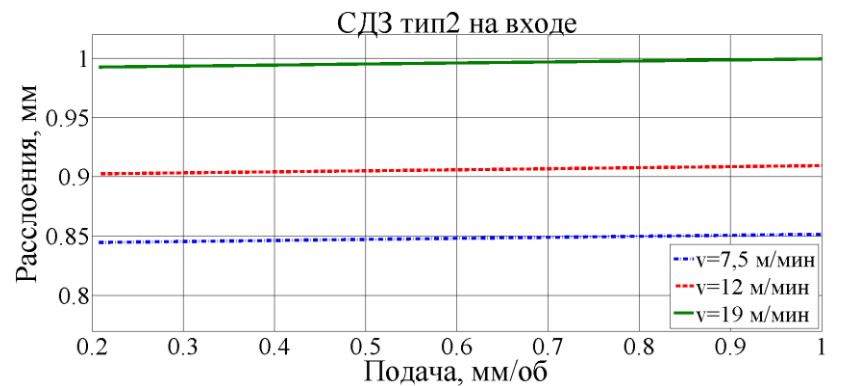
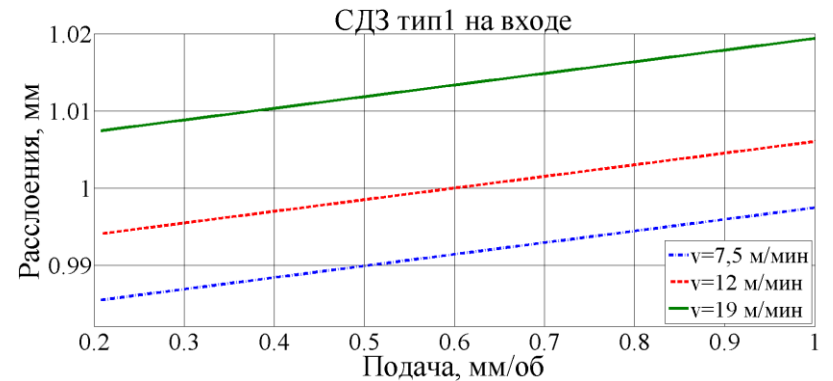
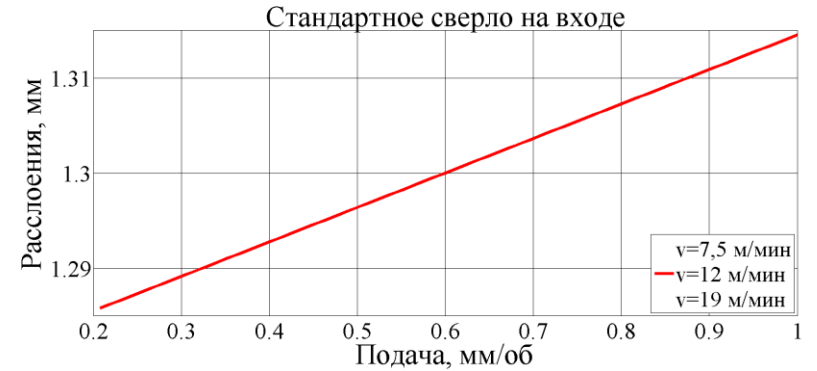


Рис. 19 Линейные модели

Следующим этапом стало определение влияния температуры процесса резания на композиционный материал. Методом дифференциальной сканирующей калориметрии выявлена деградация свойств стеклопластика в интервале температур 235-240°C. То есть в процессе сверления отверстий режимы обработки и геометрия инструмента должны подбираться таким образом, что обеспечивало бы температуру в зоне резания ниже полученного интервала.

