

УДК 621.95.01

DOI 10.18698/0536-1044-2016-8-77-87

# Исследование усадки просверленных отверстий в полимерных композиционных материалах\*


**А.С. Дударев**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, Пермь, Российская Федерация, Комсомольский пр-т, д. 29

## The Study of Shrinkage of Drilled Holes in Polymer Composite Materials

**A.S. Dudarev**

Perm National Research Polytechnic University, 614990, Perm, Russian Federation, Komsomolskiy Ave., Bldg. 29

 e-mail: dudarev@pstu.ru

**i** Рассмотрено нетривиальное явление, возникающее при механической обработке полимерных композиционных материалов и влияющее на ее точность, — уменьшение диаметра отверстий через некоторое время после их сверления. Приведены экспериментальные результаты по исследованию усадки отверстий после сверления в различных марках полимерных композиционных материалов. Испытания проведены с использованием двух типов режущего инструмента (алмазных и высокопроизводительных твердосплавных сверл фирмы НАМ) при различном сочетании параметров режима сверления. Измерения усадки выполнены с помощью сканирующей системы ATOS III Triple Scan XL непосредственно после обработки и через 48 ч. Известно, что в конструкционных материалах усадка отверстий отсутствует, а в полимерных композиционных материалах она может достигать 0,02...0,03 мм и зависит от их марки.

**Ключевые слова:** сверление, отверстие, полимерный композиционный материал, усадка, полигональная сетка.

**i** The article presents a non-trivial phenomenon that occurs when machining polymer composite materials and that affects its accuracy, namely a decrease in the diameter of drilled holes subsequent to drilling. The experimental results on the shrinkage of the holes after drilling in a variety of grades of polymer composite materials are given. The tests were carried out using two types of cutting tools (diamond and high-performance carbide drills manufactured by NAM) with different combinations of drilling parameters. The shrinkage was measured using the ATOS III Triple Scan XL scanning system immediately after the drilling and after 48 hours. It is known that there is no hole shrinkage in structural materials, while in polymer composites it can reach 0.02...0.03 mm dependent on the brand.

**Keywords:** drilling, hole, polymer composite, shrinkage, polygon mesh.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0016) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) нашли широкое применение в авиационной и космической отраслях. Многократное увеличение производства изделий авиации и ракетно-космической техники, выполненных из ПКМ, требует соответствующего роста объема механической обработки, которая является трудоемкой и специфической. К наиболее распространенным операциям механической обработки в технологическом цикле производства изделий из ПКМ относятся фрезерование, сверление и шлифование [1].

Качество изделий из ПКМ после механической обработки во многом зависит от физико-механических свойств обрабатываемых деталей, условий резания, геометрических параметров режущей части инструмента, инструментального материала, износа режущего инструмента и других факторов [1]. Специфические физико-механические свойства ПКМ требуют индивидуального исследования обрабатываемости каждого материала [1, 2].

Стеклопластики, углепластики и многие другие ПКМ являются вязкоупругими материалами [2], поэтому в процессе их механической обработки наблюдаются остаточные пластические деформации, зависящие от различных факторов. Упругое восстановление обработанных поверхностей влияет на точность обработки.

При сверлении отверстия в ПКМ его диаметр получается меньше диаметра режущего инструмента. Впервые такие наблюдения, сделанные исследователями механической обработки пластмасс, описаны в работах [3–5]. Подобные явления усадки ПКМ также отмечены в работах [2, 6–7].

Причинами уменьшения диаметра отверстий, по мнению Б.П. Штучного [5], являются: высокая упругость ПКМ, наличие остаточных внутренних напряжений, влажность окружающей среды и др.

Следует отметить, что разные исследователи предлагают неодинаковые подходы к определению значения усадки. Так, Н.А. Криштопа [4] и А.А. Степанов [2] отмечают упругое восстановление ПКМ после обработки и предлагают формулу, впервые полученную В.И. Дрожжиным, приведенную в работе [3], для определения упругого восстановления обработанной поверхности слоистых пластмасс (гетинакс, текстолит) после резания неизношенным инструментом. Формула В.И. Дрожжина [3] со-

держит множители: радиус округления режущих кромок сверла, угол заострения режущего клина инструмента, длину контакта обработанной поверхности материала с задней поверхностью инструмента, задний угол, коэффициент, учитывающий строение обрабатываемого материала и жесткость системы станок–приспособление–инструмент–деталь (СПИД). Но выражение для определения усадки, приведенное в работе [3], разработано для слоистых пластмасс, поэтому для расчета усадки ПКМ неприемлемо.

В работе [5] Б.П. Штучный установил, что диаметр отверстия уменьшается относительно диаметра сверла на 0,03...0,1 мм сразу после сверления и на 0,01...0,05 мм через сутки, далее он не изменяется. Б.П. Штучный предложил эмпирическое выражение для расчета уменьшения диаметра (усадки) отверстий в деталях из электроизоляционного материала — текстолита, по своей структуре наиболее похожего на современные ПКМ [5]:

$$\Delta d = 0,32v^{0,62}S_0^{1,54}, \text{ мм}, \quad (1)$$

где  $v$  — скорость резания, м/с;  $S_0$  — оборотная подача, мм/об.

Согласно выражению (1), на значение усадки отверстия влияют параметры режима сверления — скорость резания и подача. Чем меньше эти параметры, тем продолжительнее процесс сверления и контакт режущего инструмента с внутренней поверхностью отверстия ПКМ и тем меньше значение усадки. Использование выражения (1) для оценки усадки в ПКМ является неадекватным, так как обрабатываемые материалы относятся к другому классу.

