

УДК 621.9.015
DOI: 10.12737/23484

В.Ф. Макаров, д.т.н.,
И.И. Койнов, магистрант, **Р.С. Абзаев**, аспирант,
В.В. Ширинкин, аспирант, **А.Е. Мешкас**, аспирант
(Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29)
E-mail: makarovv@pstu.ru

Особенности диагностики процесса резания при сверлении композиционных материалов*

Проведены исследования зависимостей влияния физических параметров процесса резания (силы резания, виброскорости, шума резания, температуры резания) от режимов резания. Описана методика математического планирования. Представлены графики зависимостей и рекомендации по применению компьютерного стенда диагностики процесса резания для выбора оптимальных режимов резания при обработке композиционного материала марки ВКУ-39.

Ключевые слова: композиционный материал; диагностика; исследование; влияние; физические параметры; оптимальные режимы резания; сверление.

V.F. Makarov, D. Eng.,
I.I. Koinov, Candidate for Master degree, **R.S. Absaiev**, Post graduate student,
V.V. Shirinkin, Post graduate student, **A.E. Meshkas**, Post graduate student
(Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky Avenue, Perm, 614990)

Peculiarities in diagnostics of cutting process at composite material drilling

The paper reports the working problems and their consequences for composite materials drilling, milling and turning. A bench for computer diagnostics of cutting process at composite materials drilling is developed. The dependences researches in cutting physical parameters influence upon different cutting modes on the basis of the analysis of scientists' papers and recommendations and also maximum possibility of equipment and mathematical planning of an experiment are carried out. The procedure of two-factor mathematical planning of an experiment is presented. The diagrams of dependences and description of conclusions and recommendations on the application of the bench for computer diagnostics of a cutting process for the choice of optimum cutting modes at the machining of VCU-39 composite material are obtained.

Keywords: composite material; diagnostics; investigation; influence; physical parameters; optimum cutting modes; drilling.

Развитие авиационной и ракетно-космической техники неразрывно связано с

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (договор №02.G25.310016 от 12.02.13) в рамках реализации Постановления Правительства РФ №218 «О мерах государственной поддержки развития российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

разработкой новых конструктивных решений, прогрессивных инновационных технологий, совершенствованием существующих или созданием новых материалов. Среди этих новых материалов в последнее время большое внимание уделяется разработке композиционных материалов, обладающих уникальными свойствами – при малом весе достаточно большой прочностью.

Производство композитов в мире увеличивается на 35 – 40 % ежегодно.

Композиционные материалы широко используются в конструкциях корпусов изделий ракетно-космической техники, в современных газотурбинных авиационных двигателях типа ПС90-2А, ПД14.

Широкое применение новых композиционных материалов на основе стеклопластиков и углепластиков сдерживается из-за проблем связанных, с механической обработкой, прежде всего, при сверлении отверстий. Это связано с низкой стойкостью режущих инструментов, с обеспечением требуемого качества обработанной поверхности и точности размеров обрабатываемых деталей при сверлении, фрезеровании, точении. Основные дефекты поверхности композиционного материала, при воздействии режущего инструмента, следующие: неравномерная повышенная шероховатость; большая волнистость; вырывы и сколы на торцах; расслоение и вырыв волокна (деламинация), ворсистость; трещины в матрице материала; отклонение сверх допуска формы и взаимного расположения поверхностей.

В научном плане сегодня явно недостаточно работ по установлению закономерностей влияния основных физических явлений процесса резания композиционных материалов на производительность, себестоимость, качество обработки, износостойкость режущих инструментов с учетом автоматизации многоинструментальной обработки на станках с ЧПУ и обрабатывающих центрах. Практически отсутствует научно обоснованная теория стружкообразования, динамики и теплофизики процесса резания композиционных материалов.

Внедрение обработки композитов на станках с ЧПУ и обрабатывающих центрах требует проведения работ по диагностике процесса резания. В связи с этим задача выявления наиболее значимых физических параметров процесса резания при его диагностике весьма актуальна. Появляется возможность не только управления через систему ЧПУ процессом резания по выбранным физическим параметрам, но и предотвращения случайных поломок инструмента, повреждения дорогостоящего оборудования, снижение дефектов поверхностного слоя обработанных деталей.