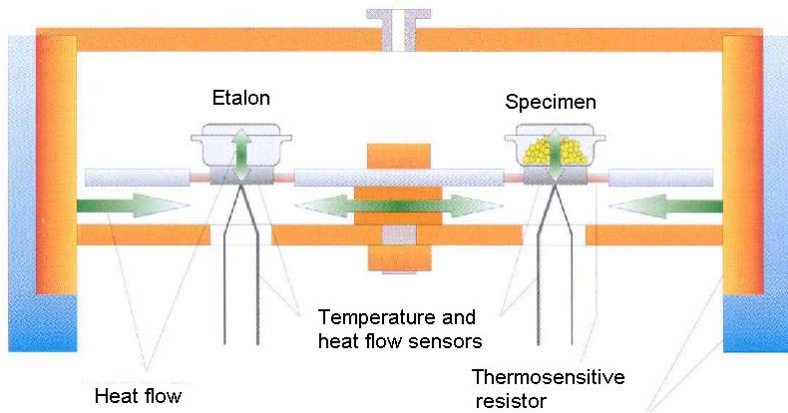
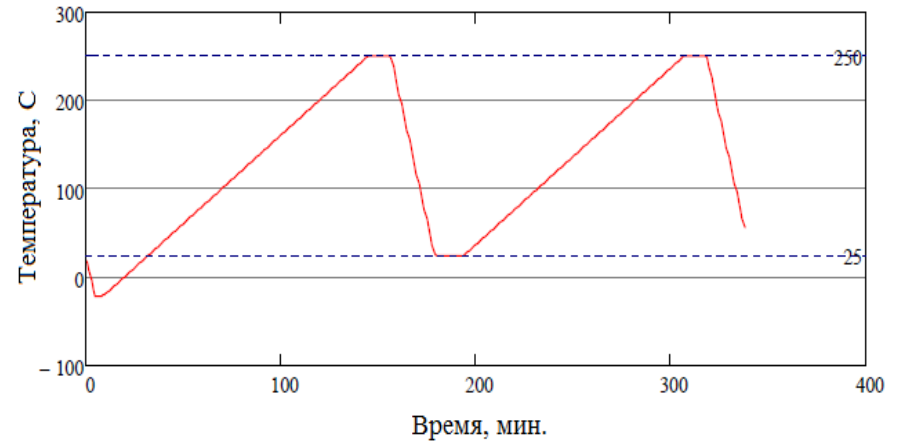
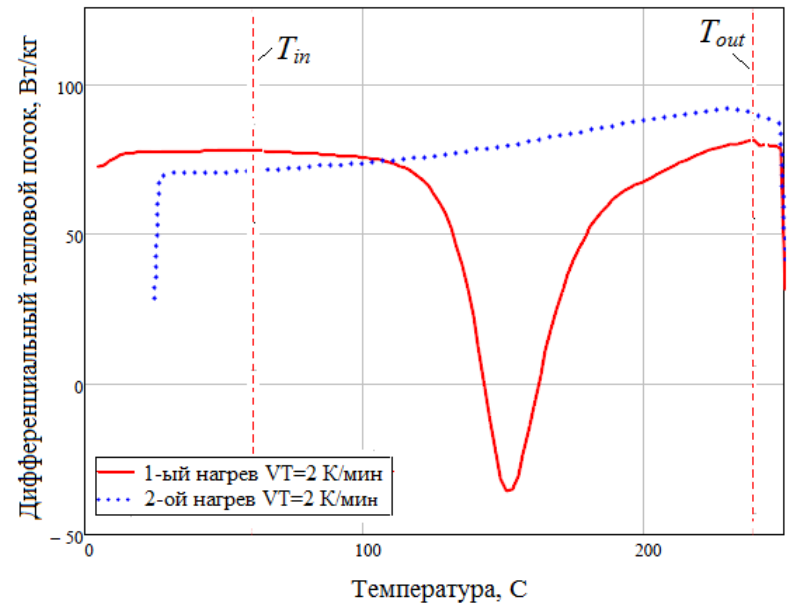


