

УДК 621.95.01: 678.5

В.А. Колесник, Д.В. Криворучко, д-р техн. наук, Сумы, Украина  
Д. Митал, PhD, Прешов, Словацкая республика

## **ТЕМПЕРАТУРА РЕЗАНИЯ ПРИ СВЕРЛЕНИИ ПАКЕТОВ УГЛЕПЛАСТИК/ТИТАНОВЫЙ СПЛАВ**

*В статті виконано аналіз існуючих методів вимірювання температури для різних конструкційних матеріалів в тому числі і композиційних. Показано, що визначення температури на свердлі, що обертається, при різанні неелектропровідних матеріалів є задачею, що потребує подальшого розв'язання. Метою статті є розроблення способу вимірювання та дослідження температури різання методом штучної термопары при свердлінні пакетів вуглепластик/титановий сплав. Використовуючи сучасну елементну базу розроблено спосіб вимірювання температури, за яким система оброблення інформації обертається разом зі свердлом, а данні передаються на нерухомий приймач за допомогою радіохвиль. У дослідженому діапазоні режимів різання температура різання в вуглепластику складала 100-320 °С, а в шарі титанового сплаву - 500-900 °С. Встановлено, що при малій товщині шарів (приблизно 5мм) рівень температури у вуглепластиковому шарі більше залежить від режиму різання, а в титановому шарі - від співвідношення товщини шару і хвилинної подачі та швидкості різання.*

*В статье выполнен анализ существующих методов измерения температуры различных конструкционных материалов, в том числе и композиционных. Показано, что определение температуры на вращающемся сверле при резании неэлектропроводных материалов является задачей, требующей дальнейшего решения. Целью статьи является разработка способа измерения и исследование температуры резания методом искусственной термопары при сверлении пакетов углепластик/титановый сплав. Используя современную элементную базу разработан способ измерения температуры, согласно которого система обработки информации вращается вместе со сверлом, а данные передаются на неподвижный приемник с помощью радиоволн. В исследованном диапазоне режимов резания температура резания в слое углепластика составила 100-320 °С, а в слое титанового сплава - 500-900 °С. Установлено, что при малой толщине слоев (примерно 5мм) уровень температуры в углепластиковом слое в основном зависит от режима резания, а в слое титанового сплава - от соотношения толщины слоя и минутной подачи, а также скорости резания.*

*This article gives an analysis of the existing methods for measuring the cutting temperature during machining of various structural materials including composites. It is shown that the determination of the temperature on the rotating drill when drilling non-conductive materials is a task that requires a further decision. The aim of the article is to provide a method for measuring and research of the cutting temperature by artificial thermocouple during drilling of CFRP / titanium stacks. Using modern electronic hardware authors provide a method of temperature measurement according to which the temperature handling system rotates with the drill bit and the collected data is transmitted to the fixed receiver via radio waves. In the investigated range of cutting conditions cutting temperature in the CFRP layer was 100-320 °C, and in a titanium layer was 500-900 °C. It was found that at a small layer thickness (about 5 mm) the cutting temperature in CFRP layer mainly depends on the cutting conditions and in titanium layer it depends on the ratio of the layer thickness and the minute feed as well as on cutting speed.*

*Постановка проблемы.* В процессе резания происходят интенсивные процессы тепловыделения и теплопередачи, формирующие сложное температурное поле в инструменте, заготовке и стружке [1]. Температура оказывает влияние на стойкость инструмента и качество обработанной поверхности, и должна учитываться в исследованиях процесса резания. Особенно остро этот вопрос стоит при сверлении пакетов углепластик/титановый сплав, поскольку и титановый сплав и углепластик весьма чувствительны к повышенной температуре, хотя критические значения для каждого слоя сильно отличаются. В этой связи, измерение температуры в процессе сверления является важной научно-технической задачей. На сегодняшний день существует как традиционные, так и современные методики, позволяющие производить измерение температуры резания.

*Анализ последних исследований.* Известные в настоящее время методики и техники измерения температуры могут быть классифицированы по методам измерения на калориметрический, сопротивления, термопары, термофизический, термографический методы. Наиболее распространенными методами при исследовании процессов механической обработки являются калориметрический, термофизический, термографический методы и метод измерения термопарой.

