

УДК 539.374.002.62

М. А. Комков, А. В. Колганов

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ В КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ МЕТОДОМ ПРОКАЛЫВАНИЯ НЕОТВЕРЖДЕННОГО ПОЛИМЕРНО-ВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА**

*Рассмотрена модель прокола отверстий заостренным стержнем — индентором неотвержденного композиционного материала с продольно-поперечной схемой армирования. Под действием локальной нагрузки, нормальной к плоскости многослойного пакета, происходят сдвиговые смещения нитей в каждом слое. Получены аналитические зависимости, позволяющие описать форму и протяженность нарушения регулярной структуры ортотропного материала, изменение коэффициента армирования и напряженное состояние слоистого материала в районе проколотых отверстий. Представлены результаты экспериментов по проколу цилиндрических отверстий в неотвержденных композиционных материалах.*

При создании композитных изделий любого назначения возникает необходимость сборки и соединения отдельных элементов конструкции между собой. Широко применяются механические соединения силовыми точками: болтами, штифтами, заклепками, иглами, которые в комбинации с клеевыми соединениями дают хорошие результаты [1]. Локальные соединения характеризуются, с одной стороны, ограниченной зоной контакта, а с другой стороны, — высоким уровнем напряжений в зоне соединения деталей.

Реализация механических соединений связана со сверлением отверстий в уже отвержденных композитных деталях, что приводит к перерезанию нитей и потери прочности при растяжении изделий, растрескиванию связующего и расслоению композиционного материала по стенкам отверстий (кромочный эффект, [2]). При этом коэффициент концентрации напряжений при растяжении стенки изделия в районе просверленных отверстий составляет 3–4 единицы [2, 3].

Альтернативой просверленным отверстиям является формирование отверстий методом прокалывания в еще неотвержденном полимерно-волокнистом материале. Хотя в процессе формирования отверстия с помощью заостренного стержня — индентора — происходит раздвигание нитей и нарушение регулярной структуры материала изделия, однако, силовое поле армирующих волокон в этом случае не прерывается, а

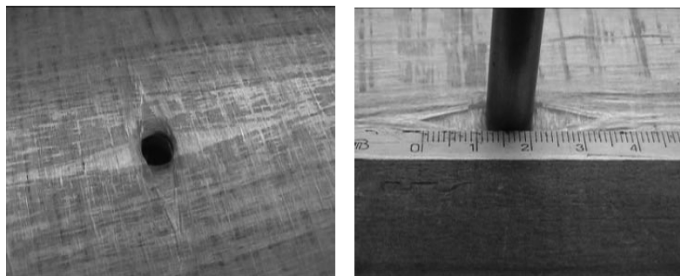
стенка отверстия из-за повышенного содержания волокон уплотняется, что приводит к увеличению прочности на смятие между крепежным элементом и стенкой отверстия.

Испытания на растяжение и смятие, проведенные на плоских образцах из тканых углепластиков [4] и стеклопластиков [5] с отформованными отверстиями, показали соответственно увеличение прочности на 32...38% при растяжении образцов [4, 5], а при смятии стенки отверстия металлическим стержнем — до 61% [4] по сравнению с аналогичными образцами, но с просверленными отверстиями. Диаметры отверстий в исследуемых образцах составляли  $d = 3,15 \dots 9,35$  мм. Положительный результат с прокалыванием отверстий диаметром 16 мм в спирально намотанном стеклопластике достигнут при внеполюсной заделке штуцера в тонкостенную оболочку при изготовлении торовых баллонов [6].

Указанные работы носят экспериментальный характер, в них не рассматриваются изменения регулярной структуры материала вблизи проколотых отверстий, не указываются режимные параметры процесса их формования, не приводятся предельные или допустимые размеры индентора и зависимость этих параметров от первоначальной (исходной) структуры слоистого материала, толщины, количества и обжатия слоев оболочки.

На основе предварительных экспериментов (рис. 1) была разработана модель прокола цилиндрическим индентором композиционного материала с продольно-поперечной схемой армирования, позволяющая аналитически описать форму и протяженность нарушения регулярной структуры ортотропного материала, изменение коэффициента армирования и напряженное состояние слоистого материала в районе проколотых отверстий.

При внедрении заостренного стержня диаметром  $d_n$  в многослойный неотвержденный полимерно-волоконистый материал (рис. 2) нити в районе формирующегося отверстия сдвигаются от своего исходного положения, изгибаются и растягиваются. Наибольшему деформированию подвергаются нити, соприкасающиеся с поверхностью стержня,



**Рис. 1. Общий вид проколотых отверстий в образцах ортотропного стеклопластика**

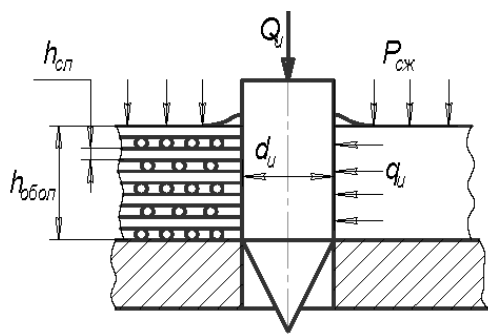
а также нити, лежащие в нижних слоях оболочки около оправки. При этом образуется так называемая “стрелка раскола” слоя, протяженностью в несколько диаметров стержня (см. рис. 1).

Процесс прокалывания не может быть мгновенным и для формирования отверстия требуется некоторое время. В конце процесса, при установившемся равновесии, определяются геометрия и границы зоны изменения исходной структуры материала, коэффициент армирования волокон в зоне уплотнения, а также напряженное состояние крайних нитей по стрелке раскола и вблизи отверстия. В предельном состоянии крайние нити, соприкасающиеся со стержнем, разрываются при разрушающей нагрузке для данного типа нитей в состоянии их переработки.

