

## Определение параметров формования отверстий в неотвержденном тканом композите методом прокалывания заостренным индентором

© М.А. Комков, Ю.З. Болотин, Т.В. Васильева

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Представлены экспериментальные исследования альтернативного метода получения цилиндрических отверстий в неотвержденном композитном материале — метода прокола. Формование отверстий в тканом препреге выполнялось заостренным металлическим стержнем (индентором). Приведены числовые значения продолжительности и величины подачи индентора в многослойных тканых пакетах в зависимости от диаметра инструмента, толщины образца, вязкости связующего. Разработаны математическая модель и методика расчета напряженно-деформированного состояния нитей утка и основы стеклоткани Т-13 в области индентора. Установлено, что для испытываемых образцов заданной толщины максимальные значения полученных отверстий находятся в пределах, соответствующих области практических размеров диаметров заклепок, винтов и болтов, применяемых в сборочных соединениях изделий ракетно-космической техники.*

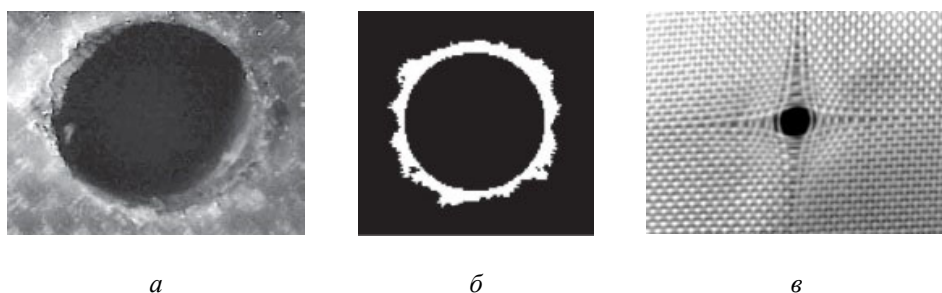
**Ключевые слова:** стеклоткань, тканый препрег, формование отверстий, метод прокалывания, индентор

**Вводная часть.** Проектируя композитные конструкции любого назначения, необходимо выбрать наиболее эффективный способ соединения отдельных элементов изделия между собой. При сборке изделий с металлокомпозитными или композитными деталями широко применяются механические и комбинированные соединения, т. е. с помощью болтов, штифтов, заклепок, игл, обеспечивающие хорошие результаты в сочетании с клеевыми соединениями [1–6].

Обычно отверстия получают в уже отвержденном композите путем сверления, приводящего к перерезыванию нитей, растрескиванию связующего, образованию межслойных трещин и ослаблению несущей способности изделия в районе отверстий. На рис. 1 показана термическая деструкция эпоксидной смолы, которую можно наблюдать при сверлении отверстий твердосплавным сверлом без смазочно-охлаждающих технологических сред в отвержденном стеклопластике (а), при ультразвуковой дефектоскопии видна область расслаивания структуры просверленного материала (б) [6].

Альтернативой сверлению отверстий в многослойном ортотропном или тканом пакете является их формование методом прокалывания заостренным стержнем — индентором [6–9], раздвигающим нити в еще неотвержденном композите. Несмотря на то что в процессе формования отверстия прокалыванием происходит нарушение регу-

лярной структуры материала изделия, нити не разрываются и силовое поле армирующих волокон не прерывается (см. рис. 1, в [7]). При этом из-за повышенного содержания волокон в области индентора композиционный материал уплотняется, что приводит к увеличению прочности на смятие между крепежным элементом и стенкой отверстия до 61 % [6] по сравнению с аналогичными образцами с просверленными отверстиями. Испытания на растяжение ленты ЭЛУР-0.08ПА ГОСТ 28006–88 со связующим ЭНФБ ТУ 1-596-36-2005 показали снижение прочности образцов с просверленными отверстиями по сравнению с проколотыми на 30 % [9]. Причем с увеличением диаметров отверстий процентное отношение увеличивалось.



**Рис. 1.** Дефекты отверстий, возникающие при сверлении стеклопластика (а, б) и прокалывании тканого композита (в)

Однако процесс формования отверстий методом прокалывания в многослойных тканых оболочках, плоских обшивках или деталях продольно-силового набора мало изучен даже на экспериментальном уровне, поэтому целью работы является экспериментальное исследование режимных и временных параметров процесса формования отверстий в стеклотканых препрегах методом прокалывания и определение предельных или допустимых размеров проколотых отверстий.

**Проведение экспериментов.** Для тканых материалов в отличие от однонаправленных или ортотропных композитов [7–9] достаточно сложно разработать математическую модель изменения силового поля и структуры материала в зоне прокалывания, поэтому определение параметров формования отверстий заостренным цилиндрическим стержнем базируется в основном на результатах экспериментальных исследований.