Последними достижениями в этой области является применение различных пирометров, инфракрасных камер и телевизоров. Вместе с тем закрытость зоны резания, особенно при сверлении, является существенным ограничением этого метода [2]. В ряде исследований проблему закрытости зоны резания решают путем получения информации о тепловом излучении с помощью оптоволокна, помещаемого непосредственно в зону резания. Так в ходе опытов по сверлению алюминиевых сплавов [3] и пластиков [4] были измерены распределение температуры в обрабатываемый материал путем регистрации интенсивности инфракрасного излучения с помощью оптоволокна, размещенного в специальных отверстиях на удалении от 0,2 до 1 мм от стенки обрабатываемого отверстия. В результате была измерена температура в диапазоне от 20°C до 70°C с точностью  $\pm 0,2^\circ\text{C}$  при скорости резания от 6 до 15 м/мин.

Метод термопары остается, пожалуй, самым востребованным и в настоящее время. В сочетании с расчетными методами он позволяет достаточно дешево и с приемлемой точностью получить информацию о температуре резания. Так в ряде исследований при сверлении алюминиевого (A17075-T651), титанового сплавов (Ti6Al4V) и сталей (AISI 4140) был использован метод искусственной термопары для измерения изменения температуры по глубине отверстия [5], путем закладки не разрушаемой термопары К-типа в отверстия, на удалении 0,2 мм от стенки обрабатываемого отверстия, что позволило установить влияние покрытий

(TiAlN, CrCN или TiCN) на стойкость твердосплавного сверла. Bagci and Ozcelik [6-8], определили температуру сверления стали AISI 4140 и алюминиевого сплав Al7075-T651 на неподвижном сверле, методом искусственной термопары, разместив ее в сверле в отверстии для подачи СОЖ с последующим уточнением температурного поля методом конечных элементов. При варьировании режимов резания была измерена максимальные температура для AISI 4140 и Al7075-T651 в диапазоне от 165°C до 420°C и от 160 °C до 240 °C, соответственно. Battaglia, Kusiak и Kalidas, S., Karoog, S. G. [9, 10] использовали метод искусственной термопары, размещенной в заготовке, для оценке количества поглощаемого тепла при изучении износа сверла в процессе высокоскоростного сверления. J.L. Merino-Perez, R. Royer и др. [11] предложили комбинированный метод измерения температуры при сверлении углепластика, сочетающий метод искусственной термопары размещенной в детали и термографический метод на выходе сверла из отверстия, что позволило соотнести температуру измеренную термопарой и инфракрасной камерой. Полученные результаты показали расхождение данных этих двух методов измерения в пределах только 10% при скоростях резания в диапазоне от 49,8 м/мин до 199,2 м/мин при подаче 0,05 мм/об, но не позволили сделать вывод о динамике изменения температуры в процессе резания. С. Ramirez, G. Poulachon и др. исследовали влияние износа твердосплавного сверла при сверлении углепластика методом срезаемой искусственной термопары К-типа, предварительно заформованной в углепластик на разной глубине. Было установлено, что температура резания углепластика вблизи поперечной режущей кромки по мере износа изменялась в сторону увеличения от 100°C до 250 °C, а при вершине сверла от 480°C до 525°C [12].

Наиболее значимыми факторами, которые следует учитывать при выборе метода измерения температуры являются: диапазон температур; надежность датчика; разрыв температурного поля датчиком; тип сигнала/чувствительность к шуму; инерционность; погрешность измерений. , которые должны быть ранжированы по следующим критериям: (1) простота калибровки; (2) работоспособность; (3) стоимость; и (4) размер. Где под неопределенностью понимается дисперсия значений, которые могли бы обоснованно отнести к измеряемой величине (табл. 1) [13].

Таким образом, измерение температуры методом искусственной термопары остается наиболее достоверным и информативным при исследовании процессов механической обработки с закрытой зоной резания. *Не решенная часть общей проблемы.* Вместе с тем, использование этого метода при изучении влияния технологических параметров обработки на температуру резания, износ инструмента, точность и качество обработанной поверхности ограничивается тем, что в реальных условиях сверло вращается с достаточно большой частотой, что делает невозможным применение

традиционных схем регистрации данных. Это не позволяет измерить температуру непосредственно на вращающемся сверле и получить данные в реальных условиях его работы.

