

УДК 621.952.01:536.721.08:621.362.1:620.168

В.А. Залога, д-р техн. наук, Д.В. Криворучко, д-р техн. наук,  
В.А. Колесник, А.А. Нешта, И.О. Осадчий, Сумы, Украина

## **ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ СВЕРЛЕНИИ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Висвітлений у статті огляд останніх досягнень в галузі вимірювання температури при різанні волокнистих полімерних композиційних матеріалів дозволив виявити недоліки існуючих методик, які пов'язані з неможливістю отримання даних про температуру різання на головній різальній кромці, необхідністю виготовлення технологічних отворів і складністю фокусування на закритих, постійно оновлюваних, поверхнях. У роботі представлений новий спосіб вимірювання температури при свердлінні волокнистих полімерних композиційних матеріалів, який дозволяє одночасно встановити значення температури в декількох точках на головній різальній кромці.*

*Представленный в статье обзор последних достижений в области измерения температуры при резании волокнистых полимерных композиционных материалов позволил выявить недостатки существующих методик, связанные с невозможностью получения данных о температуре резания на главной режущей кромке, необходимостью изготовления технологических отверстий и сложностью фокусировки на закрытых, постоянно обновляемых, поверхностях. В работе представлен новый способ измерения температуры при сверлении волокнистых полимерных композиционных материалов, который позволяет одновременно установить значение температуры в нескольких точках на главной режущей кромке.*

*In this article the review of recent advances in the temperature measurements in cutting fibre reinforced polymer was revealed. The disadvantages of existing methods associated with the inability to obtaining of cutting temperature on the cutting edge, the need for making predrilled holes and complexity focus on closed, continuously updated surfaces was revealed. This paper presents a new approach to measure temperature in drilling fibre reinforced polymer which simultaneously is able to measure temperature at several points on the main cutting edge.*

В последнее десятилетие композиционные материалы уверенно отвоевывают во многих отраслях промышленности лидирующие позиции у таких традиционных конструкционных материалов как стали, алюминиевые и титановые сплавы [1]. Особенно это заметно в авиа- и автомобилестроении, энергетике и других отраслях. Возможность придания изделиям из волокнистых полимерных композиционных материалов (ВПКМ) требуемой формы существенно снижает необходимость в таких механических операциях как фрезерование и точение. В то же время существует потребность в соединении деталей из ВПКМ с другими деталями. В этих условиях наиболее распространенными являются операции по изготовлению

отверстий: сверление, рассверливание, развертывание, зенкерование. Механическая обработка ВПКМ, в частности сверление, сопряжено со значительными трудностями ввиду многокомпонентности обрабатываемого материала. Существенные проблемы связаны с обеспечением качества и точности обработанной поверхности. Снижение качества и точности отверстий в ВПКМ сопряжено с наличием таких дефектов как расслаивание, вытягивание волокон, не срезание волокон, распушивание и термическая деструкция. Последняя, существенно снижает эксплуатационные характеристики отверстия за счет формирования в процессе резания концентраторов напряжений, особенно в местах деструкции связующего вещества. На сегодня вопросы, связанные с физикой термических деструкционных процессов при сверлении ВПКМ, еще недостаточно изучены и требуют дальнейшего исследования, что является для указанных отраслей очень актуальной задачей.

Температура, возникающая при резании ВПКМ, определяет не только износ инструмента, но и качество обработанной поверхности. Наиболее достоверные данные о температуре резания возможно получить экспериментальным путем. И если в настоящее время имеется достаточно большое количество исследований, посвященных изучению термических процессов, происходящих в системе резания при механической обработке металлов, то тепловые процессы при резании ВПКМ еще плохо изучены, что обусловлено: специфическими условиями деформирования и разрушения срезаемого слоя; сложностью измерения температуры в ВПКМ в силу закрытости зоны резания; непрерывностью изменения положения режущей кромки; неоднородностью ВПКМ, а также наличием в них не токопроводящих элементов.