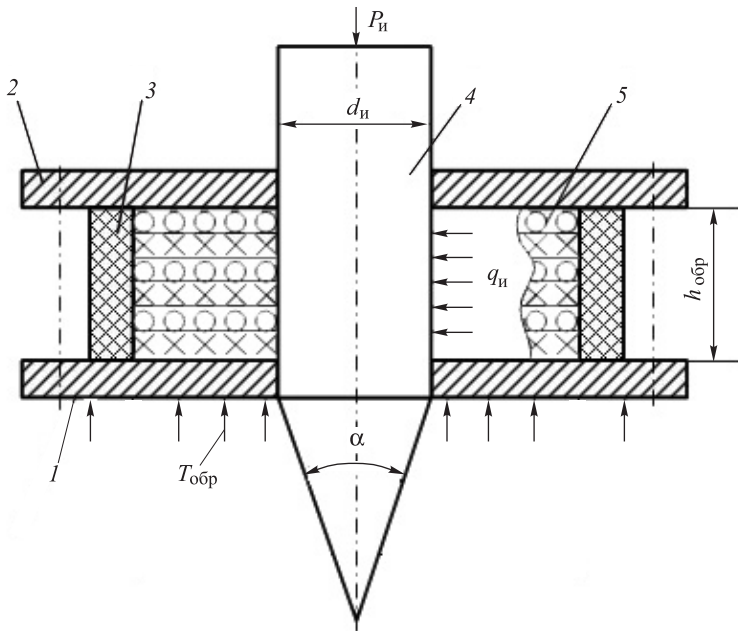
Будем считать, что тканый материал с еще неотвержденным связующим при прокалывании отверстий деформируется по схеме местного уплотнения нитей, за счет заполнения газовых пустот (до 3 %), перетекания или передавливания связующего через волокнистую пористую среду (через волокна и нити) в образовавшееся пространство между индентором и крайними нитями основы или утка. Процесс

взаимодействия между стержнем и тканым препрегом считается установившимся, а влияние реологических свойств [7] (т. е. восстановление среды после окончания процесса) не учитывается.

Процесс прокалывания происходит не мгновенно, для формирования отверстия требуется некоторое время. В исходном состоянии нити в ткани искривлены, имеют форму вытянутой синусоиды и являются идеально гибкими. При внедрении индентора нити основы и утка вытягиваются, выпрямляются и работают только на растяжение, при этом также наблюдается отклонение и искривление нитей основы и утка от исходного направления. В результате в области формируемого отверстия будут создаваться значительные растягивающие напряжения, которые приводят или к разрушению волокон в нитях, или в дальнейшем сохраняются в отвержденном материале в виде остаточных напряжений. В предельном состоянии при максимальном диаметре индентора крайние нити разрываются при нагрузке, равной разрушающей для данного типа нитей в состоянии их переработки.

Эксперименты по прокалыванию отверстий индентором проводились в многослойных образцах из стеклоткани Т-13 и эпоксидного связующего на основе смолы УП-643 в приспособлении, схематично показанном на рис. 2. В нижней 1 и верхней 2 плитах приспособления установлены центрирующие (направляющие) втулки с отверстиями, равными диаметру индентора  $d_{и}$ . Для предотвращения затягивания нитей основы и утка в отверстие на выходе инструмента в центрирующей втулке нижней плиты установлена раздвижная подкладная пластина, состоящая из четырех подвижных секторов с фторопластовым покрытием. Корпус приспособления снабжен обогревателем для снижения вязкости препрега при формовании отверстий.

Для определения технологических параметров формования отверстий методом прокалывания многослойные образцы тканого препрега 5 толщиной 2, 4, 6 и 8 мм прокалывались инденторами 4 с диаметрами 6, 7 и 9 мм. Толщина одного слоя препрега была равна 0,25 мм, общая толщина  $h_{обр}$  пакета обеспечивалась установкой ограничительных пластин 3 в приспособлении. Перед прокалыванием отверстий образцы нагревались в приспособлении до температуры  $T_{обр}$ , равной 60, 70 и 80 °С, что обеспечивало снижение вязкости связующего до приемлемого уровня. Измерялось максимальное значение силы продавливания индентора через образец и время перемещения стержня до полного прохождения максимальным диаметром инструмента всей толщины пакета. Результаты измерений представлены в табл. 1, где  $T$  — температура препрега,  $t_{экс}$  — продолжительность прокалывания отверстия,  $P_{и}$  — сила прокола.