В работах [5, 7] авторы рекомендуют увеличивать диаметр сверла по сравнению с требуемым диаметром отверстия. Однако биение сверла и шпиндельного узла сверлильного станка также влияют на точность обработки отверстий, поэтому наблюдается обратное явление — увеличение диаметра отверстия после обработки («разбивка»). В связи с этим при выборе условий обработки следует учитывать как тип и геометрию режущего инструмента, так и временной фактор, определяемый варьированием параметров режима обработки.

В работе [2] отмечено, что при применении сверл оптимальной геометрии явление усадки может быть сведено к минимуму.

Цель работы — установление влияния параметров режима сверления и типа инструмента

на значение усадки отверстий в ПКМ (углепластиках и стеклопластиках различных марок). В связи с этим в Центре высокотехнологичных машиностроительных производств Пермского Национального исследовательского политехнического университета проведено экспериментальное исследование.

Исследование выполняли на образцах в виде пластин размером 150×200 мм из следующих ПКМ: углепластика ВКУ-39, созданного на основе волокон фирмы Porcher (далее углепластик Porcher), толщиной 3 мм; углепластика КМУ-4э толщиной 5 мм; стеклопластика ВПС-33 толщиной 5 мм.

В ходе экспериментов сверлили отверстия диаметром  $D = 10 \begin{matrix} +0,100 \\ +0,040 \end{matrix}$  мм. При этом погрешность геометрической формы обрабатываемых отверстий особо не оговаривалась, а учитывалась допуском на точность обработки. В качестве режущего инструмента использовали два типа сверл (рис. 1): алмазные диаметром  $D = 10 \begin{matrix} +0,10 \\ +0,05 \end{matrix}$  мм (зернистость алмазосодержащего слоя 125/100, марка алмазов АС 32, покрытие методом гальваностегии на никелевой связке) [8, 9] и твердосплавные диаметром  $D = 10 \begin{matrix} +0,07 \\ +0,02 \end{matrix}$  мм немецкой фирмы Nam Precision 380 (угол при вершине (в плане)  $2\phi = 163^\circ$ , передний угол  $\gamma = 12^\circ$ , задний угол  $\alpha = 20^\circ$ , угол наклона винтовых канавок  $\omega = 25^\circ$ ).

При выборе режимов сверления использовали данные, полученные на основе экспериментальных работ [1, 10] и гарантирующие получение высокого качества обработанных отверстий. В качестве параметров режимов



а



б

Рис. 1. Внешний вид алмазного (а) и твердосплавного (б) сверл

Таблица 1

Параметры режимов сверления

Номер режима	Частота вращения шпинделя $n$ , об/мин	Подача $S_m$ , мм/мин
1	10 000	50
2	15 000	75
3	20 000	300



Рис. 2. Общий вид станка FlexiCAM XL 1525 CNC Router

сверления приняли частоту вращения шпинделя  $n = 10\ 000 \dots 20\ 000$  об/мин и минутную подачу инструмента  $S_m = 50 \dots 300$  мм/мин (табл. 1).

Сверление проводили на трехосевом фрезерно-гравировальном станке FlexiCAM XL 1525 CNC Router с рабочей областью  $2\ 580 \times 1\ 540 \times 280$  мм (рис. 2), шпиндель которого позволяет развивать частоту вращения до 24 000 об/мин. Для управления этим станком составляли программу в среде ArtCAM.

Испытания на каждом из режимов обработки (см. табл. 1) проводили по три раза. Замену режущего инструмента (алмазных и твердосплавных сверл) осуществляли по технологическому критерию затупления, проявлением которого служили признаки нарушения нормальной работы, требующие замены инструмента из-за снижения качества обработанных отверстий (появление вырывов вокруг отверстия, выкрашивание на стенках отверстия связующего). Процесс сверления (рис. 3) фиксировали с помощью видеокамеры JVC и фотокамеры Sony Cyber-shot DSC-S780.

Измерения размеров отверстий осуществляли с помощью бесконтактной оптической измерительной системы ATOS III Triple Scan XL с фотограмметрической системой TRITOP Std модели 400 (Германия), имеющей в своем со-

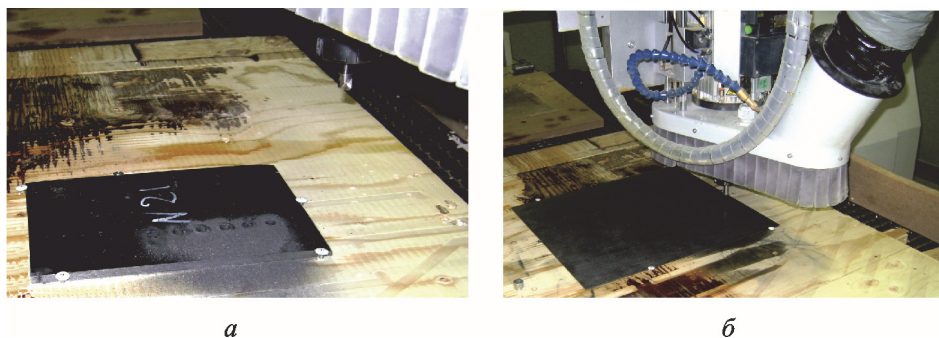


Рис. 3. Сверление углепластика КМУ-4э твердосплавным сверлом Nam Precision 380 (а) и углепластика Porcher алмазным сверлом (б)

ставе трехмерный сканер ATOS III XL (рис. 4). Работа сканера основана на проецировании интерференционных полос, что обеспечивает получение точек детали или тела образца в трехмерных координатах.

Система ATOS III Triple Scan XL имеет следующие технические характеристики: диапазон объемов измерений от 30×24×13 до 2 000×2 000×2 000 мм; разрешение от 800 000 до 4 000 000 точек поверхности тела за один съем; точность от 0,004 мм. Сканер имеет сертификат соответствия требованиям нормативных документов и прошел метрологическую поверку. Кроме того, в комплект оптической системы ATOS III Triple Scan XL входит специальная керамическая эталонная пластина, по которой сканер самостоятельно калибруется. Это обеспечивает метрологическую надежность и гарантирует годность средства измерения к замерам.