Во время процесса резания композитов, включающих в свою структуру разнородные по химическому составу и прочности материала матрицы и волокна, вибрация инструмента и заготовки неизбежна, а это приводит к геометрической неточности, снижению стой-

кости инструмента, ухудшению качества обработанной поверхности, увеличению трещинообразования в хрупкой части матрицы заготовки, сколам на торцах детали, деламинации. Поэтому основным направлением диагностирования является анализ величины вибрации и сведение к минимуму не только вибрации, но и шума, сил и температуры резания. Управляющими факторами такого снижения могут служить режимы резания и геометрия режущих инструментов.

Интенсивные исследования в области контроля станков и инструмента ведутся во всем мире: в США – НИСТ, национальная лаборатория Лоуренса в Ливерморе, Ок-Риджская национальная лаборатория, Мичиганский университет, Иллинойский университет, университет шт. Мэриленд, фирмы «Мониторникс», «Ингерсолл миллинг машин» и TPS; в Канаде – Национальный исследовательский совет Канады, университет британской Колумбии, университет Виктории и фирма «Мемекс электроникс». В Европе в области контроля станков и инструмента имеют активные программы в Германии RWTH Aachen, университет Пассау, институт Фраунгофера, фирмы «Роберт Бош», «Прометек», исследовательский институт WZL и Ганноверский лазерный центр; в Испании – фирмы «Текникер», «Соралюче», «Икерлан», «Данобат», «Идеко»; во Франции – фирмы Giat и Objectif; в Греции – фирмы «Грау» и «Эпсилон»; в Италии – фирмы «Фидия» и ТХТ; в Великобритании – Лидский, Бирмингемский и Ноттингемский университеты; в Швейцарии – фирмы «Кистлер Инструменте» и «Гиндель Гирс»; в Венгрии – Венгерская академия наук. В Японии активные программы имеют следующие организации: университет Нагойи, университет Кобе, университет Кейо, исследовательский центр материалов фирмы «Мицубиси», компания «Хитачи сейки машин тул» и фирма NTN.

Во многих странах созданы центры по исследованию и диагностике механической обработки композиционных материалов. Непредвиденный выход из строя оборудования и инструмента по различным причинам приводит к большим издержкам производства на машиностроительных предприятиях. Поэтому резко вырос уровень активности исследований в области контроля процессов механической обработки и инструмента (рис. 1) [1]. Анализ диаграммы показывает, что основная деятельность разработчиков диагностических систем направлена на контроль износа инструмента

или интенсивности его износа в любой текущий момент времени процесса обработки резанием.

Очевидно, что эффективность диагностики в основном определяется информативностью используемых диагностических признаков, их зависимостью от условий обработки.

В США использование систем данного класса позволило (в среднем) на 30 % повысить производительность обработки; на 50 % увеличить срок службы станков (в первую очередь – элементов шпиндельной бабки); на 30 % увеличить износостойкость инструмента. В частности, использование таких систем позволило при создании самолета F18 сэкономить 1 млрд. долларов за 10 лет.



Рис. 1. Использование различных диагностических признаков при анализе процессов, происходящих при механической обработке композиционных материалов резанием

Компании, успешно применяющие вибро-диагностические системы в своем производстве: Boeing, Ingersoll, Tool Company, Caterpillar, General Electric, Rolls Royce, Kovosvit A.S. и др.

В Пермском национальном исследовательском политехническом университете на кафедре «Инновационные технологии машиностроения» для решения поставленной выше задачи разработан комплексный компьютерный центр диагностики процесса резания (рис. 2).

На рис. 3 представлен центр компьютерной диагностики процесса резания при сверлении композиционных материалов.

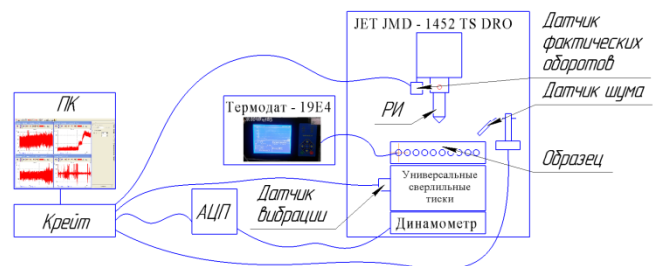


Рис. 2. Принципиальная схема для измерения и анализа физических параметров процесса резания при сверлении композиционных материалов