**Рис. 2.** Схема прокалывания отверстий в многослойном тканом препреге:

1 — нижняя плита с обогревом образца до температуры  $T_{обр}$ ; 2 — верхняя плита; 3 — ограничительная пластина; 4 — индентор; 5 — слои стеклоткани;  $\bigcirc$ ,  $\times$  — нити основы и утка соответственно;  $q_{и}$  — давление на индентор от компонентов образца

Таблица 1

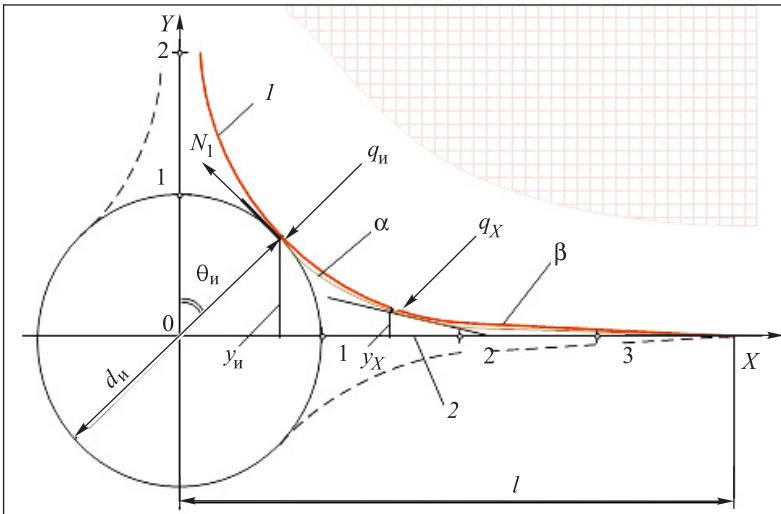
**Экспериментальные значения параметров прокола отверстий в пакетах из стеклоткани Т-13, пропитанной эпоксидным связующим**

$h_{обр}$ , мм	$d_{и}$ , мм	$T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$	
		$t_{экс}$ , с	$P_{и}$ , Н	$t_{экс}$ , с	$P_{и}$ , Н	$t_{экс}$ , с	$P_{и}$ , Н
2 (8 слоев)	6	7	560	6	400	6	600
	7	10	800	9	700	7	730
	9	13	1120	11	1040	10	1040
4 (16 слоев)	6	10	970	7	800	5	810
	7	12	1430	12	1300	7	1320
	9	15	2270	14	2100	11	2160
6 (24 слоя)	6	10	1400	10	1260	9	1300
	7	13	2160	13	2100	10	2160
	9	18	2700	14	2760	14	3070
8 (32 слоя)	6	12	2160	10	2000	10	2020
	7	15	2760	15	2600	12	2600
	9	19	3630	16	3460	15	3700

**Анализ результатов.** При прокалывании отверстий на крайнюю нить основы по координате  $OX$  вдоль линии раскола (или утка по координате  $OY$ ) действует суммарное давление  $q_X$  (рис. 3) от компонентов препрега, которое достигает своего максимального значения на поверхности инструмента:

$$q_X^{\max} = q_{\text{н}} = q_{\sigma} + q_{\text{ж}}, \quad (1)$$

где  $q_{\sigma}$  — давление от силы натяжения нитей  $N_1$ , вызванное удлинением искривленных нитей основы или утка в области индентора;  $q_{\text{ж}}$  — давление жидкой среды (вязко-текучего связующего), вызванное уплотнением композиционного материала в области внедрения индентора.



**Рис. 3.** Геометрия искривления нитей тканого препрега в направлении  $OX$  и  $OY$  при формовании отверстия методом прокалывания:

$1$  — нить;  $2$  — стрелка раскола;  $\theta_{\text{н}}$  — угол касания крайней по стрелке раскола нити поверхности индентора;  $l$  — длина стрелки раскола;  $\alpha$ ,  $\beta$  — показательная и степенная функции;  $y_x$  — смещение нитей основы или утка по стрелке раскола от своего исходного положения, мм;  $y_{\text{н}}$  — смещение

$$\text{нитей в области индентора, } y_{\text{н}} = (d_{\text{н}} / 2) \cos \theta_{\text{н}}$$

Очевидно, что сила, необходимая для получения отверстий, будет равна

$$P_{\text{н}} = \pi d_{\text{н}} h_{\text{обр}} f_{\text{тр}} q_{\text{н}},$$

где  $f_{тр}$  — коэффициент трения между стальным стержнем и тканым препрегом, равный 0,2. Из этого определяется суммарное давление на цилиндрический стержень по толщине образца:

$$q_X = P_{и} / (\pi d_{и} h_{обр} f_{тр}). \quad (2)$$

В процессе прокалывания образца нити основы и утка в каждом слое раздвигаются и искривляются, в образующемся пространстве в начальный момент времени давление жидкой среды (связующего) снижается до нуля, а за стрелкой раскола (см. рис. 3) повышается до своего максимального значения.