В настоящее время создание методики для измерения температуры в зоне резания при обработке ВПКМ преимущественно сводится к адаптации уже существующих подходов, используемых для исследования температуры резания при обработке металлов. К наиболее распространенным относится метод термопары, основывающийся на эффекте Зеебека, который может быть реализован несколькими путями. Выделяют [2] методы: естественной, искусственной и полуискусственной термопар. Метод естественной термопары основан на том, что контактирующие тела используются в качестве термоэлектродов, а их контактная связь — в качестве одного из спаев цепи термопары. По термо-ЭДС, возникающей в цепи при контакте двух разнородных металлов, оценивают температуру на поверхности контакта.

Сущность метода искусственной термопары заключается в измерении температурного поля инструмента или заготовки при помощи двух спаянных и изолированных термоэлектродов из разнородных материалов, размещенных в технологическом отверстии в теле инструмента или заготовки на удалении места спая на 0,2 - 0,5 мм от зоны резания. Измерение температуры происходит при

помощи гальванометра, фиксирующего электродвижущую силу (ЭДС) возникающую в проводниках при движении электронов от места спая к их противоположным краям.

Механизм измерения температуры резания полусинтетической термопарой, в свою очередь, заключается в измерении разницы потенциалов между двумя проводниками, одним из которых является инструментальный или обрабатываемый материал. Например, Agariou J. S., Stephenson D. A [3] предложили такой способ измерения температуры при сверлении чугуна, согласно которому температура измеряется на нагретом стыке между сверлом и тонкой изолированной медной проволокой, размещенной в предварительно просверленном отверстии и залитой для изоляции этого термоэлектрода от заготовки эпоксидной смолой. Вместе с тем, применение этого способа в случае сверления ВПКМ ограничивается невозможностью сверления технологических отверстий большой глубины и малого диаметра, даже путем электроэрозионной обработки, т.е. этот метод для измерения температуры резания при обработке ВПКМ в традиционной постановке может являться малоэффективным.

Традиционно применяемый при обработке металлов способ естественной термопары, состоящей из двух электродов «инструмент–заготовка», основывающийся на измерении термо - ЭДС между местом контакта материалов реза и заготовки (зона резания) и токоотводящими элементами, также не может быть применен при резании ВПКМ в силу их анизотропности и, как правило, низкой электропроводности [4].

В последние годы широкое распространение получил способ измерения температуры пирометрами путем регистрации инфракрасного излучения нагретой поверхности. Основной особенностью данного метода является бесконтактная передача информации, что позволяет избежать шумов и наводок, свойственных термоэлектрическому методу измерения. Теоретической основой этого метода являются зависимость Планка и закон Вина, смысл которых сводится к установлению зависимости между температурой, длиной волны и энергетической светимостью [5]. Cong W. L., Xiaotian Z. и др., в своей работе [6] выполнили экспериментальное сравнение этого способа с применением оптоволоконна для получения инфракрасного излучения непосредственно из зоны резания со способом измерения температуры методом искусственной термопары при сверлении ВПКМ. Измерение температуры проводилось в диапазоне от 0 до 150°C. С увеличением температуры разница в показаниях пирометра и искусственной термопары росла от 10% при 60°C до 30% при 150°C, более высокая температура была зафиксирована оптоволоконным датчиком. Аналогичные результаты получил Valavan U. [7] при измерении температуры резания с помощью оптического пирометра в процессе концевой фрезерования углепластика. Несмотря на приемлемую точность, эти способы не могут быть применены для измерения температуры в области главных режущих кромок при

сверлении ВПКМ, поскольку эта зона постоянно обновляется и закрыта от внешнего наблюдения. Точность пирометров существенно снижается при измерении температур ниже 300°C, которые характерны при резании ВПКМ [8].

Таким образом, практически ни один из известных способов измерения температуры резания не позволяет получить данные о температуре резания на главных режущих кромках сверла при сверлении ВПКМ. Поэтому целью настоящей работы является разработка такого способа и оценки его возможностей.