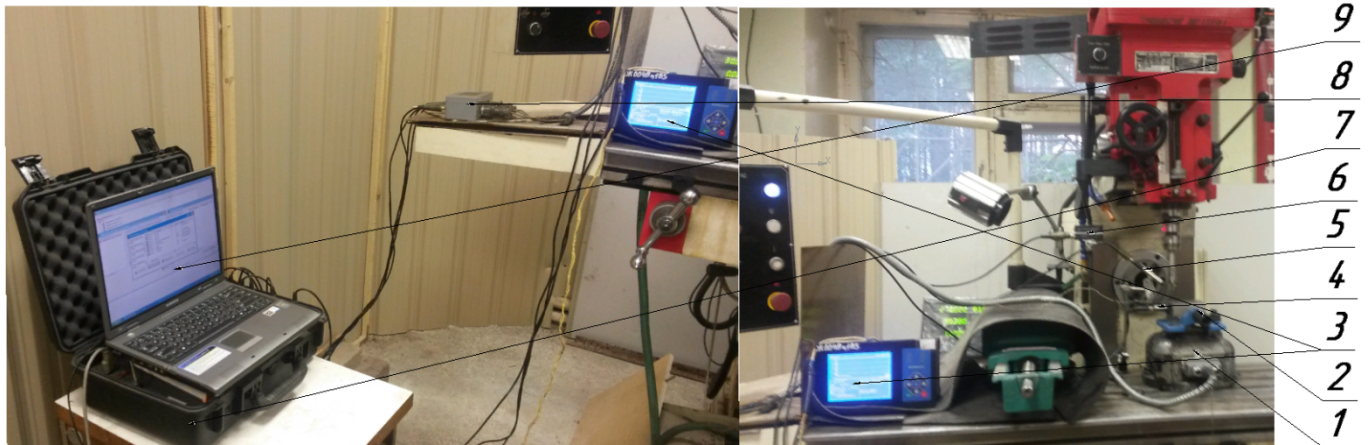


Рис. 3. Стенд компьютерной диагностики процесса резания при сверлении композиционных материалов

В состав комплексного центра входят следующие элементы:

1 – Динамометр УДМ – 400 с тензометрическими датчиками – обеспечивает измерение составляющих силы резания P_z , P_x , P_y .

2 – Обрабатываемые образцы из композиционных материалов.

3 – Регулятор температуры Термодат-19Е4 – предназначен для измерения температуры

по заданной программе.

4 – Датчик вибрации ВД-03 – установлен на приспособлении для образцов (неподвижную губку универсальных сверлильных тисков) и предназначен для измерения вибрации процесса резания при сверлении.

5 – Измеритель шума – микрофон предназначен для измерения характеристик шума резания.

6 – Датчик фактических оборотов шпинделя станка.

7 – Крейт – предназначен для коммутации входных сигнальных линий, платы аналоговой фильтрации, выходных сигнальных линий, АЦП, обеспечения их электропитанием.

8 – Аналого-цифровой преобразователь – предназначен для преобразования аналоговых сигналов в цифровой вид.

9 – «Камертон» – пульт управления системой регистрации и контроля параметров оборудования включает в себя персональный компьютер, который через АЦП производит регистрацию и анализ технических параметров оборудования.

Система регистрации и анализа сигналов представляет собой программу, которая выполняет регистрацию, обработку и оценку сигналов от датчиков, с отображением всех результатов на мониторе и оповещением персонала.

Методика установления зависимости физических параметров процесса резания (сила резания, виброскорость, шум резания, температура) предусматривает применение метода математического планирования экспериментов [2, 3]. Для описания этой зависимости физических параметров процесса резания от независимых переменных скорости резания v , м/мин и подачи S , мм/об. Выбираем эксперимент 2^2 . Исследуемыми зависимыми параметрами являются сила резания, виброскорость, шум резания, температура резания.

В качестве математической модели исследуемого параметра (y_i) принято уравнение множественной регрессии:

$$y = M\{y_i\} = b_0 + \sum_i b_i x_i + \sum_j b_j x_j + \sum_{i,j} b_{ij} x_i x_j, \quad (1)$$

где y – значение исходного фактора (P_y); b_0 – свободный член; b_1, b_2, \dots, b_n – коэффициенты уравнения.