По мере продвижения стержня через образец давление выравнивается за счет перетекания жидкого связующего через волокна нитей в образующееся пространство, достигая установившегося значения  $q_{ж}$ , а искривленные нити основы и утка занимают свое уравновешенное положение. Изменение давления жидкой среды во времени прокола отверстий до своего установившегося значения может быть учтено показательной функцией

$$q_{ж}(t) = q_{ж} e^{-t/t_{экс}}, \quad (3)$$

где  $t$  — текущее время;  $e$  — число Эйлера,  $e \approx 2,718$ .

Изменение средней продолжительности времени прокалывания образцов в зависимости от их толщины для трех диаметров отверстий представлено на рис. 4.

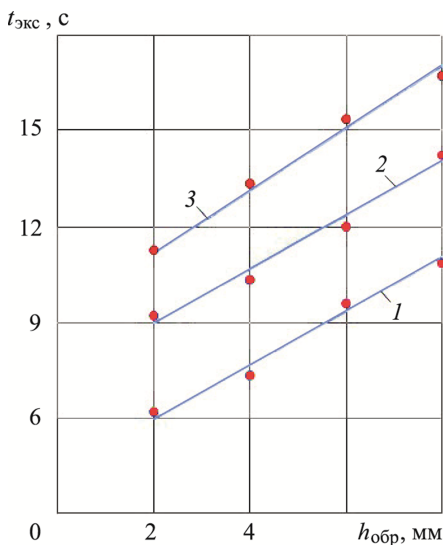


Рис. 4. Изменение среднего времени прокалывания отверстий от толщины образцов для диаметров, равных 6 (1), 7 (2) и 9 (3) мм

Для того чтобы определить давление жидкого связующего на индентор, воспользуемся формулой Дарси [10], в соответствии с которой скорость фильтрации жидкости через волокнистую пористую среду определяется уравнением

$$U_{\phi} = \frac{K_d q_{ж}(t)}{\mu_{ж} y_X} = \frac{dy_X}{dt}, \quad (4)$$

где  $K_d$  — коэффициент проницаемости волокнистой структуры в поперечном направлении,  $мм^2$ ;  $\mu_{ж}$  — динамическая вязкость связующего, Па·с. Подставив функцию (3) в уравнение (4) и проведя интегрирование, найдем

$$q_{\text{ж}} = \frac{\mu_{\text{ж}} y_{\text{и}}^2}{2K_{\text{д}} t_{\text{экс}}} \left( \frac{e}{e-1} \right). \quad (5)$$

В первом приближении угол  $\theta_{\text{и}}$  можно принять равным  $45^\circ$ , а вязкость связующего в тканом препреге  $\mu_{\text{ж}}$  [11] равной 3,5, 2,9 и 2,4 Па·с для температур 60, 70 и 80 °С соответственно.

Коэффициент проницаемости  $K_{\text{д}}$  для регулярной пористой структуры из цилиндрических стержней (волокон) и ламинарного течения жидкости может быть определен по формуле Козени — Кармана [5]:

$$K_{\text{д}} = \frac{c d_{\text{в}}^2}{16l} \frac{m^3}{(1-m)^2}, \quad (6)$$

где  $c$  — постоянная, характеризующая форму сечения поперечных каналов,  $c = 0,56$ ;  $d_{\text{в}}$  — эффективный диаметр обтекания (диаметр стекловолокна, равный 6 мкм);  $l$  — коэффициент извилистости каналов, равный 1,25;  $m$  — пористость нитей основы и утка в состоянии переработки, равная 0,3. Подстановка числовых значений указанных величин в зависимость (6) дает  $K_{\text{д}} = 0,555 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^2$ .