Измерение с помощью системы ATOS III Triple Scan XL проводили следующим образом. Сканер ATOS III XL позиционировали на обра-

зец с просверленными отверстиями. После каждого измерения позицию сканера меняли, чтобы просканировать стороны, не просканированные в предыдущий раз. Все измерения автоматически преобразовывались в трехмерную систему координат, что приводило к созданию трехмерного облака точек. Измерение отверстий на образцах проводили сразу после сверления и через 48 ч. Предварительные исследования показали, что основные изменения размеров происходят в первые сутки, затем размеры не изменяются. Поэтому для гарантированного получения стабильных замеров повторно измерения проводили через 48 ч.

Дефекты, возникающие на входе и выходе из отверстия ПКМ [1], на процесс измерения диаметров не влияли, так как качество отверстий было удовлетворительным, и сканировали облако точек во внутренней поверхности отверстия. Выявление факторов, влияющих на качество обработанных отверстий, не являлось целью исследований, поэтому даже при возможном возникновении дефектов в виде заусенцев или расслоений образцы ПКМ зачищали, и во всех случаях для исключения бликов наносили контрастную краску на плоские поверхности образцов.

Снятая с натурального образца полигональная сетка описывает реальные поверхности, а не объем, причем эти поверхности могут быть любой формы. Полигональная сетка поверхностей может быть верифицирована путем сравнения с данными пакетов систем автоматизированного проектирования (САПР). С помощью САПР можно создавать идеальные геометрические элементы (окружности, цилиндры и т. д.).

Система TRITOP определяет координаты опорных (реперных) точек на объекте, по которым совместно с устройством ATOS происходит автоматическое объединение данных изме-

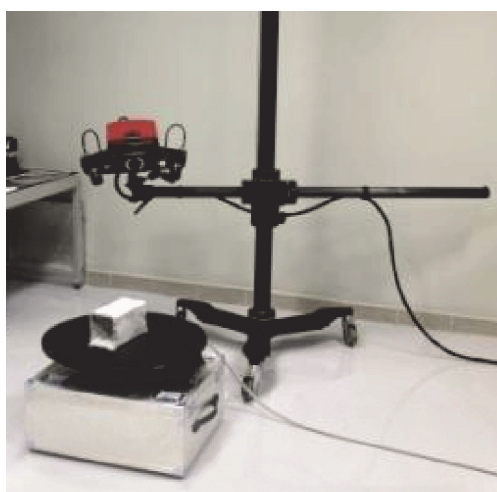


Рис. 4. Общий вид установки ATOS III Triple Scan XL

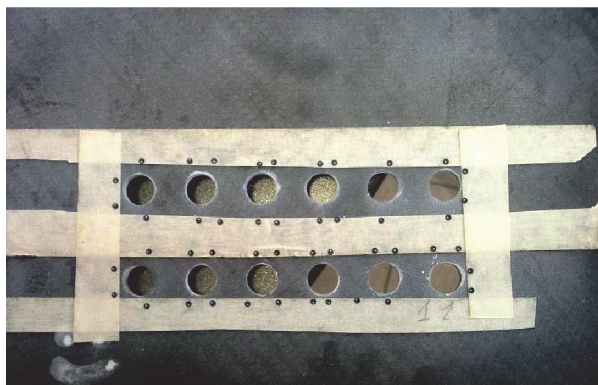


Рис. 5. Реперные точки на образце

рений с различных ракурсов. Это потребовало нанесения на пластину реперных точек диаметром 0,4 мм (рис. 5).

С помощью программного продукта GOM ATOS 7.2, входящего в состав программного обеспечения GOM Inspect, анализировались трехмерные данные измерений, а именно полигональные сетки, полученные от сканера. Затем строилась цифровая карта отклонений (рис. 6).

На основе сканированной полигональной сетки каждого отверстия получены трехмерные модели отверстий в образцах после сверления (рис. 7).

Программное обеспечение GOM Inspect позволяет верифицировать реальные сканированные объекты в виде полигональных сеток с номинальными, причем ресурсы GOM Inspect позволяют сделать это с помощью внутренних

библиотек без дополнительного импорта трехмерных объектов.

В программе GOM Inspect для сравнения создавали номинальные тела отверстий. В качестве примера на рис. 8 показана поверхность с номинальным размером радиуса 5 мм, отличающаяся от реального отверстия диаметром 10,07 мм.

В программном обеспечении GOM Inspect для сравнения полигональной сетки реального сканированного геометрического элемента цилиндрической формы и номинального, построенного в GOM Inspect (или импортированного в формате \*.stl), можно использовать следующие методы:

- совпадения по Гауссу с вариационными переменными сигма (Gaussian best-fit 3 sigma);
- наилучшего совпадения уравнениями Чебышева (Chebyshev best-fit);
- по средней описанной геометрии с минимальным отклонением элемента (Minimum circumscribed element);
- по максимальному совпадению кривизны окружности на основе равного удаления границ от центра (Maximum inscribed element).

Поэтому математический эквивалент полигональных сеток для анализа среднего отклонения от поверхности следует выбрать из нескольких методов. В данном эксперименте на основании рекомендаций, приведенных в инструкциях программного продукта GOM Inspect, был выбран метод совпадения по Гауссу.