По мере продвижения конической части стержня до цилиндрического участка зона уплотнения материала возрастает с одновременным повышением внутрислойного давления  $q_u$ , приводящего к передавливанию или течению вязкой жидкости через пористую волокнистую арматуру материала. При достаточно медленном процессе прокалывания через некоторое время наступает уравновешенное состояние измененной структуры материала с внедренным в него индентором. Поэтому первый шаг при рассмотрении процесса формирования отверстия сводится к определению геометрии линии раскола, образованной в первоначально однородной структуре исходного ортотропного материала.

Математическое моделирование процесса прокалывания отверстий в податливом слоистом полимерно-волокнистом материале — препреге — должно базироваться на физических принципах, обуславливающих формирование сил сопротивления неотвержденного композита (среды) внедрению в него металлического стержня — индентора. При этом в моделях необходимо использовать константы, размерные или безразмерные параметры, легко определяемые экспериментально в зависимости от структурных характеристик полимерно-волокнистого материала.

Будем считать, что исходный композитный материал изделия представляет собой однородную среду с коэффициентом армирования волокон, равным  $\vartheta_v$  (рис. 3). Полимерно-волокнистый материал при внедрении индентора деформируется по схеме местного уплотнения, при-



**Рис. 2.** Схема силового воздействия индентора на многослойный пакет полимерно-волокнистого материала

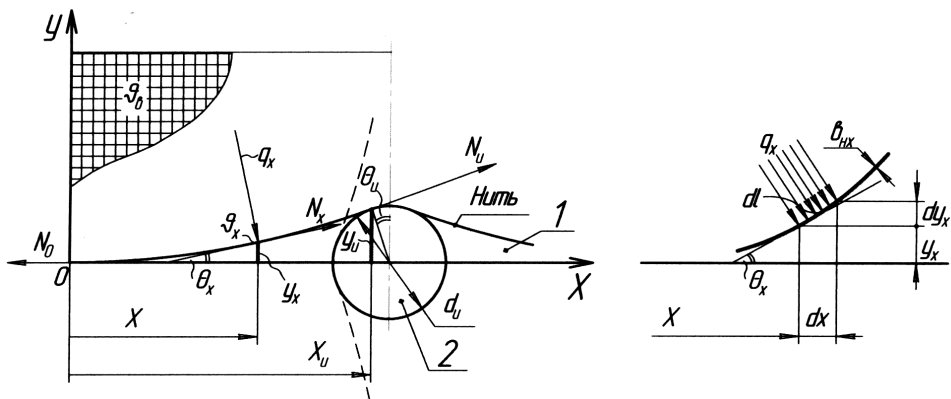


Рис. 3. Геометрия раскола слоя (1) при формировании отверстия (2) в неотвержденном ортотропном полимерно-волокнистом материале

водящего к увеличению исходного коэффициента армирования волокон вдоль стрелки раскола до значения  $\vartheta_x = \vartheta_B + \Delta\vartheta_x$ , где  $\Delta\vartheta_x$  — приращения коэффициента армирования волокон.

Уплотнение волокон происходит за счет заполнения жидкотекучим связующим образующихся пустот, удаления исходных газовых включений, перетекания связующего через пористую среду наружу, а также за счет местного увеличения толщины стенки конструкции (выпучивания, см. рис. 1 и 2) в районе формируемого отверстия, если нет внешнего обжатия  $P_{сж}$  многослойного пакета. При этом влияние реологических факторов, т.е. восстановление среды после окончания процесса, в данной постановке задачи не учитывается. Другие ограничения будут оговорены ниже.

Для установившегося равновесия сил упругости нити и реакции неотвержденного композиционного материала запишем систему уравнений в интегральной форме, позволяющую для заданного материала и размеров индентора найти взаимосвязь параметров и их конкретные значения или величины.

Пусть плоский многослойный пакет состоит из однонаправленных слоев, пропитанных связующим нитей, толщиной  $h_{сл}$  (см. рис. 2), последовательно уложенных (намотанных) в продольном (координата  $OX$ ) и поперечном (координата  $OY$ ) направлениях (см. рис. 3).

При внедрении индентора в многослойный ортотропный пакет в нем возникает внутрислойное давление  $q_x$ , обусловленное сдвигом и уплотнением нитей в плоскости  $XY$ . При этом в крайних по стрелке раскола нитях возникнет максимальная растягивающая сила

$$F_x = \sigma_n(x)b_n(x)h_{сл} = N_x h_{сл}, \quad (1)$$

где  $\sigma_n(x)$  и  $N_x$  — текущие напряжение и сила растяжения в нитях,  $b_n(x) = b_n\vartheta_B/\vartheta_x$  — текущая толщина нити,  $b_n$  и  $\vartheta_B$  — соответственно

исходные (начальные) значения толщины нити со связующим и коэффициента армирования волокон. При этом сила в крайних нитях будет изменяться от  $N_{x=0} = 0$  до значения  $N_x = N_n$ , когда нить соприкоснется с индентором в точке с координатой  $x = x_n$ .

С другой стороны, проекция элемента сил  $q_x dl$  на ось  $OX$  (см. рис. 3) дает  $q_x dl \sin \theta_x$ . Произведя суммирование вдоль координаты  $x$ , получим

$$\int q_x \sin \theta_x dl_x = \int_0^x q_x \operatorname{tg} \theta_x dx = N_x \cos \theta_x, \quad (2)$$

где  $\theta_x$  — угол наклона нити к оси  $OX$ ,  $dl_x = dx / \cos \theta_x$  — элемент дуги кривой.