На основе априорных данных о характере искомой зависимости принят следующий ее вид на примере силы P_y :

$$P_y = CV^m S^p. \quad (2)$$

Это уравнение (2) после логарифмирования и введения членов, учитывающих взаимодействие факторов, примет вид:

$$y = \ln P_y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2. \quad (3)$$

Были выбраны основные уровни факторов, близкие к применяемым в практике, а интервалы варьирования – исходя из реальных пределов колебаний значений факторов (табл. 1).

Исследования процесса сверления композиционного материала проводились на универсально-фрезерном станке мод. JET JMD-1452 TS DRO. Обрабатывались образцы длиной 80 мм, шириной 27 мм, высотой (толщиной) 6,0 мм, обрабатываемый материал – углепластик ВКУ-39 по ТУК55/13–615 АО ПМ «Машиностроитель». Каждый опыт повторялся от 2 до 3 раз в зависимости от величины разброса получаемых данных. Инструмент – спиральное сверло TIZ 0160200N Wleritlo NWka HSSCo TIN $\varnothing = 2,0$ мм N (особенности: угол в плане $2\varphi = 118^\circ$; материал P6M5K5; износостойкое покрытие TIN – предотвращает налипание обрабатываемого материала). Обработка образцов производилась без СОЖ, так как взаимодействие жидкостей с композитами ведет к разрушению структуры и не допускается по ТУ.

1. Кодовые обозначения переменных

Уровни варьирования	Независимые переменные, влияющие на y			
	v , м/мин	$\ln v$	S , мм/об	$\ln S$
	X_1	$\ln X_1$	X_2	$\ln X_2$
Верхний +1	28,60	3,353	0,142	-1,952
Нижний -1	6,30	1,841	0,045	-3,101
Нулевой 0	17,45	2,859	0,0935	-2,370
Интервал варьирования ΔX_i	11,15	-	0,0485	-

Преобразование независимых переменных X_i к безразмерным переменным x_i проводится с помощью уравнения преобразования, где за единицу нового масштаба принято выражение $\frac{(\ln X_{i_{\max}} - \ln X_{i_{\min}})}{2}$.

$$x_i = \frac{2(\ln X_i - \ln X_{i_{\min}})}{\ln X_{i_{\max}} - \ln X_{i_{\min}}} + 1. \quad (4)$$

После подстановки x_i вместо X_i в уравнение (3) примет вид:

$$y = \ln P_y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2. \quad (5)$$

Матрица планирования для двух факторов приведена в табл. 2. Коэффициенты регрессий рассчитывались методом математического планирования экспериментов на ПЭВМ.

Реализация плана позволила получить следующую математическую модель:

$$y = \ln P_y, \ln = 1,587 - 0,593x_1 + 0,112x_2 - 0,005x_1 x_2. \quad (6)$$

Проверка значимости коэффициентов b_i проходила с помощью критерия Стьюдента [$t_{кр} = 2,3$]_(8; 0,05). Для данной модели получили следующие значения критериев: $t_0 = 69,82$; $t_1=26,07$; $t_2=4,91$; $t_{12}=0,22$. Если $t_i > t_{кр}$, то гипотеза отвергается и коэффициент b_i признается значимым [4]. В данном случае, незначимым коэффициентом является b_{12} . В результате математическая модель получила следующий вид:

$$y = \ln P_y \ln = 1,587 - 0,593x_1 + 0,112x_2. \quad (7)$$

2. Матрица планирования для двух факторов 2²

№ опыта	X ₀	X ₁	X ₂	X ₁ X ₂	y
1	+	-	-	+	y ₁
2	+	+	-	-	y ₂
3	+	-	+	-	y ₃
4	+	+	+	+	y ₄

Проверка адекватности модели по критерию Фишера показала, что данное уравнение (с уровнем значимости 0,05) описывает процесс адекватно. Так как $F_{расч.} = 0,048 < F_{кр.(8; 0,05)} = 5,3$, то уравнение адекватно [4].