Идея предлагаемого способа измерения температуры в ВПКМ основывается на применении полупроводниковой термопары. Суть нового способа заключается в закладке токопроводящих элементов (термоэлектродов) еще на этапе формовки исследуемого образца. Это позволяет обеспечить наиболее тесный контакт с компонентами ВПКМ, исключает необходимость создания технологического отверстия в образце, и, как следствие, повышает точность измерения температуры. При сверлении нагретая режущая кромка сверла контактирует с термоэлектродом, срезая его. В этот момент имеет место горячий спай, в котором возникает термо-ЭДС. Именно она и регистрируется с помощью ЭВМ. Температура спаия определяет температуру на режущей кромке инструмента и термоэлектроде. В силу того, что термоэлектрод находится внутри ВПКМ, то его температура также очень близка к температуре обрабатываемого материала.

В качестве материала термоэлектродов предлагается использовать нихромовую проволоку, так как она обладает высоким коэффициентом термо - ЭДС [5]. Диаметр проволоки должен быть достаточно малым, чтобы теплота, выделяемая при ее срезании, не вносила существенного вклада в повышении температуры в данной точке режущей кромки. С другой стороны, слишком тонкая проволока усложняет размещение электрода в заданном месте и формовку образцов, а также деформирование при ее срезании. Методом проб и ошибок была выбрана проволока диаметром 0,3 мм.

Закладка одновременно нескольких термоэлектродов создает возможность регистрации температуры одновременно в нескольких точках режущей кромки и даже на ленточках при их трении с вновь образованной поверхностью отверстия.

Таким образом, для измерения температуры резания на режущих кромках сверла при сверлении ВПКМ предлагается следующая методика:

1. Изготавливают образец с заданной структурой (волокно и наполнитель) и требуемой схемой армирования, в котором в месте сверления отверстия размещены электроды из нихромовой проволоки  $\varnothing$  0,3 мм в осевом и радиальном направлениях. Количество и размещение электродов выбирается, исходя из цели конкретного исследования;

2. Выполняют тарирование термопары «исследуемая марка твердого сплава - нихромовая проволока» и определяют зависимость температуры от термо-ЭДС в нагретом стыке двух металлов;

3. Выполняют сверление в заданном месте образца, регистрируя термо-ЭДС быстродействующим регистратором, в качестве которого можно использовать ЭВМ с АЦП. С целью исключения помех частота регистрации должна быть такой, чтобы за время срезания электрода было зарегистрировано не менее 10 точек;

4. По полученным данным о термо-ЭДС рассчитать температуру в каждой контрольной точке режущей кромки сверла.

Измерение температуры производилось по схеме, представленной на рис.1. Заготовка 1 обрабатывалась сверлом 2, с которого сигнал термо – ЭДС передавался на внутреннее кольцо подшипника 3, а далее через шарики и графитовую смазку – на его наружное кольцо, с которого поступал непосредственно на устройство сбора данных 5. При обработке сверло 2 срезает одновременно несколько вертикально вложенных в ВПКМ проволочных термоэлектродов 4, что позволяет зарегистрировать термо - ЭДС вдоль режущей кромки сверла.

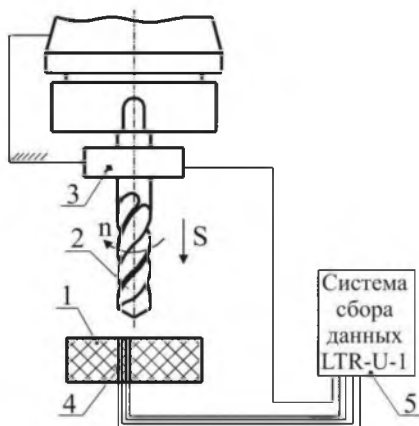


Рисунок 1 Схема реализации способа измерения температуры при сверлении волокнистых полимерных композиционных материалов

В эксперименте выполнялось сверление образцов ВПКМ, состоящих из однонаправленных углеродных волокон, пропитанных эпоксидным связующим ЭД-20. Образцы в виде цилиндра  $\varnothing 20$  и высотой 7 мм были сформованы техникой послойной укладки. На этапе формовки в образцы было введено четыре нихромовых проволоки  $\varnothing 0,3$ мм, таким образом, чтобы измерить температуру резания в четырех местах главной режущей кромки сверла. Сверление ВПКМ выполнялась на фрезерном станке 6Р12 твердосплавным

сверлом с нормальной заточкой GUHRING K/P Ø10 мм с частотой вращения шпинделя  $n=1000$  об/мин; осевой подачей сверла  $S=0,1$  мм/об.