Отход нити от своего первоначального положения или прогиб нити

$$y_x = \int_0^x \operatorname{tg} \theta_x dx. \quad (3)$$

При этом нить удлинится на величину разности длин между кривой и прямой нитями:  $l_x - x = \Delta l_x$ , а относительная деформация нити

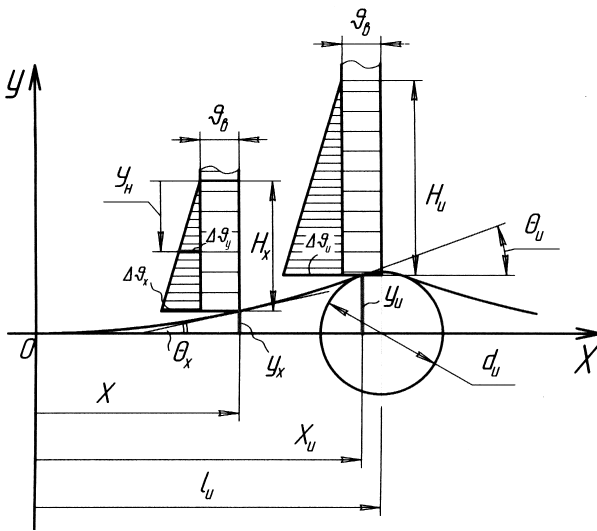
$$\varepsilon_n(x) = \frac{1}{x} \int_0^x \left( \frac{1}{\cos \theta_x} - 1 \right) dx = \frac{1}{x} \int_0^x \frac{dx}{\cos \theta_x} - 1 = \frac{N_x - N_0}{E_{n,x} b_{n,x}}, \quad (4)$$

где  $N_0$  — начальная сила в нити, например, от технологического натяжения при намотке композитной оболочки;  $E_{n,x} = E_n \vartheta_x / \vartheta_b$  и  $E_n$  — соответственно текущий и исходный модули упругости пропитанной связующим нити в состоянии переработки.

Далее переходим к определению коэффициента армирования  $\vartheta_x$  в зоне уплотнения волокон, внутрислойного давления  $q_x$  на нить и сил  $N_x$  в натянутой по стрелке раскола нити. Напряжения поперечного сжатия нитей возникают при сдвиге слоя и уравниваются растяжением нитей. При этом максимальные  $\vartheta_x$ ,  $q_x$  и  $N_x$  — в крайних по стрелке раскола нитях, а вдали от индентора растяжение нитей  $N_x$  и давление на них  $q_x$  при прокалывании отверстия падают до нуля.

Внедрение индентора в стенку слоистой оболочки предполагает изменение плотности упаковки волокон в районе отверстия и удаление наружу излишков связующего, равных по объему внедренному стержню. Это значит, что вдоль стрелки раскола по координате  $OX$  будет происходить увеличение исходного коэффициента армирования волокон  $\vartheta_b$  до значения, равного  $\vartheta_x = \vartheta_b + \Delta \vartheta_x$ , причем неравномерное.

По мере удаления от отверстия и от стрелки раскола по координате  $OY$  степень уплотнения волокон будет снижаться и на границе



**Рис. 4.** Схема уплотнения полимерно-волокнистого материала по стрелке раскола и на границе с индентором

зоны уплотнения  $H_x$  (рис. 4) приращение коэффициента армирования  $\Delta\vartheta_y(x)$  снизится до нуля, т.е. будет достигнуто исходное состояние волокнистого материала, где значение коэффициента армирования равно  $\vartheta_B$ .

Будем считать с некоторой долей погрешности, что переуплотнение волокон по ширине зоны уплотнения  $H_x$  как в районе внедренного индентора, так и по всей протяженности стрелки раскола происходит линейно по закону треугольника.

На основе этого утверждения и принимая обозначения на рис. 4 можем записать два соотношения:

$$\frac{\vartheta_B}{\Delta\vartheta_x} = \frac{H_x}{2y_x}, \quad \frac{\vartheta_B}{\Delta\vartheta_n} = \frac{H_n}{2y_n} = \frac{H_n}{d_n \cos \theta_n}, \quad (5)$$

где  $d_n$  — диаметр индентора;  $\Delta\vartheta_n$  и  $H_n$  — приращение коэффициента армирования и ширина зоны уплотнения волокон в районе индентора;  $\theta_n$  — угол касания крайней по стрелке раскола нити поверхности индентора.

С другой стороны, рассматривая треугольники уплотнения (см. рис. 4), запишем  $\Delta\vartheta_x/H_x = \Delta\vartheta_n/H_n$ . Подставляя данное соотношение в равенства (5), найдем две неизвестные величины, выраженные через диаметр индентора и прогиб нити  $y_x$ :

$$\Delta\vartheta_x = \Delta\vartheta_n \sqrt{\frac{2y_x}{d_n \cos \theta_n}}, \quad H_x = \frac{\vartheta_B}{\Delta\vartheta_n} \sqrt{2y_x d_n \cos \theta_n}. \quad (6)$$

Максимальную величину переуплотнения волокон в крайней по стрелке раскола нити  $\Delta\vartheta_n = \Delta\vartheta_{n.\max} = \Delta\vartheta_m$  и максимальную ширину зоны уплотнения волокон в слое  $H_n = H_{n.\max} = H_m$  найдем

из следующего условия: при максимальном диаметре индентора  $d_{и} = d_{и.макс} = d_m$  крайняя нить, соприкасающаяся с индентором, находится в состоянии разрушения, при этом коэффициент армирования волокон  $\vartheta_m = \vartheta_{в.макс} = \vartheta_{в} + \Delta\vartheta_m$  и угол касания нити индентора  $\theta_{и} = \theta_{и.макс} = \theta_m$  будут также иметь свои максимальные значения.

Известно, что при гексагональной схеме укладки цилиндрических волокон, когда они соприкасаются друг с другом, максимальная плотность упаковки  $\vartheta_{в.г} = \pi/4 = 0,785$ , а при тетрагональной укладке волокон  $\vartheta_{в.т} = \pi/2\sqrt{3} = 0,907$ . Считая распределение волокон по обеим схемам укладки равновероятностным, получим среднее значение максимальной упаковки волокон  $\vartheta_m = (\vartheta_{в.г} + \vartheta_{в.т})/2 = 0,846$ .