Таблица 1 – Сравнение методов измерения

Критерии	Метод измерения		
	Термопара	Термографический	Термофизический
Предел измерения	0 °С -3000°С	20 °С – 5000 °С	20 °С – 2000 °С
Разрешающая способность	500 мкм	20 мкм	100 мкм
Временное разрешения	100 мс	мс до мкс	-
Легкость установки	легко	сложно	средней сложности
Основной источник погрешности	точка контакта	коэффициент излучения	-
Стоимость	низкая	средняя - высокая	низкая

*Цель статьи.* Разработать способ измерения температуры на вращающемся сверле и изучить влияние режимов сверления на температуру резания при сверлении пакетов углепластик/титановый сплав.

*Основной материал.* Идея работы состоит в измерении температуры на вращающемся сверле методом искусственной термопары, размещенной в непосредственной близости от режущей кромки. Для этого была разработана система беспроводной передачи данных от датчика (термопары К-типа диаметром 0,6 мм), размещенного на вращающемся сверле на неподвижный персональный компьютер (ПК). Блок регистрации информации имеет независимый источник питания и закрепляется непосредственно на вращающейся оправке. Он включает в себя устройства регистрации термоЭДС, оцифровки, накопления и Bluetooth передачи цифровых данных (рис. 1). Неподвижный приемник принимает эти данные и через USB канал передает их на ПК.

Устройство регистрации термоЭДС представляет из себя нормирующий усилитель с компенсацией холодного спая. Регистрация и передача данных происходит с частотой 200 измерений в секунду. Погрешность измерения температуры не превышала 0,1°С. Для исключения возможности повреждения термопары титановой стружкой в процессе сверления было использовано сверло с отверстиями для подачи СОЖ. Через одно из таких отверстий термопара была выведена на заднюю поверхность сверла. В дальнейшем спай был заложен с специально обработанную канавку, которая позволила приблизить термопару к

зоне резания без ущерба для прочностных характеристик режущего клина (рис. 2). Канавка была заполнена высокопрочной термостойкой смолой, которая после застывания обеспечивает фиксацию и сохранность термопары, предохраняя ее от абразивного воздействия фрагментов стружки.

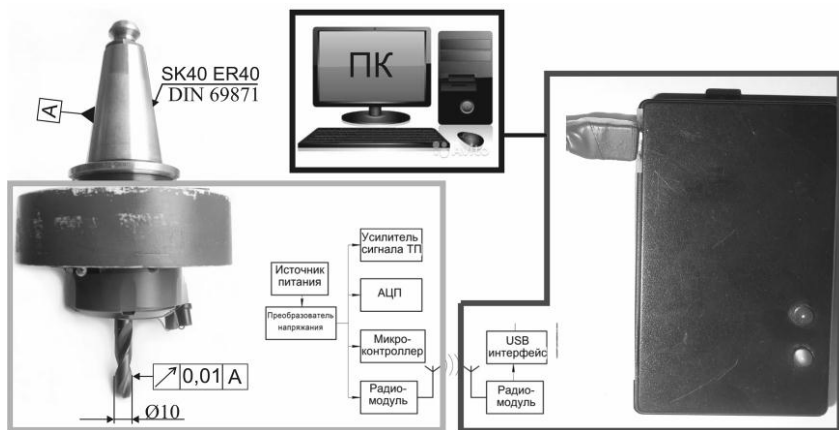


Рисунок 1 – Структурная схема устройства регистрации температуры на вращающемся сверле

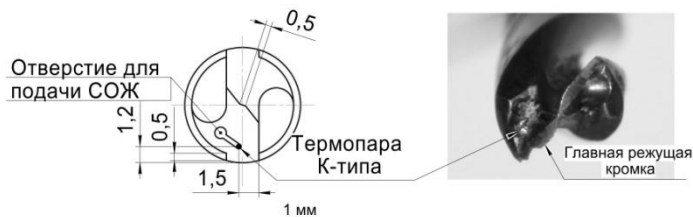


Рисунок 2 – Схема размещения термопары в сверле Ø10 мм

В силу того, что место закрепления термопары удалено на некоторое расстояние от режущей кромки действительное значение температуры резания оценивалось расчетным путем. Для этого методом конечных элементов с использованием пакета ANSYS решена задача нестационарной теплопроводности и определена связь максимальной температуры на режущей кромке с температурой в месте расположения термопары и

временем резания. Сделано допущение, что температура перемычки составляет 30% температуры в вершине сверла (рис. 3). Температура вдоль режущей кромки изменяется линейно. Температура хвостовика равна 20 °С, а теплообмен с окружающей средой ничтожно мал. Теплофизические свойства однокарбидного твердого сплава приняты по [14].