Для определения величины температуры, соответствующей величине измеренной термо-ЭДС, выполнялось тарирование термопары «твердый сплав-нихром». Для этого была реализована установка (рис. 2). Локальный нагрев инструмента 5 в месте горячего спая 4 производился в погружной печи 3. Охлаждение холодного спая 1 было реализовано при помощи резервуара с охлаждающей жидкостью 2. В процессе нагрева и охлаждения проводился активный контроль температуры при помощи контрольной термопары, размещенной непосредственно в зоне нагрева. Термо – ЭДС тарированной термопары измерялась системой сбора данных LTR-U-1. Обработка данных осуществлялась с помощью программы Power Graph 3.3 на персональном компьютере (ПК). Опыты повторялись три раза.

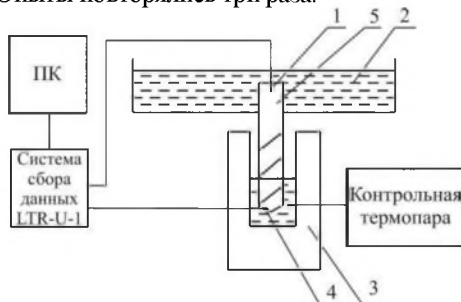


Рисунок 2 Схема установки для тарирования термопары «твердый сплав-нихром»

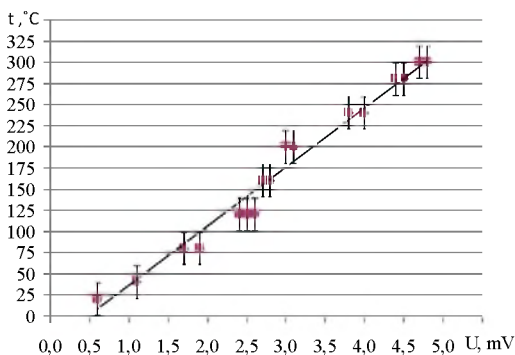


Рисунок 3 Зависимость температуры от величины термо - ЭДС в контакте нихром – твердый сплав

По полученным данным (рис. 3) была определена тарировочная характеристика

$$t = 70 \cdot U - 34, \quad (1)$$

где  $t$  – температура в зоне резания, °C;  $U$  – термо – ЭДС, mV.

Доверительный интервал составил 4°C. Уравнение (1) удовлетворяет критерию адекватности Фишера.