С точки зрения достижения максимальной прочности на растяжение однонаправленных эпоксидных стеклопластиков [7] оптимальным считается массовое содержание волокон в композиции, равное  $\eta_{в} = 0,790 \dots 0,815$ . Этой величине будет соответствовать (без учета пор) средний объемный коэффициент армирования волокон  $\vartheta_{в} = 0,652$ , который определяется из выражения  $1/\vartheta_{в} = 1 + (1/\eta_{в} - 1)\rho_{в}/\rho_{м}$ , где  $\rho_{в} = 2,58 \text{ г/см}^3$  — плотность стекловолокон,  $\rho_{м} = 1,19 \text{ г/см}^3$  — плотность эпоксидной матрицы. В дальнейшем при проведении расчетов в качестве исходного значения примем коэффициент армирования  $\vartheta_{в} = 0,65$ , для которого максимальная величина переуплотнения волокон будет равна  $\Delta\vartheta_m = \vartheta_m - \vartheta_{в} = 0,196$ .

Теперь на основе сказанного из второго равенства (5) находим

$$\frac{\vartheta_{в}}{\Delta\vartheta_m} = \frac{H_m}{d_m \cos \theta_m} = 3,32. \quad (7)$$

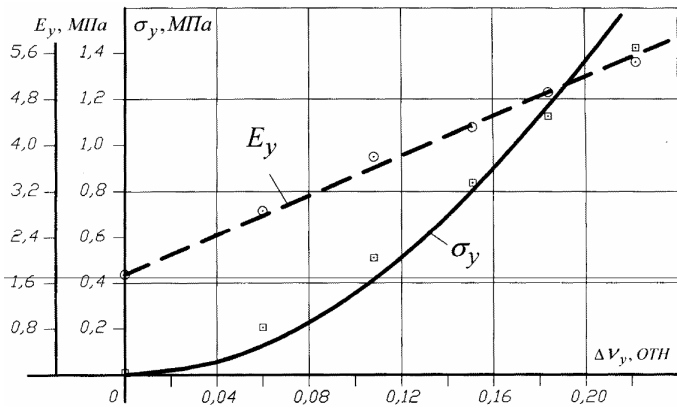
Из выражений (5) и (7), учитывая отношение  $\Delta\vartheta_{и}/H_{и} = \Delta\vartheta_m/H_m$ , определим величину переуплотнения волокон на инденторе:

$$\Delta\vartheta_{и} = \Delta\vartheta_m \sqrt{\frac{d_{и} \cos \theta_{и}}{d_m \cos \theta_m}} \quad \text{и} \quad H_{и} = \frac{\vartheta_{в} \Delta\vartheta_{и} d_m \cos \theta_m}{(\Delta\vartheta_m)^2}. \quad (8)$$

Суммарное давление  $q_x$ , действующее в слое на гибкую нить, будет складываться из напряжения сжатия  $q_{\sigma}$ , необходимого для уплотнения волокон нити в поперечном направлении, и напряжения сдвига  $q_{\tau}$ , необходимого для межслойного перемещения нити в том же направлении:

$$q_x = q_{\sigma}(x) + q_{\tau}(x). \quad (9)$$

В работе [8] показано, что деформативные свойства однонаправленного стеклопластика в состоянии переработки в трансверсальном (перпендикулярном) к слою направлении определяются прежде всего податливостью матрицы (связующего), а в продольном направлении — упругими свойствами волокон. Сжимая равномерным давлением в замкнутой пресс-форме пакет из 50 слоев пропитанной полимерным



**Рис. 5. Изменение напряжения и модуля упругости при сжатии полимерно-волокнистого материала в поперечном направлении от степени переуплотнения волокон:**

○ и □ — экспериментальные точки;  $E_y$  — модуль упругости при сжатии;  $\sigma_y$  — кривая, построенная по зависимости (10)

связующим ровницы АГ-4С, было установлено, что модуль упругости в перпендикулярном к плоскости пакета направлении при его осадке практически линейно увеличивается с ростом обжатия пакета, изменяясь от  $E_{\text{поп}} = 1,75$  МПа до  $E_{\text{поп}} = 5,45$  МПа, а напряжение сжатия пакета изменяется от нуля до  $\sigma_{\text{сж. поп}} = 1,43$  МПа нелинейно (рис. 5) и имеет близкий к квадратичной зависимости характер от степени переуплотнения пакета.

Аналогичное сжимающее напряжение испытывает и слой нитей в плоскости  $xy$  при внедрении в него стержня — индентора. Следовательно, с некоторой долей погрешности напряжение сжатия нитей в слое  $\sigma_{\text{сж. y}}$  по координате  $OY$ , в зависимости от изменения коэффициента армирования волокон на величину  $\Delta v_y$ , можем записать в виде

$$\sigma_y(\Delta v) = A_\sigma(v_y - v_b)^2 = A_\sigma(\Delta v_y)^2, \quad (10)$$

где константа  $A_\sigma = 35,5$  МПа, определяется из графика кривой  $\sigma_y$  (см. рис. 5).

В указанном эксперименте коэффициент армирования волокон  $v_b$  изменялся от значения  $v_b = v_{b.y} = 0,625$  до  $v_{y \text{ max}} = 0,847$ , а его приращение — в пределах  $0 \leq \Delta v_y \leq 0,222$ . В рассматриваемой задаче коэффициент армирования  $v_y(x)$  по ширине зоны уплотнения волокон  $H_x$  (координата  $OY$ ) изменяется от начального значения  $v_b = 0,65$  до  $v_{y \text{ max}} = 0,846$ , а его приращение в этом диапазоне увеличивается от  $\Delta v_y = 0$  до  $\Delta v_{y \text{ max}} = 0,196$ .