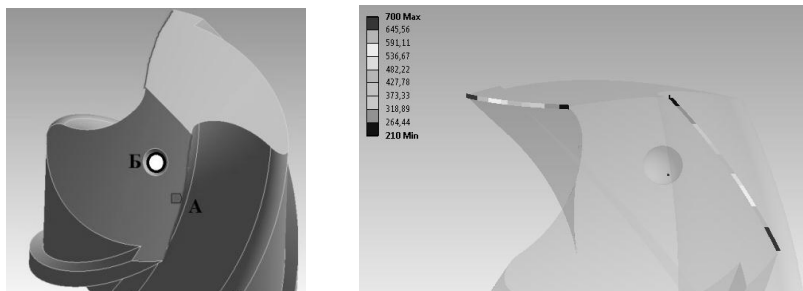


Рисунок 3 – Место закладки термопары и распределение температуры (°С) на режущей кромке сверла в его КЭ модели

Полученная связь температуры резания и термопары представлена графически на рис. 4. Можно заметить, что температура в месте регистрации составляет в установившемся состоянии 40% температуры в вершине сверла. В начальные моменты времени, пока процесс нестационарный, это соотношение еще меньше. Аппроксимируя полученные численные данные методом наименьших квадратов температура резания  $T_{р.к.}$  в момент времени  $t$  от момента касания сверлом заготовки может быть определена выражением

$$T_{р.к.} = \frac{(T_0 - 6,21 \cdot 10^{-2} \cdot (71,5t^{0,284} + 20))}{1,87 \cdot 10^{-3} \cdot (71,5t^{0,284} + 20)},$$

где  $T_0$  - температура, измеренная в месте закладки термопары, °С.

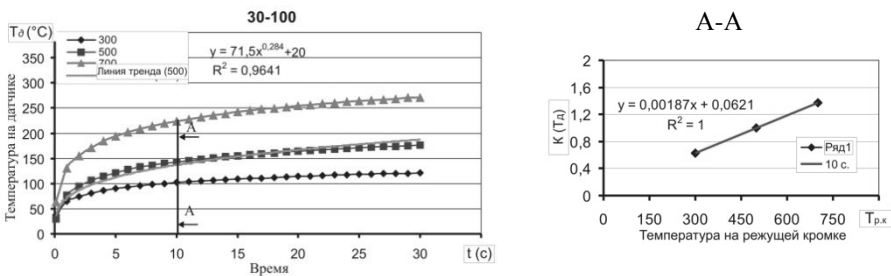


Рисунок 4 – Зависимость температуры в месте закладки термопары от температуры резания и времени измерения

Исследования температуры проводились при сверлении пакета углепластик/титановый сплав. Пакет состоял из листа титанового сплава марки BT-1-0 толщиной 5 мм твердостью 170 НВ пределом прочности 450 МПа плотностью 4,5 г/мм<sup>3</sup> модулем упругости 113 ГПа и температурой плавления 1600°C. На поверхности листа размещался слой углепластика, который был изготовлен методом послойной укладки однонаправленного углеродного волокна по схеме 0°/90° с последующей вакуумной формовкой при температуре 35 °С в течении 5 часов. Для вакуумной формовки был использован вакуумный мешок Securlon L-500Y (Airtech). Герметичность пакета была обеспечена специальным герметикам AT 199. Вакуум 0,3 10<sup>-3</sup>Па, обеспечивался форвакуумным насосом 2НВР-5ДМ. В качестве матрицы была использована эпоксидная смола Larit 285. Массовая доля углеродного волокна в готовых образцах составила 60%, толщина одного слоя волокна равнялась 0,15 мм, а средний диаметр волокна – 10 мкм. Толщина пластины углепластика после шлифования составила 5 мм.