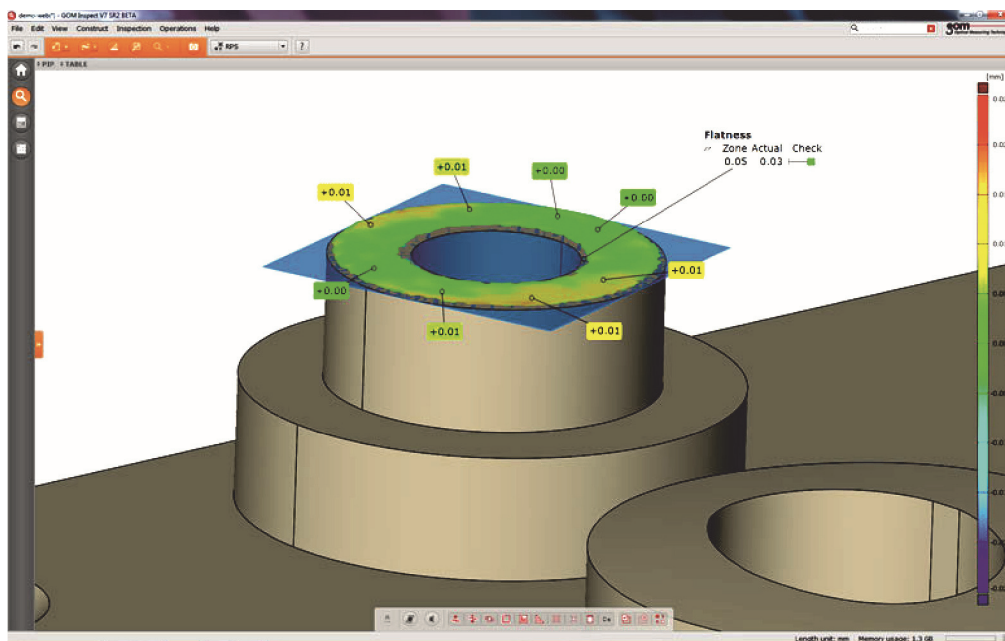


Рис. 6. Цифровая карта отклонений

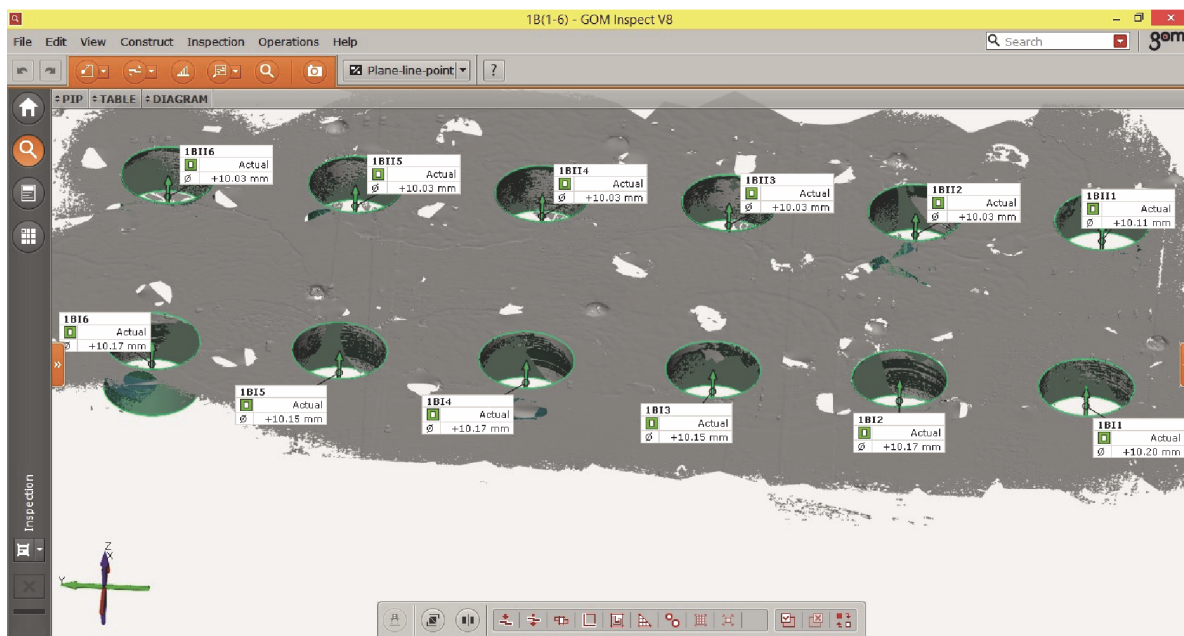


Рис. 7. Полигональные сетки отверстий в образце

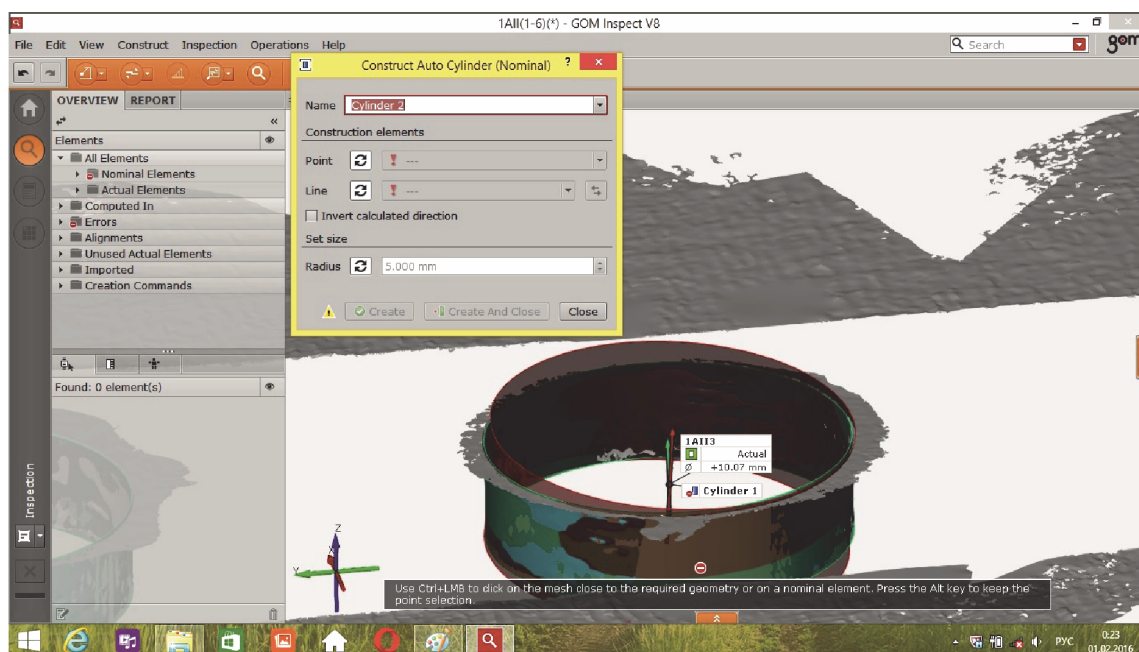


Рис. 8. Номинальное отверстие при совмещении с реальным в программе GOM Inspect

Следует отметить, что при наложении полигональных участков с реальной модели отверстия на математическую визуально возникали светлые и темные (зеленые) тона сетки STL (см. рис. 8, 9). Темные тона указывают на полное совпадение реальной и математической моделей, светлые тона — на несовпадение сеток.

Результаты реальных размеров отверстий были получены сразу после сверления и через 48 ч. Данные измерений с трехкратным повто-

ром опыта по каждому образцу и типу режущего инструмента при различных параметрах режима сверления приведены в табл. 2.

Обработка результатов экспериментов. Полученные результаты измерений (см. табл. 2) математически оценивали с точки зрения теории ошибок [11]. Этот вопрос в настоящее время проработан настолько глубоко, что нашел отражение в ряде нормативных документов, в которых приведены критерии выявления

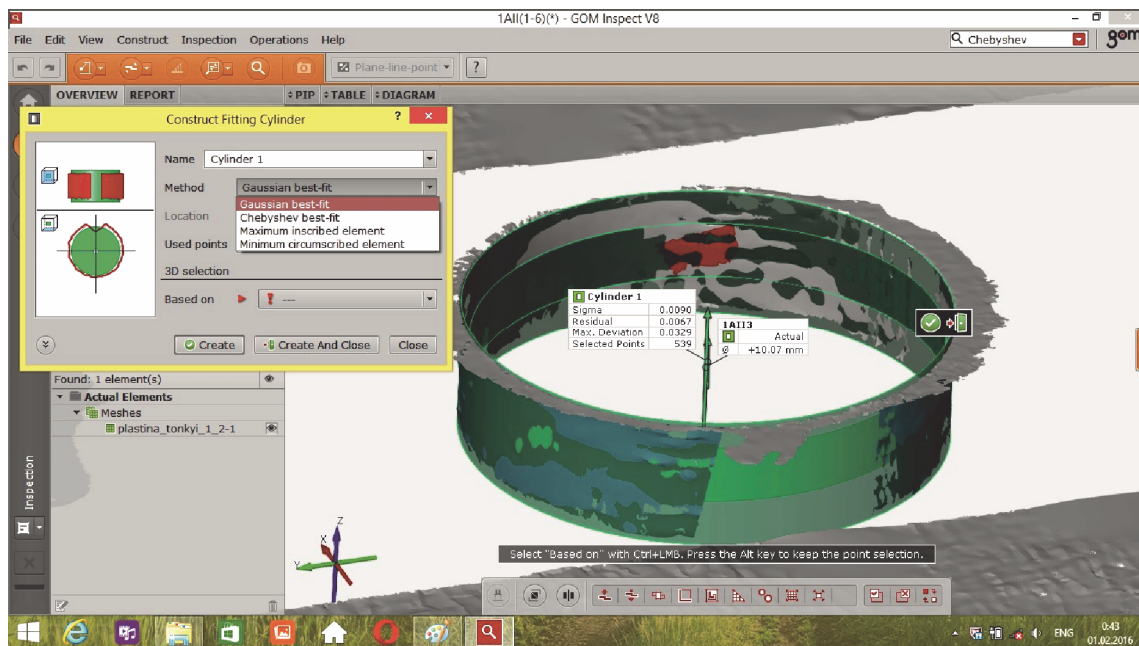


Рис. 9. Выбор метода сравнения полигональной сетки

Таблица 2

Значения диаметров отверстий после сверления ПКМ алмазным/твердосплавным инструментом