В соответствии с обозначениями на рис. 4 запишем

$$\Delta v_y(x) = \Delta v_{xyH} / H_x. \quad (11)$$

Согласно выражению (10) каждая нить будет испытывать поперечное сжатие, а в процессе искривления волокон и соответствующее



продольное растяжение в зависимости от изменения коэффициента армирования волокон по ширине зоны уплотнения. Распространяя выражение (10) на всю ширину зоны уплотнения  $H_x$  и учитывая равенство (11), найдем растягивающие силы, действующие в каждой из нитей слоя по координате  $y_H$ :

$$N_x(y) = A_N (\Delta\vartheta_x/H_x)^2 y^2. \quad (12)$$

При этом все нити вместе по ширине зоны уплотнения  $H_x$  (координата  $y_H$ ) будут оказывать суммарное давление на крайнюю по стрелке раскола нить. Интегрируя выражение (12) от нуля до  $y_H = H_x$  и подставляя в него значения  $\Delta\vartheta_x$  и  $H_x$  из уравнения (6), с учетом зависимостей (8), получим

$$q_\sigma(x) = \int_0^{H_x} N_x(y_H) dy_H = \frac{2\sqrt{2}}{3} A_N \frac{\vartheta_B(\vartheta_m - \vartheta_B)}{\sqrt{d_m \cos \theta_m}} (y_x)^{3/2}, \quad (13)$$

где константа  $A_N = 35,5$  МПа/мм и значения  $\vartheta_B = 0,65$  и  $\Delta\vartheta_m = 0,196$  были определены ранее.

Теперь для определения давления  $q_\tau(x)$ , возникающего при межслойном сдвиге (смещении) нитей в поперечном направлении, можем записать

$$q_\tau(x) = 2\tau_{сл}(x) = 2k_\tau [p_{сж} + q_\sigma(x)], \quad (14)$$

где  $p_{сж}$  — технологическое сжатие слоев оболочки при ее изготовлении;  $k_\tau$  — коэффициент межслойного трения, определяемый экспериментально;  $q_\sigma(x)$  — внутрислойное давление, вызванное переуплотнением волокон. Подставляя в равенство (9) выражения (13) и (14), найдем суммарное давление на крайнюю по стрелке раскола нить:

$$q_x = q_\sigma(x) + q_\tau(x) = 2k_\tau p_{сж} + \frac{2\sqrt{2}}{3} A_N (1 + 2k_\tau) \frac{\vartheta_B \Delta\vartheta_m}{\sqrt{d_m \cos \theta_m}} (y_x)^{3/2}. \quad (15)$$

Подставив значение  $q_x$  из выражения (15) в уравнение (2) и интегрируя его, определим растягивающую силу в крайней нити:

$$N_x = \frac{y_x}{\cos \theta_x} \left( 2k_\tau p_{сж} + \frac{4\sqrt{2}}{15} A_N (1 + 2k_\tau) \frac{\vartheta_B \Delta\vartheta_m}{\sqrt{d_m \cos \theta_m}} (y_x)^{3/2} \right). \quad (16)$$

В полученных зависимостях (7), (8), (15) и (16) остаются неизвестными параметры  $k_\tau$ ,  $d_m$  и  $\theta_m$ .

Для определения коэффициента трения скольжения  $k_\tau$  проводится эксперимент (рис. 6), заключающийся в вытягивании одной нити или ровинга в состоянии переработки из многослойного ортотропного пакета, сжатого давлением  $p_{сж}$ . Нить перерезают на расстоянии  $l_H \leq l_{пр}$  и к ее концу прикладывают силу  $F_H \leq F_{пр}$ . Нагруженная таким образом

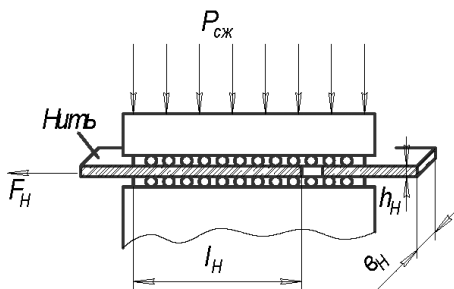


Рис. 6. К определению межслойного коэффициента трения скольжения нитей

нить сдвигается со скольжением относительно нитей, расположенных к ней перпендикулярно.

Следовательно, между вытягиваемой нитью и перпендикулярным семейством нитей (слоем) возникают касательные напряжения от сил трения скольжения:

$$\tau_n = \frac{F_H}{2b_n l_n} = k_\tau p_{сж}, \quad (17)$$

$$l_{пр} = \frac{F_{н.раз}}{2b_n k_\tau p_{сж}},$$

где  $b_n$  — ширина нити, ровинга или ленточки, набранной из нескольких нитей;  $l_{пр}$  — предельная длина нити, которая может быть вытянута из пакета без разрушения;  $F_{пр} = F_{н.раз}$  — разрушающая нагрузка (сила), которая указывается в паспорте на сухие нити или ровинги при их поставке потребителю.

При испытаниях в образце неотвержденного полимерно-волокнистого материала разрезают нить длиной меньше предельной и сдавливают весь пакет давлением  $p_{жi}$ . После чего нагружают нити силой  $F_{ни}$  до момента ее устойчивого межслойного скольжения. Результаты пяти-семи испытаний для каждого давления  $p_{жi}$  статистически обрабатываются и по формулам (17) определяют среднее значение коэффициента межслойного трения скольжения нити  $k_\tau$ .

Два оставшихся параметра находят, рассматривая предельное состояние нити по стрелке раскола, когда на максимально возможном диаметре индентора  $d_m$  происходит разрушение нити. В этом случае угол наклона  $\theta = \theta_m$ , прогиб нити  $y = y_m$  и координата  $x = x_{max} = x_m$  имеют свои максимальные значения, при этом  $y_m = 0,5d_m \cos \theta_m$ .