Схема измерения методом ДСК



Температурная программа ДСК сканирования



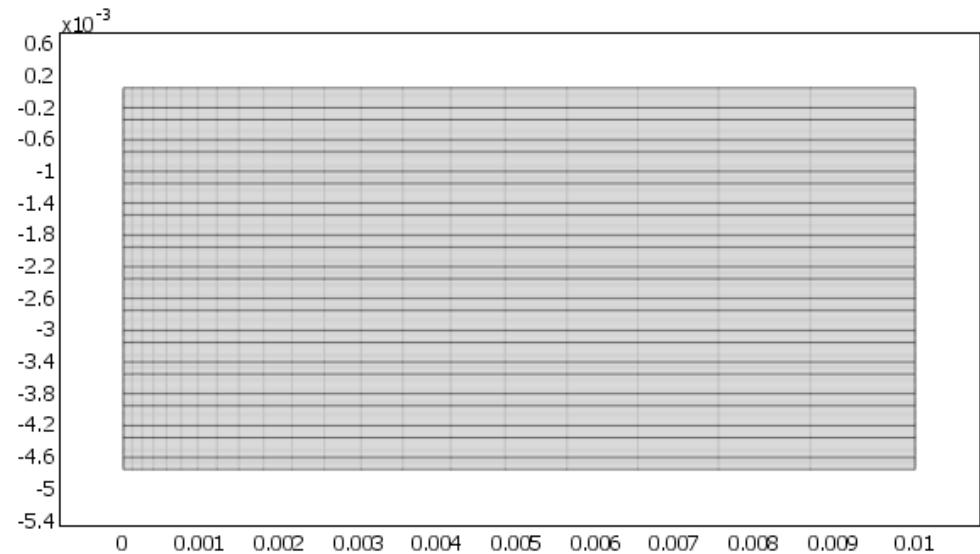
Термограмма нагрева полимерного композита

В связи с отсутствием аналитических методик расчета теплообразования при сверлении многослойных пакетов стеклопластик-титан и невозможностью контроля температуры экспериментальным путем в удаленных от зоны резания участках лонжерона была построена компьютерная модель распространения температурных потоков в материале слоистой структуры с различными теплофизическими свойствами чередующихся слоев. Учитывающая геометрию задачи модель теплообразования формулировалась на основе уравнения теплопроводности – дифференциального уравнения в частных производных, решаемого методом конечных элементов в среде COMSOL Multiphysics.

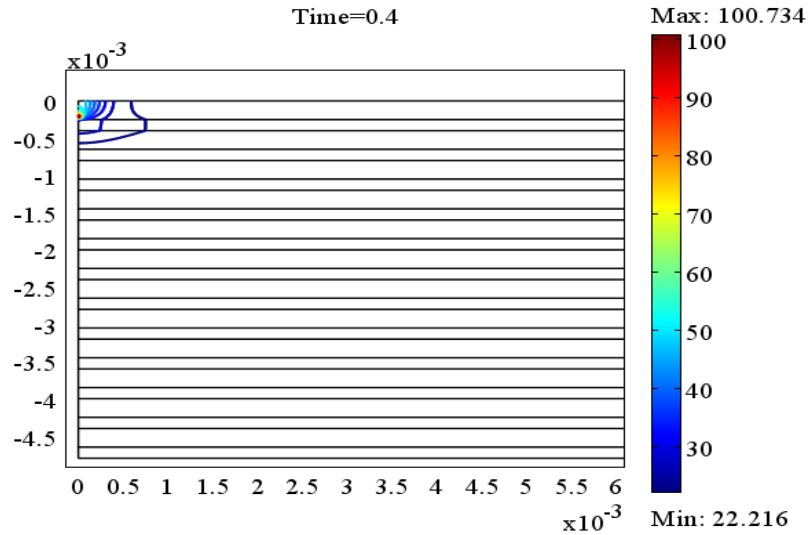
$$\delta_{ts} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(k \nabla T) = Q$$

$$n \cdot (k \nabla T) = q_0 + h_{trans} (T_{ext} - T) + \varepsilon \sigma (T_{ambtr.}^4 - T^4)$$