После подстановки значений x_i по формуле (4) и потенцирования получаем степенную зависимость для натуральных величин:

– для радиальной составляющей силы резания P_y , Н:

$$P_y = \frac{9,807 \cdot e^{4,117} \cdot S^{0,195}}{V^{0,785}} = \frac{601,903 \cdot S^{0,195}}{V^{0,785}}. \quad (8)$$

Аналогичным образом были получены остальные математические модели физических параметров процесса резания:

– для виброскорости, м/с:

$$B = e^{2,424} \cdot V^{0,298} \cdot S^{1,266} = 11,291 \cdot V^{0,298} \cdot S^{1,266};$$

– для шума резания, дБ:

$$Ш = e^{5,258} \cdot V^{0,12} \cdot S^{0,397} = 85,627 \cdot V^{0,12} \cdot S^{0,397};$$

– для температуры резания, °С:

$$T = e^{3,388} \cdot V^{0,021} \cdot S^{0,082} = 29,607 \cdot V^{0,021} \cdot S^{0,082}.$$

Полученные остальные математические модели, отражающие зависимость основных физических параметров процесса резания от режимов резания, являются значимыми, адекватными и пригодными для дальнейших исследований процесса резания композиционных материалов:

– для виброскорости:

$$F_{расч} = 4,532 < F_{кр.(8; 0,05)} = 5,3 \text{ – уравнение адекватно};$$

– для шума резания:

$$F_{расч} = 4,735 < F_{кр.(8; 0,05)} = 5,3 \text{ – уравнение адекватно};$$

– для температуры:

$$F_{расч} = 2,289 < F_{кр.(8; 0,05)} = 5,3 \text{ – уравнение адекватно}.$$

По полученным математическим моделям построены графики зависимостей (рис. 4 – 11).

На графике (рис. 4) при увеличении скорости резания от 6 до 28 м/мин радиальная составляющая силы резания P_y снижается от 97 до 24 Н. Это объясняется тем, что при увеличении скорости возрастает температура, снижается пластическая деформация, связующий материал образца становится пластичным, поэтому затрачивается меньше сил на обработку.

На графике (рис. 5), с увеличением подачи от 0,045 до 0,142 мм/об радиальная составляющая силы резания P_y увеличивается от 24 до 97 Н. Это объясняется тем, что при увеличении подачи инструмент встречает сопротивление большего числа волокон, не успевает перерезать все нити композита, а выдавливает их и вырывает, тем самым ухудшает качество обработанной поверхности.

На графике (рис. 7) видно, что увеличение скорости резания от 6,3 до 28,6 м/мин приводит к увеличению вибрации от 0,36 до 2,4 м/с. С увеличением подачи от 0,045 до 0,142 мм/об также увеличивается вибрация от 0,36 до 2,4 м/с. Это может привести к увеличению числа ударов боковых режущих кромок режущего инструмента и, в конце концов, к быстрому износу и поломке сверла.

На графике (рис. 8) с увеличением скорости резания от 6,3 до 28,6 м/мин при постоянной глубине резания, шум резания увеличивается от 30 до 56 дБ, но при постоянной подаче изменение шума резания меняется незначительно.

На графике (рис. 9), видно, что с увеличением подачи от 0,045 до 0,142 мм/об при постоянной глубине резания, шум резания увеличивается от 30 до 56 дБ.

На графике (рис. 10) представлено увеличение температуры от 24,0 до 27,3 °С соответственно при увеличении скорости резания от 6,3 до 28,6 м/мин. Это объясняется тем, что увеличивается трение одних и тех же участков обрабатываемой поверхности за меньшее количество времени, чем при меньших скоростях резания.

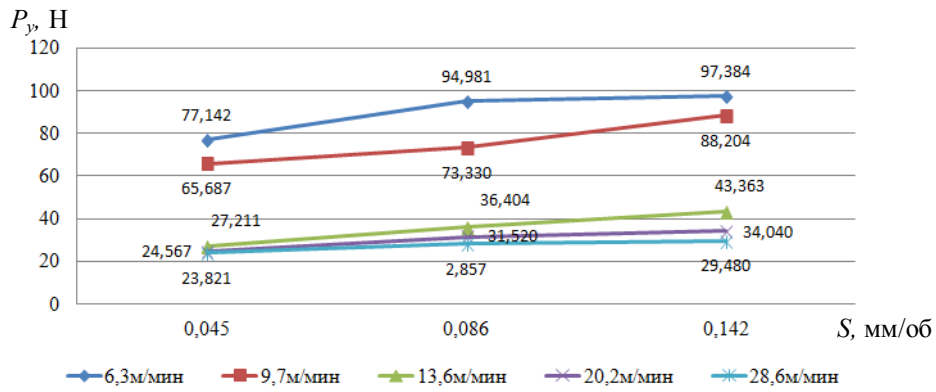


Рис. 4. График зависимости радиальной составляющей силы резания P_y от подачи при различных скоростях