Для их определения запишем разрушающую деформацию  $\varepsilon_{н.раз}$  пропитанной связующим стеклонити в состоянии ее переработки через силовые факторы. Используя уравнения (1) и (4) при  $N_0 = 0$ , получим

$$\varepsilon_{н.раз} = \frac{\sigma_{н.раз}}{E_{н.раз}} = N_m \frac{h_{сл} \vartheta_B \rho_B}{E_n T_{в.н}} = F_{н.раз} \frac{\vartheta_B \rho_B}{E_n T_{в.н}}, \quad (18)$$

где  $T_{в.н} = b_n h_{сл} \vartheta_B \rho_B$  — линейная плотность сухой стеклонити (мг/м);  $\rho_B = 2,58 \text{ г/см}^3$  — плотность стекловолокон марок ВМ-1 и ВМП;  $\vartheta_B = 0,65$  — коэффициент армирования нити;  $E_n = 40 \dots 42 \text{ ГПа}$  [8] — модуль упругости при растяжении стеклонити в состоянии переработки, определяется экспериментально. Если толщина слоя волокон не оговорена, то принимают  $h_{сл} = b_n$ . Из выражения (18) находят значение разрушающей деформации нитей в состоянии переработки:

$$\varepsilon_{н.раз} = \varepsilon_p = \overline{F}_{н.раз} \rho_B \vartheta_B / E_n = 2,45 \dots 2,66 \%, \quad (19)$$

где  $\bar{F}_{н.раз} = F_{н.раз}/T_{в.н} = 0,60 \dots 0,66$  Н/текс — удельная разрывная нагрузка сухих крученых нитей марок ВМ-1 и ВМП в состоянии их поставки потребителю [9], что соответствует разрушающему напряжению элементарных волокон в сухих нитях  $\sigma_{в.раз} = \bar{F}_{н.раз}\rho_{в} = 1550 \dots \dots 1690$  МПа.

Теперь на основе уравнений (3), (4), (16) и (19) получим выражения для определения максимальных геометрических размеров стрелки раскола и диаметра индентора:

$$N_m = \frac{d_m}{2} \left( 2k_{\tau}p_{сж} + \frac{2}{15}A_N\vartheta_{в}\Delta\vartheta_m(1+2k_{\tau})d_m \cos\theta_m \right) = \varepsilon_{н.раз}E_{н}\sqrt{\frac{T_{в.н}}{\rho_{в}\vartheta_{в}}};$$

$$\frac{d_m}{2}\cos\theta_m = \int_0^{x_m} \operatorname{tg}\theta_x dx; \quad x_m(1 + \varepsilon_{н.раз}) = \int_0^{x_m} \frac{dx}{\cos\theta_x}. \quad (20)$$

Для решения системы предельных уравнений (20) значение угла  $\theta_x$  задается степенной функцией вида  $\theta_x = \alpha x^n$ , где показатель степени  $n \neq 0$  может принимать любое целое или дробное значение, но чтобы при  $x = 0$  выполнялись граничные условия:  $y_{x=0} = 0$  и  $\theta_{x=0} = 0$ .

В качестве исходных данных для стеклопрепрега в состоянии его переработки были приняты или получены экспериментально следующие числовые значения:  $E_{н} = 42$  ГПа,  $T_{в.н} = 57,6$  мг/м,  $A_N = 35,5$  МПа/мм,  $\rho_{в} = 2,58$  г/см<sup>3</sup>,  $\varepsilon_{н.раз} = 2,55\%$ ,  $p_{сж} = 0,06 \dots \dots 0,12$  МПа для верхних двух слоев,  $k_{\tau} = 0,64$ ,  $\vartheta_{в} = 0,65$ ,  $\Delta\vartheta_m = 0,196$ . Результаты числовых расчетов протяженности стрелок раскола  $2l_{и}$  по уравнениям (20) в зависимости от диаметра индентора  $d_{и}$  показаны на рис. 7. Экспериментальные значения длины стрелок раскола  $2l_{и}$  были получены на многослойных ортотропных стеклопластиковых образцах при прокалывании отверстий диаметрами 6; 7; 8; 9; 12 и 15 мм.

Предельные расчетные параметры прокола отверстий для показателей степеней  $n = 0,05; 0,5$  и  $1,0$  оказались соответственно равными:  $d_m = 16,9, 17,1$  и  $17,3$  мм;  $\theta_m = 12,8^{\circ}, 18,0^{\circ}$  и  $22,0^{\circ}$ ;  $2l_{и} = 76,2, 82,9$  и  $88,0$  мм, где  $l_{и} = x_m + (d_m/2) \sin\theta_m$  — протяженность стрелки раскола от начала координат до центра отверстия.

Наличие отверстий в композитных конструкциях с продольно-поперечной укладкой слоев влияет на статическую прочность материала и оценивается теоретическим коэффициентом концентрации напряжений, который на краю просверленного отверстия при одноосном растяжении плоской пластины вдоль направления армирования равен  $K_T = 3,44 \dots 3,64$  [2, 3], а для однонаправленного композитного материала  $K_T = 4,58$  [3].

Это означает, что уровень допустимых напряжений в композитных конструкциях должен быть в  $K_T$  раз меньше по сравнению с