Результаты расчетов давлений компонентов композиционного материала на поверхность индентора и их среднеквадратичные отклонения, не превышающие 12–14 %, графически представлены на рис. 5. Давление жидкой среды на индентор  $q_{\text{ж}}$  определено по уравнению (5) с использованием экспериментальных данных времени прокола тканых образцов, представленных в табл. 1 и на рис. 4. Подстановка значений давления  $q_{\text{ж}}$  в равенства (1) с учетом (2) и обработки экспериментальных данных определяет

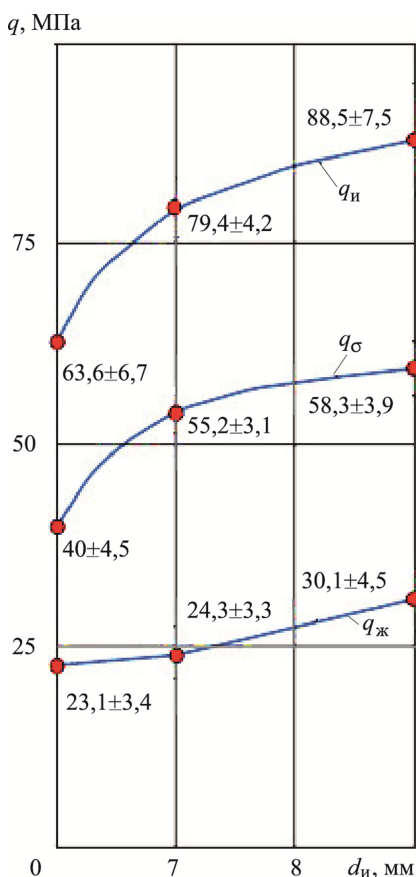


Рис. 5. Изменение средних значений давления компонентов композиционного материала на поверхность индентора

давление  $q_{\sigma}$  на индентор от силы натяжения нитей  $N_1$  (см. рис. 3) при проколе отверстий.

Ткань полотняного плетения марки Т-13-78 по ГОСТ 19170–73 изготовлена из крученых нитей ВМС6-7,2×1×3×5 с линейной плотностью  $T_{\text{экс}} = 108$  мг/м. Число нитей основы 16 шт/см, утка — 10 шт/см. Разрывная нагрузка  $Q$  образца шириной 25 мм вдоль основы равна 2100 Н, вдоль утка — 1200 Н. Площадь сечения всех волокон в нити  $S_{\text{в}} = T_{\text{экс}} / \rho_{\text{в}} = 4,186 \cdot 10^{-2}$  мм<sup>2</sup> ( $\rho_{\text{в}}$  — плотность стекловолокна, равная 2,58 г/см<sup>3</sup>). Прочность на растяжение нитей вдоль основы  $\sigma_{\text{в}} = Q / 40S_{\text{в}} = 1254$  МПа, а вдоль утка — 1147 МПа. При объемном содержании волокна  $\vartheta_{\text{в}}$  в стеклонити, равном 0,7, площадь сечения одной нити со связующим будет равна  $S_{\text{к,н}} = S_{\text{в}} / \vartheta_{\text{в}} = 5,98 \cdot 10^{-2}$  мм<sup>2</sup>. При толщине одного слоя тканого препрега, равного 0,25 мм, толщина нити, охватывающей индентор по диаметру в виде оболочки, составит  $\delta_{\text{н}} = S_{\text{к,н}} / 0,25 = 0,2392$  мм.

Зная давление  $q_{\sigma}$  (см. рис. 5), возникающее от натяжения нитей, по зависимости  $N_1 = \sigma_{\text{н}} \delta_{\text{н}} = q_{\sigma} d_{\text{н}} / 2$  определим растягивающие напряжения в нитях основы и утка, соприкасающихся с индентором  $\delta_{\text{н}} = 2,09 q_{\sigma} d_{\text{н}}$ . Рассчитанные и обработанные средние значения напряжений в нитях представлены на рис. 6.

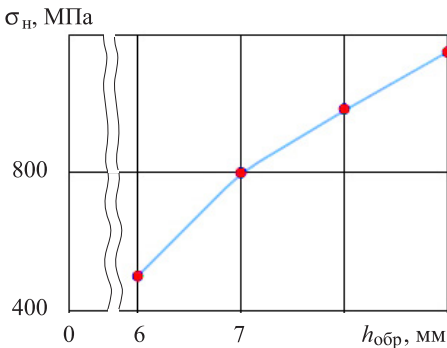


Рис. 6. Изменение значений растягивающих напряжений в нитях основы и утка

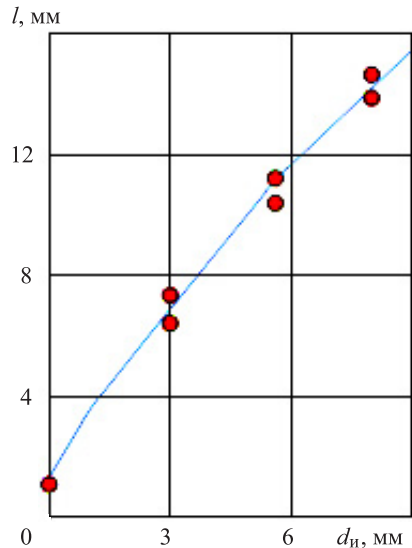


Рис. 7. Изменение длины стрелки раскола от диаметра индентора



Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными при испытаниях полоски ткани шириной 25 мм, показало, что напряжения в крайних нитях, соприкасающихся с поверхностью индентора диаметром 9 мм, близки предельным значениям, соответствующим нитям стеклоткани марки Т-13-78.