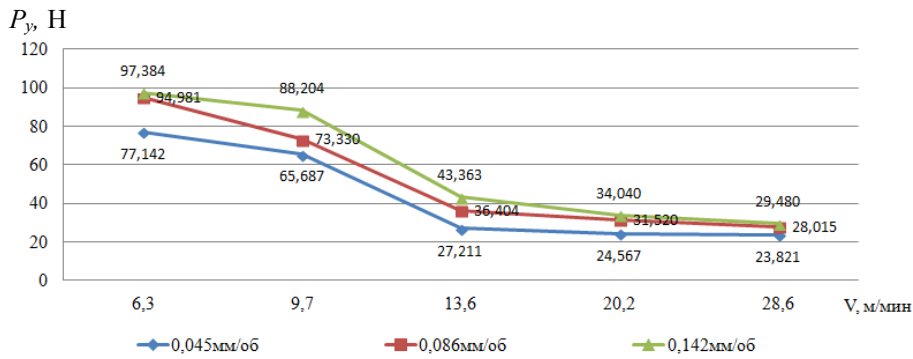


Рис. 5. График зависимости радиальной составляющей силы резания P_y от скорости резания при различной подаче

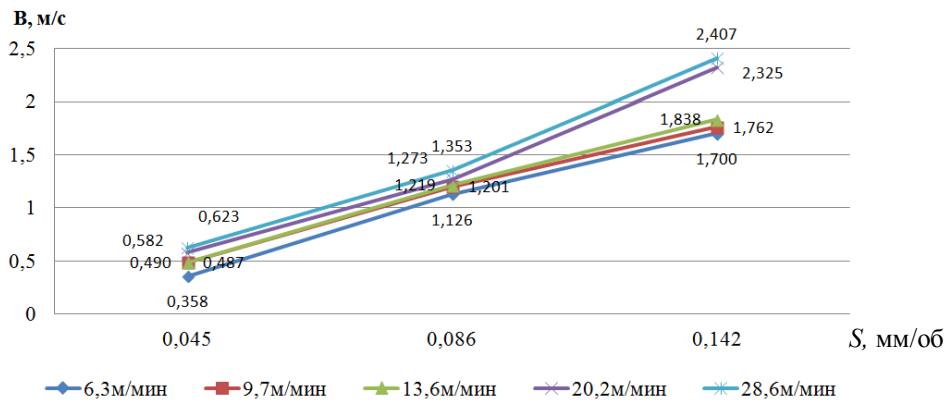


Рис. 6. График зависимости виброскорости от подачи при различных скоростях

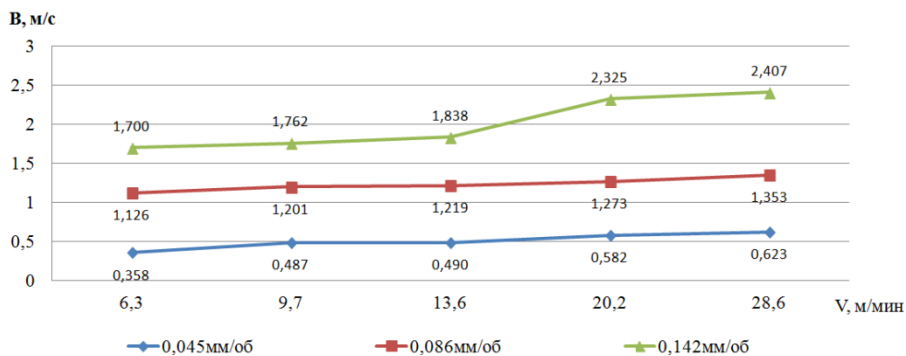


Рис. 7. График зависимости виброскорости от скорости резания при различной подаче