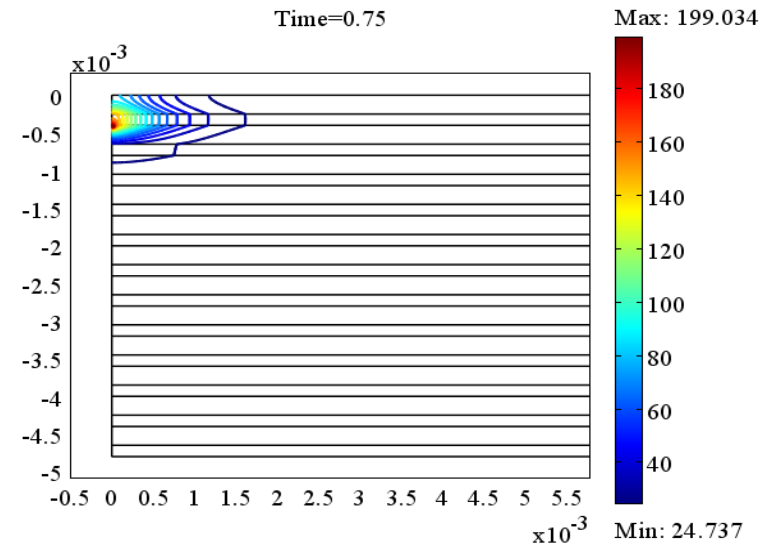
где n – вектор нормали; T – температура внутри и на поверхности тела, К; $\delta_{ts}=1$ – временной коэффициент; ρ – плотность, кг/м³; C_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг×К); k – теплопроводность, Вт/м×К; Q – интенсивность объемных тепловых источников, Вт/м³; h_{trans} – конвективный коэффициент теплопереноса от поверхности отверстия в воздух; Вт/м³×К; T_{ext} – температура окружающей среды в которую тепло передается по механизму теплопроводности, К; ε – излучательная способность поверхности, σ – постоянная, соответствующая излучению черного тела, Вт/м³×К⁴; $T_{ambtr.}$ – температура среды, в которую излучается тепло, К.



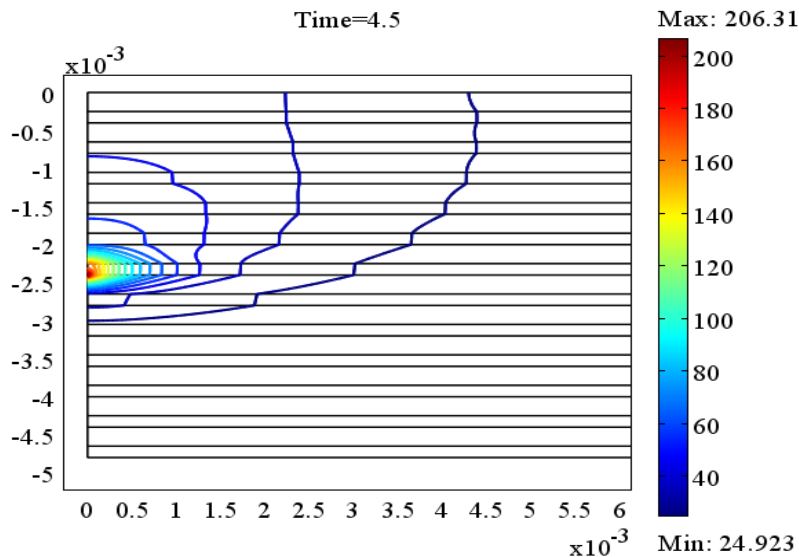
Конечно-элементная модель поперечного среза стенки лонжерона