Сверление выполнялось на 3 координатном вертикально – фрезерном станке FADAL VMC 4020 с системой ЧПУ Fanuc Oi-MC. Экспериментальная установка состояла из станка (1), цанговой оправки (2), системы для измерения температуры на вращающемся сверле Ø10 (2φ=140°) (3), динамометра УДМ 600 (4), АЦП LTR 212 (5), ПК (6) (рис. 5).

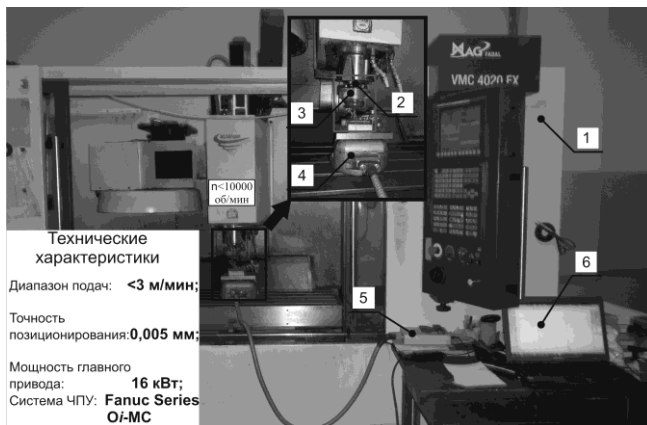


Рисунок 5 – Экспериментальная установка

В ходе эксперимента было выполнено сверление пакета углепластик/титановый сплав на 5 режимах с варьированием скорости резания в диапазоне от 15 м/мин до 65 м/мин и подачей от 0,02 мм/об до 0,08 мм/об. Сверление с каждым новым режимом выполнялось новым

сверлом, что позволило исключить влияние износа на измеряемые параметры.

Полученный характер изменения температуры резания в процессе сверления является характерным для всех случаев (рис. 6). Можно выделить шесть основных этапов. На первом этапе (от 0 до 3 мм глубины отверстия) происходит касание поперечной режущей кромки верхнего слоя пакета и полное врезание главной режущей кромки сверла. Участок от 0 до 1 мм для всех режимов резания характеризуется ростом осевой силы. Максимальные значения температуры резания на этом участке наблюдается при  $V=65$  м/мин и  $S=0,08$  мм/об ( $185$  °C), а минимальное при  $V=15$  м/мин и  $S=0,08$  мм/об ( $60$  °C). На втором характерном участке выделенного этапа происходит дальнейшее врезание главной режущей кромки в углепластик. При сверлении участка от 1 до 3 мм глубины отверстия температура резания продолжают расти. Максимальные значения достигаются при  $V=65$  м/мин и  $S=0,08$  мм/об –  $290$ °C (прирост  $+57\%$ ), а минимальные значения достигаются при  $V=15$  м/мин и  $S=0,08$  мм/об –  $102$  °C (прирост  $+70\%$ ). Осевая сила также увеличивается на величину от  $14\%$  до  $62\%$  в зависимости от режимов резания. Столь высокое возрастание температуры может быть связано с низкой теплопроводностью углепластика, малым количеством тепла, отводимым в стружку и как следствие его аккумулялирование в инструменте.

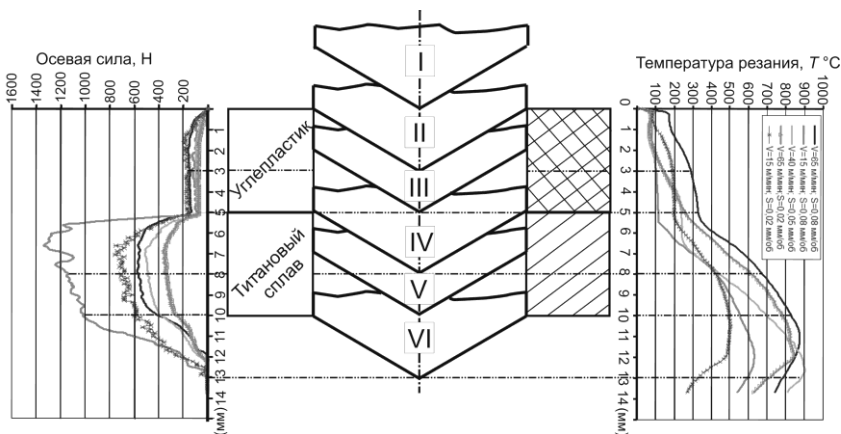


Рисунок 6 – Влияние режимов резания на температуру резания и осевую силу при сверлении пакета углепластик/титановый сплав острым сверлом (первое отверстие в серии опытов)

Вместе с тем относительно небольшой рост осевой силы связан с постепенным увеличением глубины резания и распределением оказываемого на материал давления со стороны сверла на большую площадь.