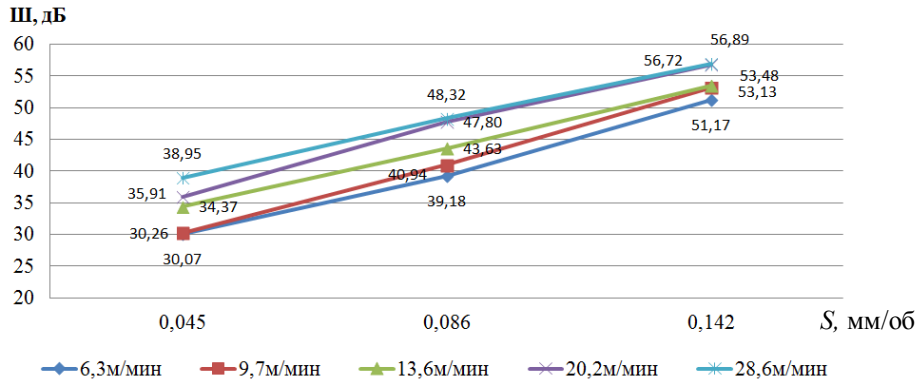


Рис. 8. График зависимости шума в зоне резания от подачи при различных скоростях

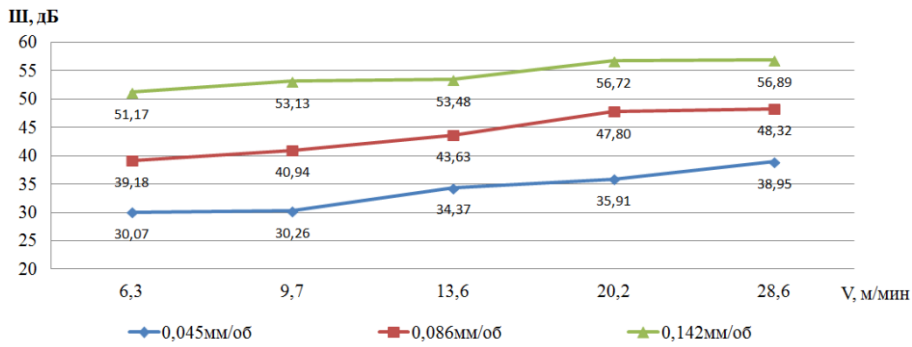


Рис. 9. График зависимости шума в зоне резания от скорости резания при различной подаче

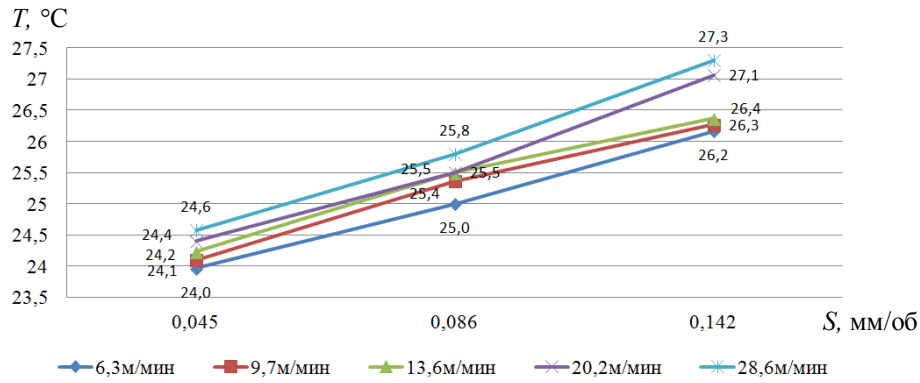


Рис. 10. График зависимости температуры в зоне резания от подачи при различных скоростях

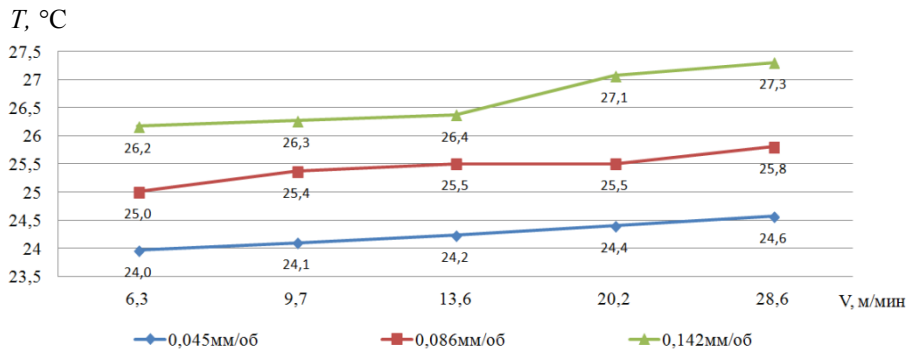


Рис. 11. График зависимости температуры в зоне резания от скорости резания при различной подаче

По полученному графику (рис. 11) можно сделать вывод, что изменение подачи при постоянной глубине резания, влияет на изменение температуры в зоне резания. При увеличении подачи от 0,045 до 0,142 мм/об температура возрастает от 24,0 до 27,3 °С. Это объясняется тем, что с увеличением подачи, увеличивается трение волокон по режущей кромке и передней поверхности, что повышает температуру резания. В то же время увеличение подачи сопровождается сколами торцов и вырывами нитей из обрабатываемого материала, что снижает качество обработанной поверхности деталей.