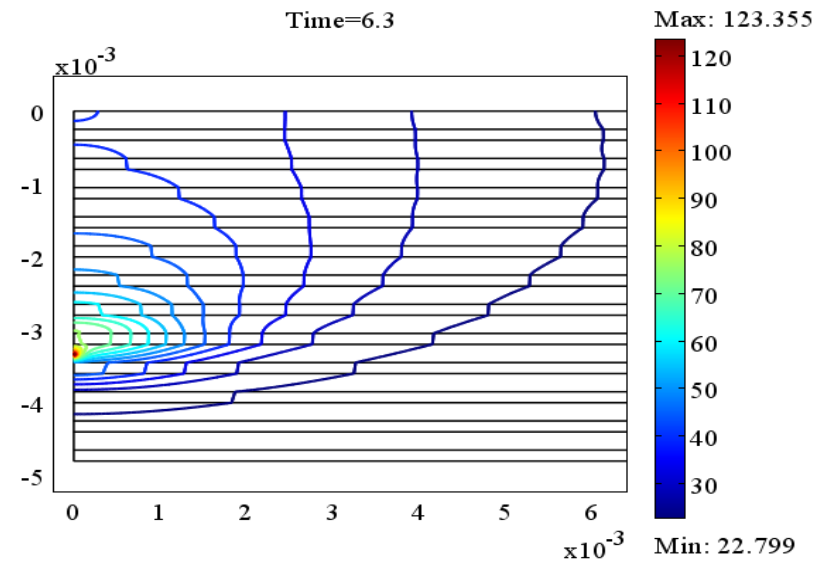
Поле температур резания 1-го слоя композита



Поле температур резания 1-го слоя титана



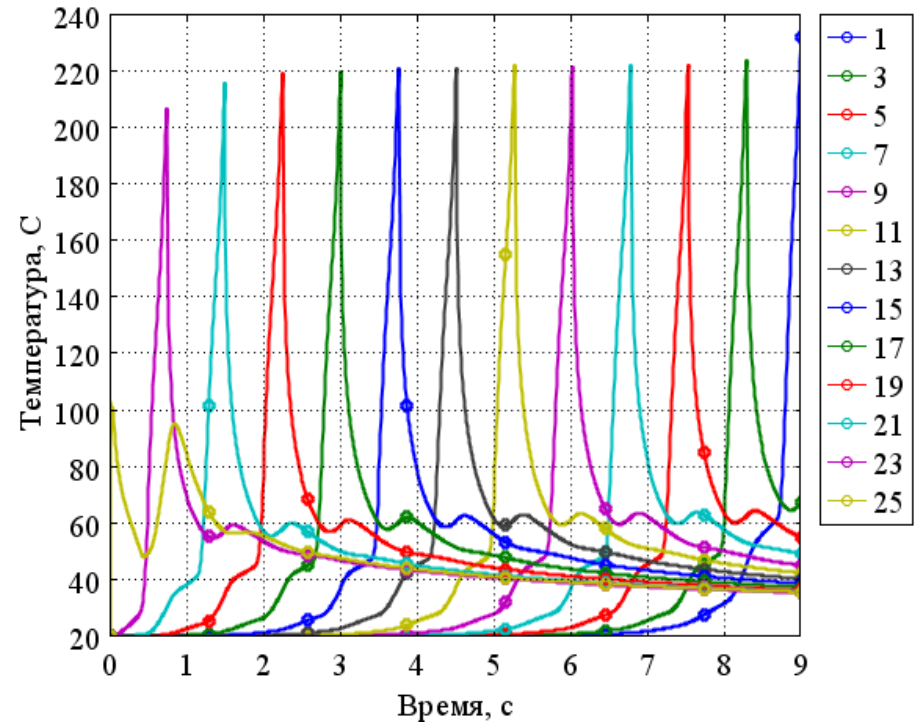
Поле температур резания 6-го слоя титана



Поле температур резания 9-го слоя композита

Моделирование тепловых полей выявило прерывистое изменение температуры в процессе резания – при переходе режущей кромки со слоя композита на слой металла происходит ее скачкообразное увеличение и постепенное нарастание высоты температурных пиков, вызванное общим разогревом материала.

Таким образом, с использованием экспериментальных данных средней температуры на поверхности отверстий выполнено конечно-элементное моделирование распространения тепла в процессе сверления слоистого комбинированного композита. Полученная модель позволяет выявлять источники и направление тепловых потоков, характер изменения и числовое значение температуры в конкретной точке обрабатываемого материала, а зависимость между допускаемой экспериментально определенной средней температурой на поверхности отверстия и пиковыми температурами в связующем слое ПКМ позволяет выбирать режимы обработки сверлом заданной геометрии, исключая температурную деградацию смолы.