Сверление участка от 3 до 5 мм характеризуется снижением осевой силы и дальнейшим ростом температуры резания. Наименьшая температура резания наблюдалась при режиме  $V=40$  м/мин и  $S=0,05$  мм/об ( $110^{\circ}\text{C}$ ). При этом же режиме наблюдалось наименьшее снижение осевой силы (23%), что связано, по мнению авторов, с наименьшей величиной температуры резания. При больших температурах происходит интенсивная термическая деструкция и снижение прочности матрицы.

На четвертом этапе сверло врезается в титановый слой. Этому сопутствует стремительное увеличение осевой силы. Ее максимальное значение достигает 1300Н при  $V=15$  м/мин и  $S=0,08$  мм/об. Температура также увеличивается. К концу этапа максимальная температура составляет уже  $660^{\circ}\text{C}$ , а минимальная  $420^{\circ}\text{C}$ .

На пятом этапе происходит сверление только титанового слоя. Сила резания постепенно начинает уменьшаться, а температура еще больше увеличивается. Именно рост температуры обуславливает разупрочнение и снижение осевой силы.

На шестом этапе происходит выход сверла из отверстия. Освобождение перемычки приводит к интенсивному уменьшению осевой силы резания. Вместе с тем большая часть режущей кромки все еще находится в работе, и температура резания продолжает увеличиваться. Это происходит до середины шестого этапа. В дальнейшем мощность резания уменьшается, тепловыделение падает, и температура начинает снижаться. Характерно то, что режим резания  $V=40$  м/мин и  $S=0,05$  мм/об, который обеспечивает минимальную температуру в углепластике, показывает максимальную температуру в титановом слое (режим резания  $V=40$  м/мин и  $S=0,05$  мм/об), что связано с неблагоприятным сочетанием времени контакта сверла с титановым слоем и интенсивности теплообразования.

Температура резания при сверлении пакета углепластик-титановый сплав изменяется в широких пределах: от  $100^{\circ}\text{C}$  в углепластиковом слое до почти  $900^{\circ}\text{C}$  в слое титанового сплава. В течение 5 мм сверления в углепластиковом слое температура резания стабилизируется, в то время как в течение 5 мм сверления в титановом слое – нет. Это обусловлено значительно большей теплопроводностью титанового сплава по сравнению с углепластиком ( $16 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$  [15] по сравнению с  $0.5\text{-}2.5(\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C}))$ [16]). Это способствует отводу тепла в заготовку при сверлении слоя титанового сплава. Поэтому из-за небольшой толщины (5мм – половина диаметра сверла) уровень температуры в углепластиковом слое зависит от интенсивности теплообразования (процесс теплообмена установившийся), и, следовательно, режима резания. Уровень температуры в титановом слое – от соотношения

времени контакта сверла и интенсивности теплообразования (переходной процесс теплообмена).

*Выводы.* Процесс сверления пакета углепластик/титановый сплав порождает различные температуры резания в каждом из слоев. В исследованном диапазоне режимов резания температура резания в углепластике составила 100-320 °С, а в слое титанового сплава – 500-900°С. К концу переходного участка, когда сверло обрабатывает одновременно углепластик и титановый сплав, наблюдалась температура 400-650°С. Из-за малой толщины слоев в опытах уровень температуры в углепластиковом слое больше зависит от режима резания, а в титановом слое – от соотношения толщины слоя и минутной подачи, а также скорости резания. Для выбора режима резания, обеспечивающего наименьшие термические повреждения на границе слоев необходимы дальнейшие исследования процесса неустановившегося теплообмена между инструментом, заготовкой и стружкой.

*Благодарность.* Работа выполнена при поддержке Slovak Academic Information Agency в рамках Национальной стипендиальной программы (NSP) и Министерства образования и науки Украины в рамках темы 0115U000663. Коллектив авторов благодарит компанию Airtech и Эколан Ингриденты за любезно предоставленные материалы для формовки углепластика. Отдельная благодарность Знаменщикову Я. В., аспиранту кафедры электроники и компьютерной техники Сумского государственного университета, за конструкторскую и инженерную работу, выполненную им при создании системы для измерения температуры на вращающемся сверле.