Параметры режима сверления	Номер опыта	Время замера	Диаметр отверстия, мм, в ПКМ		
			Porcher	КМУ-4э	ВПС-33
$S_m = 50$ мм/мин ( $S_o = 0,005$ мм/об) $n = 10\ 000$ об/мин	1	Сразу	10,080/10,053	10,100/10,072	10,081/10,022
		Через 48 ч	10,072/10,030	10,090/10,060	10,080/10,020
	2	Сразу	10,090/10,052	10,098/10,053	10,070/10,033
		Через 48 ч	10,071/10,040	10,089/10,030	10,073/10,030
	3	Сразу	10,090/10,052	10,070/10,050	10,070/10,034
		Через 48 ч	10,081/10,041	10,072/10,042	10,070/10,030
$S_m = 75$ мм/мин ( $S_o = 0,005$ мм/об) $n = 15\ 000$ об/мин	1	Сразу	10,053/10,070	10,07/10,033	10,080/10,030
		Через 48 ч	10,040/10,060	10,060/10,020	10,080/10,030
	2	Сразу	10,054/10,070	10,053/10,033	10,080/10,040
		Через 48 ч	10,030/10,060	10,040/10,020	10,080/10,040
	3	Сразу	10,051/10,070	10,050/10,040	10,080/10,040
		Через 48 ч	10,021/10,052	10,050/10,040	10,080/10,040
$S_m = 300$ мм/мин ( $S_o = 0,015$ мм/об) $n = 20\ 000$ об/мин	1	Сразу	10,060/10,040	10,050/10,030	10,060/10,030
		Через 48 ч	10,031/10,011	10,050/10,022	10,060/10,030
	2	Сразу	10,060/10,050	10,070/10,031	10,060/10,031
		Через 48 ч	10,030/10,020	10,051/10,022	10,060/10,031
	3	Сразу	10,061/10,052	10,070/10,030	10,060/10,032
		Через 48 ч	10,051/10,031	10,061/10,021	10,060/10,032