Найдем аналитическое решение, определяющее величину напряжения в нитях в области индентора, в зависимости от степени искривления нитей, диаметра прокалываемых отверстий и длины стрелки раскола (рис. 7). Сравним результаты решения со значениями напряжений (см. рис. 6).

Геометрия искривленной линии, занимаемой нитью от начала касания индентора ( $\theta = 45^\circ$ ) и на всей длине по стрелке раскола, может быть записана показательной  $\alpha$  или степенной  $\beta$  функциями (см. рис. 3) в зависимости от плотности плетения полотняной ткани. Показательная и степенная функции, записанные в относительных координатах, после определения постоянных величин имеют вид

$$y = be^{-ax} = 2,13 / e^{1,56x}; \quad (7)$$

$$y = bx^{-a} = 0,346 / x^{2,062}. \quad (8)$$

Решение уравнений (7) и (8) позволяет определить длину выпрямленных (натянутых) и напряженных силой  $N_1$  нитей и их относительное суммарное удлинение

$$\varepsilon_{\Sigma} = \varepsilon_{\text{раст}} + \varepsilon_{\text{искр}}, \quad (9)$$

где  $\varepsilon_{\text{раст}}$  — удлинение от растяжений нитей;  $\varepsilon_{\text{искр}}$  — относительное удлинение от выпрямления искривленных нитей.

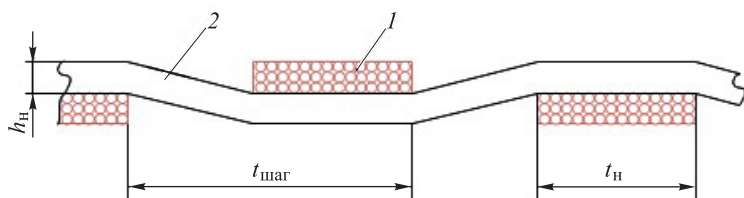
В результате расчетов, проведенных по уравнениям (7) и (8), для определения суммарного удлинения нитей, которое зависит от диаметров прокалываемых отверстий и длины стрелки раскола, были получены значения относительных деформаций в области индентора (табл. 2).

Таблица 2

Результаты расчетов по уравнениям (7), (8)

Длина стрелки раскола, $l$ , мм	Диаметр, $d_n$ , мм	Расчетные значения, %	
		для показательной функции (7)	для степенной функции (8)
11,5	6	5,27	6,84
12,8	7	5,52	7,16
15,6	9	5,86	7,61

Увеличение удлинения нитей за счет их выпрямления может быть найдено по стилизованной форме вытянутой синусоиды (рис. 8). Шаг укладки нитей основы между собой для ткани Т-13 составляет 0,65 мм, а утка — 1,0 мм при ширине  $t_{\text{шаг}} = 0,478$  и толщине  $h_{\text{н}} = 0,125$  мм. При этом среднее значение удлинения нитей основы и утка за счет их выпрямления составляет  $\varepsilon_{\text{искр}} = 4,43$  %.



**Рис. 8.** Форма изгиба нитей полотняного плетения ткани Т-13 в виде стилизованной синусоиды ( $t_{\text{н}}$  — ширина нитей):  
1 — нить основы; 2 — нить утка

Таким образом, для степенной функции, согласно уравнению (9), максимальное удлинение  $\varepsilon_{\text{раст}}$  от растяжений нитей для отверстия диаметром 9 мм составит 3,18 %, а минимальное для диаметра 6 мм — 2,41 %. Это соответствует напряжению в нитях от растяжения  $\sigma_{\text{раст}} = \varepsilon_{\text{раст}} E_{\text{н}}$ , имеющему значения 1336 и 1012 МПа ( $E_{\text{н}}$  — модуль упругости препрега стеклонитей ткани в состоянии переработки,  $E_{\text{н}} = 42$  ГПа). Для показательной функции значения напряжений  $\sigma_{\text{раст}}$ , составляющие 601 и 353 МПа, будут существенно меньше. Однако предложенные степенные и показательные функции в основном отражают геометрию искривления нитей основы и утка в тканях полотняного плетения и могут быть рекомендованы для дальнейших экспериментально-теоретических исследований процесса формирования отверстий в тканых композитных изделиях методом прокалывания.