Изменение температуры в точках перехода титан-стеклопластик

1. Экспериментальные исследования теплообразования в зоне резания методом пирометрии позволили получить количественные оценки средних температур в зоне резания, на их основе построить математическую модель нестационарного процесса распространения тепла в слоистом стеклопластике и разработать ее конечно-элементную реализацию, обеспечивающую получение характеристик распространяющихся тепловых потоков и температурных полей в слоях при движении осевого инструмента.
2. Количественные характеристики локальных температурных пиков, возникающих при перерезании слоев титана и обусловленных низкой теплопроводностью прилегающих слоев стеклопластика, дополненные данными дифференциальной сканирующей калориметрии эпоксидного связующего, обеспечили возможность выбора рациональных режимов процесса, исключающих деградацию механических свойств слоев стеклопластика при достижении пиковых локальных температур 230 – 240 град.
3. На основе экспериментальных исследований процесса пакетирования стружки и связанных с ним количественных показателей расслоений композита на входе и выходе сверла установлен определяющий эффект первой операции на показатели точности и качества обрабатываемых отверстий, достигаемых на последующих операциях, что обусловлено высокой технологической наследственностью процесса. В результате выполненных экспериментов разработана методика ранжирования степени пакетирования стружки, позволяющая с высокой степенью достоверности характеризовать ее влияние на величину расслоений и качество обработанной поверхности.
4. Разработанные архитектура и методика обучения искусственных нейронных сетей, моделирующих количественные зависимости расслоений от режимов обработки, подтвердили свою адекватность и точность прогноза размера дефектов при сверлении ПКМ типа «стеклопластик-титан» не хуже 95%, что значительно превосходит аналогичные показатели традиционно используемых эмпирических полиномиальных моделей. Разработаны искусственные нейронные сети, моделирующие результаты экспериментальных данных зависимостей расслоений от режимов обработки.
5. Разработанные методики мониторинга и спектрального анализа колебаний крутящего момента при сверлении, а также экспериментальные исследования микро-, макрогеометрии, размерной точности позволили выявить и количественно охарактеризовать связь между виброактивностью процесса, качеством (размеры расслоений, некруглость, шероховатость поверхности) и точностью обрабатываемых отверстий.
6. Для предложенных модифицированных инструментов – сверл с двойной заточкой (СДЗ), условно названных СДЗ-1 и СДЗ-2, установлено, что СДЗ-1 в сочетании с полированными стружечными канавками обеспечивает лучшую эвакуацию стружки из зоны резания, снижая степень ее пакетирования и размеры расслоений в среднем на 15-20%, и до 50% при оптимальных режимах обработки.
7. Для этих инструментов установлены и рекомендованы следующие диапазоны режимов обработки: скорость резания 7,5-12 м/мин, подача 0,2-0,6 мм/об.
8. Установлено, что при использовании СДЗ-1 на рекомендуемых режимах амплитуда колебаний крутящего момента снижается на 30-75% по сравнению СДЗ-2 и на 80-200% при использовании инструмента по ГОСТ 10903-77, что подтверждает более низкую виброактивность и лучшую стабильность процесса резания этим инструментом.
9. Установлено, что достигаемая некруглость при использовании СДЗ-1 меньше в 3-4 раза в сравнении со стандартным сверлом и до 2 раз в сравнении с инструментом СДЗ-2.



«УТВЕРЖДАЮ»

Главный инженер ПАО «Роствертол»

А.Б. Сичев

2016 г.

А К Т

промышленных испытаний
процесса обработки отверстий в комлевой части
стеклопластиковых лонжеронов ЛНВ вертолета Ми-28 спиральными сверлами
модифицированной геометрии

Настоящий акт составлен по результатам промышленных испытаний процесса сверления стеклопластиковых лонжеронов спиральными сверлами с модифицированными конструктивно-геометрическими параметрами. Испытания проводились в период с 1 марта по 30 апреля 2016 г. в цехе №29 Лопастного завода.