анормальных результатов наблюдений. Так, ГОСТ 8.208–76 регламентирует методы обработки результатов прямых измерений.

Для оценки полученных данных, резко отличающихся от всех других результатов, ис-

пользуем методику [12] для проверки целесообразности браковки «выпадающих» значений. В рассматриваемом случае заранее неизвестна средняя квадратическая ошибка  $\sigma$ , и все измерения проводили независимо друг от друга.

Используем метод исключения [12], согласно которому необходимо сравнить критерий вывода — отношение абсолютной разности между «выпадающим» значением  $x^*$  и средним значением  $\bar{x}$  остальных результатов, деленное на эмпирический стандарт  $S$ , с критическим (справочным) значением критерия вывода при заданной надежности  $t_n(P)$ . При этом вместо квадратической ошибки измерения  $\sigma$  используется эмпирический стандарт  $S$ .

Условие исключения результата из дальнейшей обработки имеет вид

$$t > t_n(P) \quad (2)$$

$$\text{при } t = \frac{|x^* - \bar{x}|}{S}. \quad (3)$$

Эмпирический стандарт определяется по формуле

$$S = \sqrt{\frac{1}{n_0 - 1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (4)$$

где  $n_0$  — число опытов;  $x_i$  — результаты измерений.

Если  $t \leq t_n(P)$ , то отсутствует основание для исключения выпадающего значения.

Оценку результатов измерений по формуле (2) для алмазного и твердосплавного инструментов проводили отдельно для трех различных режимов сверления. При этом учитывали данные замеров отверстий для каждого вида инструмента через 48 ч после сверления. Исследовали шесть групп для оценки выпадающих значений, внутри каждой группы по девять значений диаметров (три марки материала, три повтора опытов).

Оценку «выпадающих» значений измерений сразу после сверления не проводили, так как все значения диаметров отверстий в графах «Сразу» (см. табл. 2) находятся в пределах поля допуска соответствующего режущего инструмента. Разброс значений в графах «Сразу» при повторных опытах объясняется плановыми и внеплановыми заменами инструмента с разными фактическими размерами диаметров сверл, но находящимися в поле допуска.

Как видно из табл. 2, для равноточных измерений при сверлении алмазным инструментом на режимах  $S_0 = 0,005$  мм/об,  $n = 10\,000$  об/мин значения диаметров, измеренных через 48 ч, составили, мм: 10,072; 10,090; 10,080; 10,071; 10,089; 10,073; 10,081; 10,072; 10,070. Среднее значение  $\bar{x} = 10,077$ .

Согласно формуле (4), эмпирический стандарт

$$S = \sqrt{\frac{1}{9-1} \sum_{i=1}^9 (x_i - \overline{10,077})^2}.$$

После подстановки результатов измерений

$$S = \left\{ \frac{1}{9-1} \left[ (10,072 - \overline{10,077})^2 + (10,090 - \overline{10,077})^2 + (10,080 - \overline{10,077})^2 + (10,071 - \overline{10,077})^2 + (10,089 - \overline{10,077})^2 + (10,073 - \overline{10,077})^2 + (10,081 - \overline{10,077})^2 + (10,072 - \overline{10,077})^2 + (10,070 - \overline{10,077})^2 \right] \right\}^{1/2} = 0,008667.$$

Для «выпадающего» значения 10,090 отношение

$$t = \frac{|10,090 - 10,077|}{0,008667} = 1,499.$$

Из таблиц, приведенных в работе [12], при надежности  $P = 0,99$  и числе опытов  $n_0 = 9$  имеем  $t_n(P) = 3,54$ . Поскольку полученное отношение  $t = 1,499$  меньше критического, значение 10,090 не следует исключать из дальнейшей обработки.

Аналогично для твердосплавного инструмента НАМ 380 на режимах  $S_0 = 0,005$  мм/об,  $n = 10\,000$  об/мин значения диаметров, измеренных через 48 ч, составили, мм: 10,030; 10,060; 10,020; 10,040; 10,030; 10,030; 10,041; 10,042; 10,030. Здесь «выпадающим» значением может стать 10,060. Среднее значение  $\bar{x} = 10,035$ . После подстановки результатов измерений в формулу (4) получим эмпирический стандарт  $S = 0,0113$ .

Тогда для «выпадающего» значения 10,060 отношение

$$t = \frac{|10,060 - 10,035|}{0,0113} = 2,168.$$

Поскольку при  $P = 0$  и  $n_0 = 9$  полученное отношение  $t = 2,168$  меньше критического  $t_n(P) = 3,54$ , «выпадающее» значение 10,060 также не следует исключать из дальнейшей обработки.

Для остальных режимов проведем аналогичную оценку грубых ошибок, сведя все результаты расчета в табл. 3.