В заключение приведем результаты испытаний на растяжение тканых образцов стеклопластиковых лент, предназначенных для ремонта нефте- и газопроводов, с просверленными и отформованными методом прокалывания отверстиями диаметром 6 мм. В качестве образцов использовались ленты шириной 360 и толщиной 2,0 мм, состоящие из восьми слоев стеклоткани Т-13, пропитанной эпоксидным связующим ЭП-5120. По краям образцов — лент с отформованными законцовками — с двух сторон устанавливались металлические накладки с захватами, скрепленные болтами диаметром 6 мм в трех разнесенных на 72 мм точках.

Сдвиг накладок образцов лент произошел из-за разрушения отверстий при нагрузке 7050 Н для просверленных и 7900 Н для отформованных отверстий соответственно.

Достигнуто 12%-ное увеличение несущей способности болтовых соединений композитных лент с проколотыми отверстиями.

### Выводы

1. В процессе экспериментов установлены оптимальные диаметры отверстий, которые могут быть получены методом прокалывания.

2. Разработаны математическая модель и методика расчета напряженно-деформированного состояния нитей материала в области внедрения индентора.

3. Испытания образцов на растяжение показали 12%-ное увеличение разрывной силы для отформованных отверстий по сравнению с просверленными, что дает возможность рекомендовать предложенный метод к применению в производстве изделий авиакосмической техники.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Воробей В.В., Сироткин О.С. *Соединения конструкций из композиционных материалов*. Ленинград, Машиностроение, 1985, 168 с.
- [2] Раскутин А.Е., Хрульков А.В., Гирш Р.И. Технологические особенности механической обработки композиционных материалов при изготовлении деталей конструкций (обзор). *Труды ВИАМ*, 2016, № 9. [dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12](http://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12). URL: [http://viam-works.ru/articles?art\\_id=1013](http://viam-works.ru/articles?art_id=1013) (дата обращения 04.08.2017).
- [3] Макаров В.Ф., Мешкас А.Е., Ширинкин В.В. Исследование процессов механической обработки деталей авиационно-космической техники из новых композиционных материалов. *Новые материалы и технологии в машиностроении*, 2015, № 22, с. 14–22.
- [4] Криворучко Д.В., Залого В.А., Колесник В.А., Емельяненко С.С., Некрасов С.С. *Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов (аналитический обзор)*. Сумы, Университетская книга, 2013, 272 с.
- [5] Браутман Л., Крок Р., Чамис К., ред. *Композиционные материалы. В 8 томах. Т. 8. Анализ и проектирование конструкций*. Москва, Машиностроение, 1978, 264 с.
- [6] Комков М.А., Колганов А.В. Моделирование процесса формования отверстий в композитных конструкциях методом прокалывания неотвержденного полимерно-волоконистого материала. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2007, № 3, с. 33–47.
- [7] Комков М.А. Реологические свойства полимерных связующих, используемых при намотке изделий из композиционных материалов. *Клеи. Герметики. Технологии*, 2012, № 3, с. 30–35.
- [8] Комков М.А., Колганов В.И., Колганов А.В., Сахоненко В.М. Сдвиговые перемещения семейств нитей в неотвержденных тканых композитах под действием внешних нагрузок. *Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении*, 2004, вып. 1 (134), 2 (135), с. 51–55.

- [9] Болотин Ю.З., Васильева Т.В., Василенко Е.В. Сравнение работоспособности конструкций из композиционных материалов с отверстиями, полученными сверлением и прокалыванием. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. 3.  
URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/hidden/1332.html> (дата обращения 04.08.2017).
- [10] Ritzi R.W. Jr., Bobeck P. Comprehensive principles of quantitative hydrogeology established by Darcy (1856) and Dupuit (1857). *Water Resources Research*, 2008, vol. 44, W10402. DOI 10.1029/2008WR007002.  
URL: <http://gidropraktikum.narod.ru/Darcy-1856-and-Dupuit-1857.pdf> (дата обращения 04.08.2017).
- [11] Михайлин Ю.А. *Конструкционные полимерные композиционные материалы*. Санкт-Петербург, Научные основы и технологии, 2008, 822 с.

Статья поступила в редакцию 19.05.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Комков М.А., Болотин Ю.З., Васильева Т.В. Определение параметров формования отверстий в неотвержденном тканом композите методом прокалывания заостренным индентором. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 9.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-9-1678>

**Комков Михаил Андреевич** окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». Автор более 130 научных работ в области технологии машиностроения и композитных конструкций.