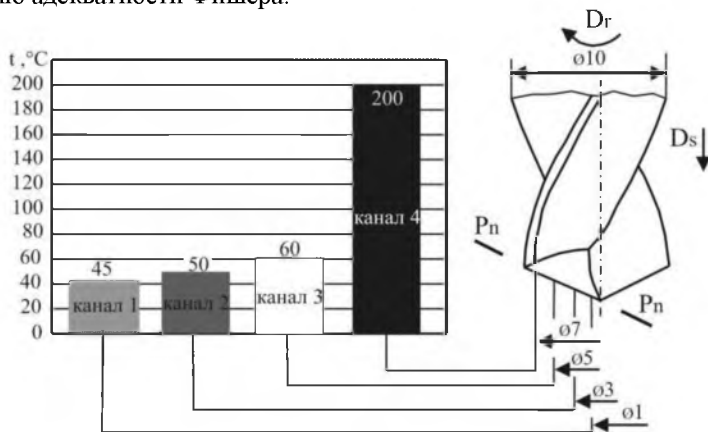


Рисунок 4 Температура резания в различных точках главной режущей кромки сверла

Полученные данные поискового эксперимента по сверлению (рис. 4) показывают, что при заданных условиях температура резания вдоль главной режущей кромки изменяется в пределах от 45 до 200 °C, с увеличением радиуса расположения на кромке контрольных точек и, соответственно, возрастанию скорости резания в них. В то же время наблюдалась существенная неравномерность распределения температуры вдоль режущей кромки: чем больше удалена точка на режущей кромке от оси сверла, тем более интенсивно возрастает температура резания. Так если разница между температурами резания в двух наиболее приближенных к оси точкам составляет 5 °C, то разница между температурами резания в двух наиболее удаленных от оси точках, находящихся на таком же расстоянии друг от друга, составляет 140 °C. Учитывая, что расположение электродов и, соответственно, контрольных точек было практически равномерным, причиной такой неравномерности может служить неоднородность свойств образца, вызванная, например, неравномерностью распределения углеволокна в образце. Дополнительный вклад в существенную разницу температур может вносить также и теплота, поступающая в инструмент из-за

трения ленточек с обработанной поверхностью. Очевидно, что изучение этих явлений должно быть темой дальнейших исследований.

### **Выводы.**

Ни один из известных способов измерения температуры, в настоящее время, не позволяет определить температуру резания на главных режущих кромках сверла при сверлении ВПКМ по причине их малой электропроводности, закрытости зоны резания, постоянного ее обновления в процессе обработки. В работе предложен способ и описана методика измерения температуры резания на главных режущих кромках сверла при сверлении ВПКМ методом полумискусственной термопары. Термопара образуется между сверлом и заранее введенными на этапе изготовления образцов нихромовыми проволоками - термоэлектродами. Проведенный поисковый эксперимент показал возможность практической реализации способа. Результаты этого эксперимента показывают, что в заданных условиях температура резания возрастает вдоль режущей кромки при удалении от оси сверла в пределах от 45 °С до 200 °С и это возрастание неравномерно. Последующие исследования с помощью представленного способа позволят изучить это явление более детально.

Работа выполнена на кафедре технологии машиностроения, станков и инструментов Сумского государственного университета в рамках госбюджетной темы МОН Украины: «Исследование обработки отверстий в композиционных материалах и смешанных пакетах на основе имитационного моделирования рабочих процессов» (ДР №0112U001377).

**Список использованных источников:** 1. *Martin R., Evans D.* Reducing cost in aircrafts: The metals affordability initiative consortium//Journal of operations management. – 2000. Т. 52. С. 24- 28. 2. Основи теорії різання матеріалів/М. П. Мазур, Ю. М. Внуков, В. Л. Доброскок і ін. – Львів: Новий світ – 2000, 2010. – 422 с. 3. *Agapiou J.S., Stephenson D.A.* Analytical and experimental studies of drill temperatures// Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 1994. – Вып. 1. – Т. 116. – С. 54- 60. 4. Пат. 104710 Российская Федерация, МПК51 G01K13/00 Устройство для измерения температуры в зоне резания при точении методом естественной термопары [Текст] /Федонин О. Н., Петрашев С. Н., Аверкина Н. Е.; заявитель и патентообладатель Гос. образ. учрежд. высш. проф. образ. "Брянск. гос. техн. ун-т". – № 2010154243/28; заявл. 29.12.10; опубл. 20.05.11; Бюл. № 14 – 4 с.: ил. 5. *Герашенко О.А., Федоров В.Г.* Тепловые и температурные измерения. – К.: Наукова думка, 1965. - 304 с. 6. *Cong W.L., Xiatian Z., Deines T.W.* и др. Rotary ultrasonic machining of carbon fiber reinforced plastic composites: An experimental study on cutting temperature// Journal of reinforced plastics and composites. – 2012. – Вып. 22. – Т. 31. – С. 1516- 1525. 7. *Valavan U.* Tool life prediction based on cutting forces and surface temperature in edge trimming of multidirectional CFRP composites: Дисс. master of science: 05.03.01. – Wichita, 2007. – 120 с. 8. *Campbell F.C.* Manufacturing Processes for Advanced Composites. – 1 изд. –: Elsevier Science, 2004. – 532 с.

*Поступила в редколлегию 01.07.2013*