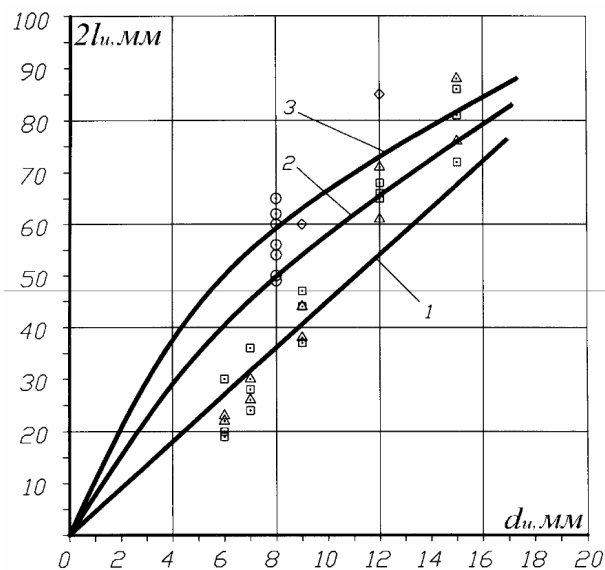


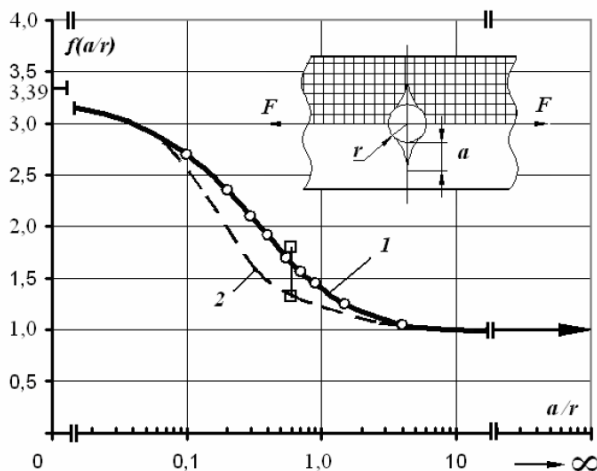
Рис. 7. Зависимость длины стрелок раскола ортотропного стеклопластика от диаметра индентора  $d_u$ ; прокол трехслойных пакетов:  $\square$  — в кольцевом направлении,  $\Delta$  — в осевом направлении;  $\circ$  — раскол верхнего слоя в процессе намотки на цилиндрическую оправку диаметром 680 мм;  $\diamond$  — раскол верхнего слоя многослойных пакетов толщиной 8 и 10 мм; расчетные кривые с показателями функции  $\theta_x = \alpha x^n$  равными:  $n = 0,05$  — кривая 1,  $n = 0,5$  — кривая 2,  $n = 1,0$  — кривая 3; знак “+” — предельные размеры стрелок раскола

пределом прочности материала при растяжении  $\sigma_{BK}$  и теоретически составлять величину, равную  $\sigma_{к.т} = \sigma_{BK}/K_T$ , которая реализуется на практике лишь для сравнительно больших диаметров просверленных отверстий ( $r_{св} \geq 25$  мм).

Для меньших радиусов отверстий уровень допустимых напряжений по результатам экспериментов получается больше теоретической величины и может быть определен из графической зависимости  $\sigma_{к.доп} = \sigma_{BK}/f(a/r)$  (рис. 8, [2]), в которой коэффициент интенсивности напряжений  $f(a/r)$  находится опытным путем при одноосном растяжении плоских пластин с углами укладки волокон  $0/90^\circ$  или  $0/\pm 45^\circ$ .

При этом коэффициент интенсивности напряжений зависит от радиуса просверленного отверстия  $r$  и величины  $a = 0,75 \dots 1,25$  мм — характерного размера области с интенсивным высвобождением энергии около отверстия (см. рис. 8). Значение  $a = 0,75$  мм целесообразно применять для  $r \leq 1,25$  мм,  $a = 1,0$  мм — для  $1,25 \leq r \leq 7,5$  мм и  $a = 1,25$  мм — для  $r > 7,5$  мм [2].

Для полимерно-волоконистых материалов с проколотыми отверстиями уровень допустимых напряжений выше, чем с просверленными отверстиями, так как исходный материал на краю отверстий будет усилен частично деформированными и искривленными нитями, сдвинутыми от центра при формовании отверстий. Для проколотых отверстий



**Рис. 8.** Зависимость коэффициента интенсивности напряжений  $f(a/r)$  от относительного размера области интенсивного высвобождения энергии ( $a/r$ ): (кривая 1) и экспериментальные точки  $\circ$  — для просверленных отверстий [2]; кривая 2 — для проколотых отверстий (22);  $\square$  — испытание кольцевых образцов

на основе принципа суперпозиции запишем величину допустимых напряжений

$$\sigma_{к.прк} = \frac{\sigma_{вк}}{f(a/r)} + (\varepsilon_p - \varepsilon_n) E_k \frac{\Delta\vartheta_n}{\vartheta_b} \cos^2 \theta_n. \quad (21)$$

Из выражения (21) находим коэффициент интенсивности напряжений для проколотых отверстий

$$K_{прк}(a/r) = \frac{\sigma_{вк}}{\sigma_{к.прк}} = \frac{f(a/r)}{1 + f(a/r)(1 - \varepsilon_n/\varepsilon_p)(\Delta\vartheta_n/\vartheta_b) \cos^2 \theta_n}. \quad (22)$$

Расчетная величина коэффициента  $K_{прк}(a/r)$  графически представлена кривой 2 на рис. 8. Если диаметр индентора  $d_n = 0$ , то  $\Delta\vartheta_n = 0$  и коэффициент  $K_{прк}(a/r) = f(a/r)$ . Если диаметр индентора равен предельной величине  $d_n = d_m$ , то  $\varepsilon_n = \varepsilon_p$  и коэффициент  $K_{прк}(a/r)$  снова равен  $f(a/r)$ .

Приращение коэффициента армирования волокон  $\Delta\vartheta_n$ , относительную деформацию нити  $\varepsilon_n$  и силу в крайних по стрелке раскола нитях  $N_n$  в районе проколотых отверстий диаметром  $d_n \leq d_m$  находят из выражений (3), (4), (8) и (16), представленных в виде

$$\Delta\vartheta_n = \Delta\vartheta_m \sqrt{\frac{d_n \cos \theta_n}{d_m \cos \theta_m}}, \quad \varepsilon_n = \frac{N_n}{E_n} \sqrt{\frac{\vartheta_b \rho_b}{T_{в.н}}}, \quad \frac{d_n \cos \theta_n}{2} = \int_0^{x_n} \operatorname{tg} \theta_x dx,$$

$$N_n = \frac{d_n}{2} \left( 2k_\tau p_{сж} + \frac{4\sqrt{2}}{15} A_N (1 + 2k_\tau) \frac{\vartheta_b \Delta\vartheta_m}{\sqrt{d_m \cos \theta_m}} (y_n)^{3/2} \right), \quad (23)$$

а остальные параметры определяют из предельных уравнений (18), (19) и (20) для угла наклона нити, заданного уравнением  $\theta_x = \alpha x^{0,5}$ .