Как видно из табл. 3, все значения критерия вывода  $t$  при надежности  $P = 0,99$  и  $n_0 = 9$



Таблица 3

## Результаты оценки ошибок

Параметры режима обработки	Инструмент	S	$\bar{x}$ , мм	$x_*$ , мм	t	Условие выбраковки
$S_m = 50$ мм/мин, $n = 10\ 000$ об/мин	Алмазный	0,0087	10,077	10,090	1,499	Не выполнено
	НАМ 380	0,0113	10,036	10,060	2,168	То же
$S_m = 75$ мм/мин, $n = 15\ 000$ об/мин	Алмазный	0,0229	10,053	10,020	1,440	»
	НАМ 380	0,0150	10,040	10,065	1,666	»
$S_m = 300$ мм/мин, $n = 20\ 000$ об/мин	Алмазный	0,0123	10,051	10,030	1,707	»
	НАМ 380	0,0071	10,023	10,010	1,838	»

меньше критического значения  $t_n(0,99) = 3,54$ . Это свидетельствует об отсутствии оснований для исключения «выпадающего» значения из дальнейшей обработки.

**Анализ результатов экспериментов.** Наибольшее значение усадки зафиксировано в образцах из углепластика Porcher, а наименьшее — в пластинах из углепластика КМУ-4э. Стеклопластик ВПС-33 оказался наиболее стабильным ПКМ: у него усадка практически не зафиксирована. Значения усадки через 48 ч после сверления образцов составили 0,02... 0,03 мм, а погрешность измерений — 0,004 мм, что позволяет считать результаты замеров достоверными. Очевидно, что углепластик, особенно марки Porcher, обладает свойствами упругого восстановления.

В ходе исследований установлено также влияние параметров режима обработки на усадку, что можно объяснить двумя гипотезами. Первая из них связана со скоростью, вторая — с силовыми факторами.

Влияние скорости обработки на усадку можно объяснить следующим образом. При сверлении ПКМ упругие деформации не локализируются в узкой зоне резания, а распространяются на материал вокруг просверленного отверстия. Вокруг отверстия на длине режущей части сверла по всей высоте заготовки создаются значительные упругие сжимающие напряжения. После прохождения режущей части сверла силы, вызывающие эти напряжения, снимаются, и материал упруго деформируется в обратном направлении, уменьшая диаметр просверленного отверстия. Чем выше скорость резания, тем производительнее обработка отверстия и больше усадка отверстия. И наоборот, чем меньше скорость резания, тем продолжительнее контакт режущего инструмента с внутренней поверхностью отверстия и

меньше значение усадки. Таким образом, если ПКМ «привыкает», то усадки нет, если не успевает «привыкнуть» к инструменту, то усадка есть.

Можно также предположить, что в момент формообразования в результате сжимающих напряжений на сверло в процессе его работы действуют дополнительные силы, приложенные к ленточкам у стандартных сверл и к цилиндрической поверхности у алмазных сверл. Этот физический процесс с эффектом «затирания» способствует интенсивному износу сверл. Поэтому в экспериментах контролировали не только затупление режущей части инструмента, но и номинальный диаметр сверла.

Вторая гипотеза о влиянии параметров режима обработки на усадку заключается в следующем. Упругое последствие материала и уменьшение диаметра отверстия зависят от сил, действующих в процессе резания. Чем больше силы, действующие в процессе сверления, тем большую упругую деформацию они вызывают (в силу законов теории упругости) после снятия напряжений и сил [13, 14], и чем больше будет усадка, тем меньше диаметр отверстия после обработки. Окончательный ответ может дать математическое моделирование процесса сверления ПКМ в современных системах инженерного анализа, таких как LS-DYNA, ABAQUS, DEFORM и др.

Тип режущего инструмента влияет на усадку незначительно. Однако стоит отметить, что после сверления алмазными сверлами сквозных отверстий возникает конусность отверстий. По мнению автора, это объясняется наличием на трубчатом алмазном сверле участка алмазного слоя, нанесенного только в режущей части инструмента и работающего во время формообразования.

## Выводы

1. Проведены экспериментальные исследования по определению усадки отверстий после сверления образцов из ПКМ с последующим контролем посредством оптической измерительной системы ATOS III Triple Scan XL. Испытания выполнены с использованием разных типов режущего инструмента для сверления отверстий диаметром 10 мм и с варьированием параметров режима обработки образцов из ПКМ трех марок.

2. Установлено, что марка обрабатываемого ПКМ влияет на усадку отверстий больше, чем такие факторы, как сочетание параметров режима обработки и тип режущего инструмента.

3. При подготовке производства инженерам-технологам авиационной и ракетно-космической отраслей следует учитывать значение возможной усадки ответственных высокоточных изделий, а также эффект разбивки отверстий от несовершенства оборудования, крепления режущего инструмента и др.