**Список использованных источников.** 1. Резников, А.Н. Теплофизика резания / А.Н. Резников. – М. : Машиностроение, 1969. – 280 с. 2. Dörr, J. In-situ temperature measurement to determine the machining potential of different tool coatings /J. Dörr, Th. Merthens, G. Engering, M. Lhares// Surface and Coatings Technology. -2003. -Vol.174- 175. –Pp. 389-392. 3. Belotserkovsky, E. Infrared fiberoptic temperature monitoring during machining procedures /E. Belotserkovsky, O. Bar-Or, A. Katzir//Journal of Measurement Science and Technology. -1994. -Pp.451-453. 4. Eisenblätter, G. Trockenbohren mit Vollhartmetall/Toolen//Dissertation. -RWTH-Aachen, 2000. -124p. 5. Zeilmann, R. P. Analysis of temperature during drilling of Ti6Al4V with minimal quantity of lubricant /R. P. Zeilmann, W.L. Weingaertner//Journal of Materials Processing Technology. -2006. –V.179/1-3. –Pp.124-127. 6. Bagci, E. Investigation of the effect of drilling conditions on the twist drill temperature during step-by-step and continuous dry drilling /E. Bagci, B. Ozcelik//Materials and Design. -2005. –V.27/6. –Pp. 446-454. 7. Bagci, E. Finite element and experimental investigation of temperature changes on a twist drill in sequential dry drilling /E. Bagci, B. Ozcelik//International Journal of Advanced Manufacturing Technology. -2006. –V.28/7-8. –Pp.680-687. 8. Bagci, E. Analysis of temperature changes on the twist drill under different drilling conditions based on Taguchi method during dry drilling of Al 7075-T651/E. Bagci, B. Ozcelik//International Journal of Advanced Manufacturing Technology. -2006. –V.29/7-8. –Pp.629-636. 9. Battaglia, J. L. Estimation of heat fluxes during high-speed drilling/J. L. Battaglia, A. Kusiak//International Journal of Advanced Manufacturing Technology. -2005. –V.26/7-8. –Pp.750-758. 10. Kalidas, S. Influence of thermal effects on hole quality in dry drilling, Part 1: A thermal model of workpiece temperatures /S. Kalidas, S. G. Kapoor, R. E. DeVor//Journal of Manufacturing Science and Engineering. -2002. –V.124/2. –Pp.258-266. 11. Merino-Pürez, J.L. On the temperatures developed in CFRP drilling using uncoated WC-C tools Part I: Workpiece constituents, cutting speed and heat dissipation /J.L. Merino-Pürez, R. Royer,

S. Ayvar-Soberanis, E. Merson, A. Hodzic//Composite Structures. -2015. -Pp.161-168. 12. Ramirez, C/Tool wear monitoring and hole surface quality during CFRP drilling// C. Ramirez, G. Poulachona, F. Rossia, R. M'Saoubi// Procedia CIRP 13. -2014. -Pp. 163 – 168. 13. Davies, M. A. On The Measurement of Temperature in Material Removal Processes/ M. A. Davies, T. Ueda, R. M'Saoubi, B. Mullany, A. L. Cooke//Annals of the CIRP. -2007. – V. 56(2). -Pp.581 – 604. 14. Криворучко, Д. В. Основы 3D-моделирования процесів механічної обробки методом скінчених елементів: навчальний посібник/Д. В. Криворучко, В. А. Залого, В. Г. Корбач. – Суми: Вид-во СумДУ, 2010. – 208 с. 15. Лоцинин, Ю.В. Теплоемкость промышленных титановых сплавов при температурах 50-1100 °С /Ю.В. Лоцинин, В.А. Вертоградский, А.И. Ковалев, И.В. Фролкина, Теплоемкость промышленных титановых сплавов при температурах 50-1100 °С// Инженерно-физический журнал. – 1980. -Т. XXXVIII. -№4. -С.1-10. 16. Михайловский, К.В. Разработка высокотеплопроводных полимерных композиционных материалов для космических конструкций/К.В. Михайловский, П.В. Просунцов, С.В. Резник. //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. -2012. -С 98-106.