Основание для проведения испытаний – Письмо проректора по НИР Донского государственного технического университета.

Цель испытаний – определение качества, производительности процесса сверления, отверстий в стеклопластиковых лонжеронах ЛНВ вертолета Ми-28 спиральными сверлами с модифицированными конструктивно-геометрическими параметрами, предлагаемыми в качестве замены используемого стандартного инструмента с геометрией по ГОСТ 10903-77.

Объект испытаний – спиральные сверла с модифицированными конструктивно-геометрическими параметрами разработки кафедры «Авиастроение» при ПАО «Роствертол» (автор Е.Г. Чигринец) предназначены для обработки отверстий крепления лопасти к втулке несущего винта в стеклопластиковых лонжеронах ЛНВ вертолета Ми-28. Основным требованием к качеству отверстий является отсутствие расслоений и сколов в местах входа/выхода инструмента. Диаметры и материал сверл соответствуют применяемым инструментам в серийной технологии механической обработки.

Предлагаемые сверла Ø15 мм имели двойную заточку режущей части двух типов: $2\phi=140^\circ$, $2\phi_1=90^\circ$ – тип 1, $2\phi=70^\circ$, $2\phi_1=35^\circ$ – тип 2. У обоих типов инструмента полированы стружечные канавки и подточены перемычки до значения $0,1D_{\text{сверла}}$.

Методика испытаний.

Обработка отверстий велась за один проход без периодического вывода инструмента для удаления стружки, предусмотренного серийной технологией.

Операция сверления 30 отверстий выполнялась на технологических лонжеронах при следующих режимах обработки: $V=7,5$ м/мин, $S=0,2$ мм/об; $V=7,5$ м/мин, $S=0,6$ мм/об; $V=12$ м/мин, $S=0,2$ мм/об; $V=12$ м/мин, $S=0,6$ мм/об. Серийная технология предусматривает режимы $V=7$ м/мин, $S=0,1$ мм/об с периодическим выводом сверла для удаления стружки после врезания на каждые 2 мм длины отверстия (18 выводов для каждого отверстия). В процессе обработки качественно определялся характер стружкообразования и степень ее пакетирования. После окончания процесса сверления с помощью микроскопа МПБ-2 определялись размеры расслоений как максимально поврежденный диаметр относительно номинального диаметра отверстий. Полученные размеры дефектов сравнивались с величиной расслоений при использовании стандартного инструмента. Шероховатость поверхности обработанного отверстия определялась контактным способом с помощью профилометра Taylor Hobson. Износ сверла оценивался после завершения обработки всей серии отверстий с помощью промышленного инструментального микроскопа MarVision MM220.

По результатам испытаний установлено, что применение сверл с двойной заточкой за счет лучшей эвакуации стружки из зоны резания и снижения степени ее пакетирования позволяет снизить размеры расслоений до 0,4–0,8 мм против 1,1–1,5 мм у стандартного инструмента. Шероховатость снижена с Ra 7–8,5 мкм до Ra 5,5–6,2 мкм. Наблюдается округление режущих кромок стандартного сверла и фаска износа по задней поверхности в районе 0,2–0,3 мм. У сверл с двойной заточкой округления режущих кромок не отмечено, фаска износа не превышает 0,1–0,15 мм.

Установлено, что при использовании сверл с модифицированной геометрией отсутствует необходимость использовать цикл глубокого сверления. Инструмент и рекомендуемые режимы обработки позволяют добиться снижения машинного времени обработки одного отверстия до 70% (с 3,2 до 0,9 мин) при повышении показателей качества отверстия по сравнению с серийной технологией.

От ДГТУ:

Доцент к.т.н.
В.В. Сибирский

Е.Г. Чигринец

От ОАО «Роствертол»:

Начальник НИО
Ю.Б. Рубцов

Начальник ОСАТП
С.Б. Родригес