## Литература

- [1] Дударев А.С. *Повышение эффективности и качества обработки отверстий на основе стабилизации процесса сверления изделий из полимерных композиционных материалов*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 2009. 22 с.
- [2] Степанов А.А. *Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов*. Ленинград, Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987. 176 с.
- [3] Дрожжин В.И. *Физические особенности и закономерности процесса резания слоистых пластмасс*. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Киев, Институт сверхтвердых материалов АН УССР, 1983. 41 с.
- [4] Криштопа Н.А., Радзевич С.П., Бобко А.И. *Обработка отверстий в композиционных неметаллических материалах*. Киев, Техника, 1980. 125 с.
- [5] Штучный Б.П. *Обработка пластмасс резанием*. Москва, Машиностроение, 1974. 144 с.
- [6] Дударев А.С., Свирицев В.И. Явление усадки отверстий, полученных способом сверления в изделиях из полимерных композиционных материалов. *Технологическое обеспечение надежности и долговечности машин: сб. науч. тр.*, Ижевск, ИПМ УрО РАН, 2006, с. 168–170.
- [7] Буловский П.И., Петрова Н.А. *Механическая обработка стеклопластиков*. Москва, Машиностроение, 1968. 152 с.
- [8] Дударев А.С. Конструкции сверл и фрез для алмазно-абразивной обработки стеклопластиков и углепластиков. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, 2012, № 5, с. 66–75.
- [9] Дударев А.С. Конструкции алмазного инструмента для сверления и фрезерования полимерных композиционных материалов. *СТИН*, 2013, № 6, с. 9–15.
- [10] Дударев А.С., Сафонов И.И., Стешин А.А. Особенности механической обработки полимерных композиционных материалов. *Технология машиностроения*, 2014, № 1, с. 23–26.
- [11] Фрумкин В.Д., Рубичев Н.А. *Теория вероятностей и статистика в метрологии и измерительной технике*. Москва, Машиностроение, 1987. 168 с.
- [12] Лялькина Г.Б. *Математическая обработка результатов эксперимента*. Пермь, ПНИПУ, 2013. 77 с.
- [13] Остросаблин Н.И. *Плоское упругопластическое распределение напряжений около круговых отверстий*. Новосибирск, Наука, 1984. 113 с.
- [14] Савин Г.Н. *Распределение напряжений около отверстий*. Киев, Наукова думка, 1968. 887 с.

## References

- [1] Dudarev A.S. *Povyshenie effektivnosti i kachestva obrabotki otverstii na osnove stabilizatsii protsessa sverleniia izdelii iz polimernykh kompozitsionnykh materialov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency and quality of handling of holes by drilling process stabilization products from polymeric composite materials. Cand. tech. sci. diss.]. Permian, PSTU publ., 2009. 22 p.

- [2] Stepanov A.A. *Obrabotka rezaniem vysokoprochnykh kompozitsionnykh polimernykh materialov* [Machining of high-strength composite polymer materials]. Leningrad, Mashinostroenie publ., Leningrad branch, 1987. 176 p.
- [3] Drozhzhin V.I. *Fizicheskie osobennosti i zakonmernosti protsessa rezaniia sloistykh plastmass*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Physical characteristics and laws of process of cutting of laminated plastics. Dr. tech. sci. diss.]. Kiev, Institut sverkhтверdykh materialov AN USSR publ., 1983. 41 p.
- [4] Krishtopa N.A., Radzevich S.P., Bobko A.I. *Obrabotka otverstii v kompozitsionnykh nemetallicheskiykh materialakh* [Processing of holes in nonmetallic composite materials]. Kiev, Tekhnika publ., 1980. 125 p.
- [5] Shtuchnyi B.P. *Obrabotka plastmass rezaniem* [Machining of plastics cutting]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1974. 144 p.
- [6] Dudarev A.S., Svirshchev V.I. Iavlenie usadki otverstii poluchennykh sposobom sverleniia v izdeliakh ikh polimernykh kompozitsionnykh materialov [The phenomenon of shrinkage of the holes obtained by the method of drilling into products of composite materials]. *Tekhnologicheskoe obespechenie nadezhnosti i dolgovechnosti mashin: sb. nauch. tr.* [Technological provision of reliability and durability of machines: collection of scientific papers]. Izhevsk, IPM UrO RAN publ., 2006, pp. 168–170.
- [7] Bulovskii P.I., Petrova N.A. *Mekhanicheskaya obrabotka stekloplastikov* [Machining of plastics]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1968. 152 p.
- [8] Dudarev A.S. Konstruktsii sverl i frez dliaalmazno-abrazivnoi obrabotki stekloplastikov i ugleplastikov [Designs of drills and mills for diamond processings of polymeric composite materials]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya of the Tula state University. Technical science]. 2012, no. 5, pp. 66–75.
- [9] Dudarev A.S. Konstruktsiialmaznogo instrumenta dlia sverleniia i frezerovaniia polimernykh kompozitsionnykh materialov [Construction diamond tools for drilling and milling of polymer composites]. *STIN* [Russian Engineering Research]. 2013, no. 6, pp. 9–15.
- [10] Dudarev A.S., Safonov I.I., Steshin A.A. Osobennosti mekhanicheskoi obrabotki polimernykh kompozitsionnykh materialov [Polymer composite machining features]. *Tekhnologiya mashinostroeniia* [Tekhnologiya Mashinostroeniya]. 2014, no. 1, pp. 23–26.
- [11] Frumkin V.D., Rubichev N.A. *Teoriia veroiatnostei i statistika v metrologii i izmeritel'noi tekhnike* [Theory of probability and statistics in Metrology and measurement technology]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1987. 168 p.
- [12] Lial'kina G.B. *Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta* [Mathematical processing of experimental results]. Perm', PNIPU publ., 2013. 77 p.
- [13] Ostrosablin N.I. *Ploskoe uprugoplasticheskoe raspredelenie napriazhenii okolo krugovykh otverstii* [Flat elastoplastic stress distribution around circular hole]. Novosibirsk, Nauka publ., 1984. 113 p.
- [14] Savin G.N. *Raspredelenie napriazhenii okolo otverstii* [The distribution of stresses around holes]. Kiev, Naukova dumka publ., 1968. 887 p.

Статья поступила в редакцию 08.04.2016

## Информация об авторе

ДУДАРЕВ Александр Сергеевич (Пермь) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Инновационные технологии машиностроения», зам. декана Аэрокосмического факультета. Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Российская Федерация, Комсомольский пр-т, д. 29, e-mail: dudarev@pstu.ru).

## Information about the author

DUDAREV Aleksandr Sergeevich (Perm) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Innovative Technologies in Mechanical Engineering; Deputy Dean, Aerospace Department. Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Russian Federation, Komsomolskiy Ave., Bldg. 29, e-mail: dudarev@pstu.ru).