**Болотин Юрий Зиновьевич** окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана. Старший преподаватель кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 15 научных работ в области технологии машиностроения и композитных конструкций.

**Васильева Татьяна Владимировна** окончила Московский государственный авиационно-технологический университет им. К.Э. Циолковского. Ассистент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более восьми научных работ в области технологии машиностроения и композитных конструкций.

## Defining parameters of apertures moulding in the uncured woven composite using the technique of puncturing with the pointed indenter

© M.A. Komkov, Yu.Z. Bolotin, T.V. Vasilyeva

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*We introduce experimental research of the alternative approach to obtaining cylindrical holes in the uncured woven composite, i.e. the puncturing technique. Apertures moulding in the woven prepreg was performed with the pointed metal core (indenter). The article provides numeric values for the duration and feed rate of the indenter in the multilayered woven bags depending on the diameter of the tool, the thickness of the specimen and the viscosity of the bonding material. We have developed a mathematical model and a procedure for calculating the strain-stress state of the shoot and the basis of the fiberglass cloth T-13 in the area of indenter. It has been established that for the test specimens of the given thickness the maximum values of the obtained holes fall within the limits corresponding to the area of practical diameters dimensions of the rivets, screws and bolts used in the assembly joints of the rocket and space equipment.*

**Keywords:** fiberglass cloth, woven prepreg, apertures moulding, puncturing technique, indenter

### REFERENCES

- [1] Vorobey V.V., Sirotkin O.S. *Soedineniya konstruksiy iz kompozitsionnykh materialov* [Assembly of constructions made from composite materials]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1985, 168 p.
- [2] Raskutin A.E., Khrulkov A.V., Girsh R.I. *Trudy VIAM — Proceedings of VIAM*, 2016, no. 9. [dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12](http://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12). Available at: [http://viam-works.ru/ru/articles?art\\_id=1013](http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1013) (accessed August 4, 2017).
- [3] Makarov V.F., Meshkas A.E., Shirinkin V.V. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii — New materials and technologies in mechanical engineering*, 2015, no. 22, pp. 14–22.
- [4] Krivoruchko D.V., Zaloga V.A., Kolesnik V.A., Emelyanenko S.S., Nekrasov S.S. *Mekhanicheskaya obrabotka kompozitsionnykh materialov pri sborke letatelnykh apparatov (analiticheskiy obzor)* [Machining of composite materials in the assembly of aircraft: an analytical review]. Sumy, Universitetskaya kniga Publ., 2013, 272 p.
- [5] Brautman L., Krok R., ed. *Kompozitsionnye materialy. V 8 tomakh. T. 8. Analiz i proektirovanie konstruksiy* [Composite materials. In 8 vols. Vol. 8. Analysis and design of structures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 264 p.
- [6] Komkov M.A., Kolganov A.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2007, no. 3, pp. 33–47.
- [7] Komkov M.A. *Klei. Germetiki. Tekhnologii — Polymer Science, Series D*, 2012, no. 3, pp. 30–35.
- [8] Komkov M.A., Kolganov V.I., Kolganov A.V., Sakhonenko V.M. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Ser. 15. Kompozitsionnye nemetallicheskie materialy v mashinostroenii — Enginery problems. Series 15. Composite non-metallic materials in mechanical engineering*, 2004, no. 1 (134), 2 (135), pp. 51–55.

- [9] Bolotin Yu.Z., Vasileva T.V., Vasilenko E.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2014, iss. 3. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/hidden/1332.html> (accessed August 4, 2017).
- [10] Ritzi R.W. Jr., Bobeck P. *Water Resources Research*, 2008, vol. 44, W10402. DOI 10.1029/2008WR007002. Available at: <http://gidropraktikum.narod.ru/Darcy-1856-and-Dupuit-1857.pdf> (accessed August 4, 2017).
- [11] Mikhaylin Yu.A. *Konstruksionnye polimernye kompozitsionnye materialy [Structural polymer composite materials]*. St. Petersburg, Nauchnye osnovy i tekhnologii Publ., 2008, 822 p.

**Komkov M.A.** graduated from Bauman Moscow Higher Technical School, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Rocket-and-Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 130 scientific works in the field of mechanical engineering technologies and composite constructions.

**Bolotin Yu.Z.** graduated from Bauman Moscow Higher Technical School, Senior Lecturer, Department of Rocket-and-Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 15 scientific works in the field of mechanical engineering technologies and composite constructions.

**Vasilyeva T.V.** graduated from Russian State Technological University named after K.E. Tsiolkovsky (MATI), Assistant of the Department of Rocket-and-Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 8 scientific works in the field of mechanical engineering technologies and composite constructions.