Выводы

1. Применение компьютерного стенда диагностики позволяет сократить трудоемкость и материалоемкость стойкостных испытаний.

2. Установлено, что при сверлении отверстий Ø 2 мм в углепластике ВКУ–39 с увеличением скорости резания v от 6,3 до 28,6 м/мин. Уменьшается радиальная составляющая силы резания P_y , от 97 до 24 Н; увеличивается виброскорость V от 0,36 до 2,4 м/с; шум резания Π – от 30 до 56 дБ; температура T – от 24,0 до 27,3 °С.

3. С увеличением подачи S от 0,045 до 0,142 мм/об увеличивается радиальная составляющая силы резания P_y , от 24 до 97 Н; виброскорость V – от 0,36 до 2,4 м/с; шум резания Π – от 30 до 56 дБ; температура T – от 24,0 до 27,3 °С.

4. Получены математические модели зависимости в диапазоне скорости резания v от 6,3 до 28,6 м/мин и подачи S от 0,045 до 0,142 мм/об, которые позволяют определять оптимальные режимы сверления композиционного материала марки ВКУ-39 по ТУ К55/13–615 АО ПМ «Машиностроитель».

5. В результате применения разработанного стенда появилась возможность: управлять процессом резания на станке с ЧПУ с помощью диагностики; выбирать наиболее рациональную геометрию и марку материала; назначать наиболее оптимальные режимы резания; предупреждать возможную поломку инструмента и дорогостоящее оборудование.

6. С точки зрения оптимизации процесса резания, чем меньше вибрация, шум, сила резания, тем более благоприятные условия наблюдаются в зоне резания, и тем выше стойкость режущих инструментов, выше производительность и меньше себестоимость обработки.

Заключение

В результате анализа результатов проведенных экспериментов установлено, что для повышения эффективности работы станка, повышения стойкости сверл необходимо минимизировать значения вибрации, шума и силы резания. При этих условиях оптимальным режимом резания является режим со значениями: $v = 28,6$ м/мин; $S = 0,045$ мм/об. При этом $P_{ymin} = 2,429$ Н; $V_{min} = 0,623$ м/с; $\Pi_{min} = 38,95$ дБ; $T_{min} = 24,6$ °С.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барзов, А.А., Логинов, В.П., Горелов, В.А., Галиновский, А.Л., Шашурин, В.Д. Повышение надежности технологических процессов методами эмиссионной диагностики: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 30 с.

2. Кацев, П.Г. Статистические методы исследования режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1974. – 231 с.

3. Макаров, В.Ф. Выбор и назначение оптимальных условий протягивания заготовок из труднообрабатываемых материалов: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 396 с.

4. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

5. Макаров, В.Ф., Шохрин, А.В., Потягайло, О.Н. Управление процессом точения деталей ГТД на станках с ЧПУ по физическим параметрам процесса резания // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 7. – С. 6–9.

REFERENCES

1. Barzov, A.A., Loginov, V.P., Gorelov, V.A., Galinovsky, A.L., Shashurin, V.D. *Reliability Increase in Technological Processes by Emission Diagnostics Methods*: textbook. – M.: Publishing House of Bauman STU of Moscow, 2001. – pp. 30.

2. Katsev, P.G. *Statistical Methods of Cutter Investigations*. – M.: Mechanical Engineering, 1974. – pp. 231.

3. Makarov, V.F. *Choice and Definition of Optimum Conditions of Blank Stretching of Hard-to-Machine Materials*: textbook. – Perm: Publishing House of Perm State Technical University, 2008. – pp. 396.

4. Spiridonov, A.A. *Experiment Planning at Technological Processes Investigation*. – M.: Mechanical Engineering, 1981. – pp. 184.

5. Makarov, V.F., Shorkhin, A.V., Potyagailo, O.N. Management of GTE parts turning process on NC machines according to cutting physical parameters // *Aerospace Equipment and Techniques*. – 2010. – № 7. – pp. 6–9.

Рецензент д.т.н. В.И. Свирицев