**Bibliography (transliterated):** 1. Reznikov, A.N. Teplofizika rezanija / A.N. Reznikov. – М. : Mashinostroenie, 1969. – 280 s. 2. Dörr, J. In-situ' temperature measurement to determine the machining potential of different tool coatings /J. Dörr, Th. Merthens, G. Engering, M. Lhares// Surface and Coatings Technology. -2003. -Vol.174- 175. -Pp. 389-392. 3. Belotserkovsky, E. Infrared fiberoptic temperature monitoring during machining procedures /E. Belotserkovsky, O. Bar-Or, A. Katzir//Journal of Measurement Science and Technology. -1994. -Pp.451-453. 4. Eisenblätter, G. Trockenbohren mit Vollhartmetall/Tools//Dissertation. -RWTH-Aachen, 2000. -124p. 5. Zeilmann, R. P. Analysis of temperature during drilling of Ti6Al4V with minimal quantity of lubricant /R. P. Zeilmann, W.L. Weingaertner//Journal of Materials Processing Technology. -2006. -V.179/1-3. -Pp.124-127. 6. Bagci, E. Investigation of the effect of drilling conditions on the twist drill temperature during step-by-step and continuous dry drilling /E. Bagci, B. Ozelcik//Materials and Design. -2005. -V.27/6. -Pp. 446-454. 7. Bagci, E. Finite element and experimental investigation of temperature changes on a twist drill in sequential dry drilling /E. Bagci, B. Ozelcik//International Journal of Advanced Manufacturing Technology. -2006. – V.28/7-8. -Pp.680-687. 8. Bagci, E. Analysis of temperature changes on the twist drill under different drilling conditions based on Taguchi method during dry drilling of Al 7075-T651/E. Bagci, B. Ozelcik//International Journal of Advanced Manufacturing Technology. -2006. -V.29/7-8. -Pp.629-636. 9. Battaglia, J. L. Estimation of heat fluxes during high-speed drilling/J. L. Battaglia, A. Kusiak//International Journal of Advanced Manufacturing Technology. -2005. -V.26/7-8. -Pp.750-758. 10. Kalidas, S. Influence of thermal effects on hole quality in dry drilling, Part 1: A thermal model of workpiece temperatures /S. Kalidas, S. G. Kapoor, R. E. DeVor//Journal of Manufacturing Science and Engineering. -2002. -V.124/2. -Pp.258-266. 11. Merino-Pjrez, J.L. On the temperatures developed in CFRP drilling using uncoated WC-Co tools Part I: Workpiece constituents, cutting speed and heat dissipation /J.L. Merino-Pjrez, R. Royer, S. Ayvar-Soberanis, E. Merson, A. Hodzic//Composite Structures. -2015. -Pp.161-168. 12. Ramirez, C/Tool wear monitoring and hole surface quality during CFRP drilling// C. Ramirez, G. Poulachona, F. Rossia, R. M'Saoubi// Procedia CIRP 13. -2014. -Pp. 163 – 168. 13. Davies, M. A. On The Measurement of Temperature in Material Removal Processes/ M. A. Davies, T. Ueda, R. M'Saoubi, B. Mullany, A. L. Cooke//Annals of the CIRP. -2007. -V. 56(2). -Pp.581 – 604. 14. Криворучко, Д. В. Основы 3D-моделирования процесів механічної обробки методом скінчених елементів: навчальний посібник/Д. В. Криворучко, В. А. Залого, В. Г. Корбач. – Суми: Вид-во СумДУ, 2010. – 208 с. 15. Лощинин, Ю.В. Теплоемкость промышленных титановых сплавов при температурах 50-1100 °С /Ю.В. Лощинин, В.А. Вертоградский, А.И. Ковалев, И.В. Фролкина, Теплоемкость промышленных титановых сплавов при температурах 50-1100 °С// Инженерно – физический журнал. -1980. -Т. XXXVIII. -№4. -С.1-10. 16. Михайловский, К.В. Разработка высокотеплопроводных полимерных композиционных материалов для космических конструкций/К.В. Михайловский, П.В. Просунцов, С.В. Резник. //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. -2012. -С 98-106.

*Поступила в редколлегию 28.07.2015*