Испытания на растяжение кольцевых образцов диаметром 150, шириной 20 и толщиной 1,2 мм, намотанных однонаправленной лентой стеклопрепрега ЛБСЭ-180, показали, что цельные образцы разрушились при  $\sigma_{\text{вк}} = 720$  МПа, образцы с двумя проколотыми отверстиями ( $d_{\text{и}} = 3$  мм) — при  $\sigma_{\text{к.прк}} = 564$  МПа, а образцы с двумя просверленными отверстиями — при  $\sigma_{\text{к.св}} = 393$  МПа. Увеличение прочности образцов с проколотыми отверстиями по сравнению с просверленными образцами составило 43,5 %. При этом коэффициент интенсивности напряжений для кольцевых образцов с просверленными отверстиями оказался равным 1,83, а его графическое значение (см. рис. 8) — равным 1,72, т.е. на 6,0 % больше.

Свойства материала кольцевых образцов в состоянии переработки были:  $\sigma_{\text{вк.н}} = 676$  МПа;  $E_{\text{к.н}} = 36$  ГПа;  $\varepsilon_{\text{р.н}} = 1,174$  %;  $\vartheta_{\text{в}} = 0,625$ ;  $T_{\text{в.н}} = 57,6$  мг/м;  $\rho_{\text{в}} = 2,58$  г/см<sup>3</sup>. При этом расчетные предельные параметры следующие:  $d_m = 10,9$  мм и  $\theta_m = 12,3^\circ$ . Значения  $\varepsilon_{\text{и}}$ ,  $\Delta\vartheta_{\text{и}}$ ,  $\theta_{\text{и}}$  и  $N_{\text{и}}$  определены на основе уравнений (23) для угла наклона нити к оси  $OX$ :  $\theta_x = \alpha x^{0,5}$ .

Расчетный коэффициент интенсивности напряжений проколотых отверстий диаметром 3 мм по уравнению (22) получился равным 1,33, а по результатам экспериментов — 1,28, т.е. на 3,8 % меньше расчетного.

В заключение отметим, что формование отверстий в свеженамотанных стеклопластиковых оболочках методом прокалывания проводилось при движении индентора в зависимости от толщины пакета со скоростью 15...25 мм/мин. Все экспериментальные данные измененной структуры исходного материала вдоль стрелок раскола получены при данных скоростях внедрения индентора.

Кроме того, для намотанных стеклопластиковых оболочек предельные значения диаметров отверстий, получаемых методом прокалывания без разрушения нитей и в зависимости от степени их натяжения при намотке, лежат в пределах 18...20 мм, что соответствует области практических размеров диаметров заклепок, винтов, болтов, которые используются при механических соединениях композитных деталей.

Таким образом, отверстия, получаемые методом прокалывания в композитных конструкциях, обеспечивают более высокий уровень допустимых напряжений при растяжении по сравнению с просверленными отверстиями и увеличивают прочность на смятие стенки отформованного отверстия крепежным элементом. Приведенная методика определения измененной структуры материала и коэффициента интенсивности напряжений в районе проколотых отверстий может быть использована при проектировании механических соединений изделий из композиционных материалов с помощью металлических крепежных элементов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробей В. В., Сироткин О. С. Соединения конструкций из композиционных материалов. – Л.: Машиностроение, ЛО, 1985. – 168 с.
2. Граймс Г. К., Грейман Л. Ф. Расчет концентраторов, кромочных эффектов и соединений // Композиционные материалы. В 8 т. / Пер. с англ. Л. Браутмана и Р. Крока. Т. 8. Ч. 2. – М.: Машиностроение, 1978. – 264 с.
3. Ван Ф о Ф ы Г. А. Концентрация напряжений около отверстий в пластинах и оболочках из армированных материалов // Композиционные материалы волокнистого строения. – Киев: Наукова думка, 1970. – 404 с.
4. Cha h g L. -W., Ya u S. -S. und Ch o u T. -W. Notched strength of woven fabric composites with molded-in holes. – Composites, 18 (3) (1987). – P. 233–241.
5. Колганов В. И., Либерт Е. П., Сахоненко В. М. Способ изготовления отверстий в изделиях из композиционных материалов // А.С. № 1599219. Оpubл. 15.10.90. Б.И. № 38.
6. Комков М. А. Определение конструктивных и технологических параметров намотки композитных баллонов торовой формы. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 24 с.
7. Тюкаев В. Н. Стекловолокниты // В кн.: Пластики конструкционного назначения (реактопласты) / Под ред. Е.Б. Тростянской. – М.: Химия, 1974. – 304 с.
8. Тарнопольский Ю. М., Розе А. В. Особенности расчета деталей из армированных пластиков. – Рига: Изд-во “Зинатне”, 1969. – 275 с.
9. Конструкционные стеклопластики / В.И. Альперин и др. – М.: Химия, 1979. – 360 с.

Статья поступила в редакцию 5.05.2006

Михаил Андреевич Комков родился в 1938 г., окончил в 1966 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Технология ракетно-космического машиностроения” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 39 научных публикаций в области конструирования и производства изделий из композиционных материалов.

M.A. Komkov (b. 1938) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1966. D. Sc. (Eng.), professor of “Technology of Rocket and Space Engineering” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 39 publications in the field of engineering and manufacturing of composite products.

Андрей Валерьевич Колганов родился в 1968 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1994 г. Конструктор ФГППО “Авангард” (г. Сафоново). Автор семи научных публикаций в области конструирования и производства изделий из композиционных материалов.

A.V. Kolganov (b. 1968) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1994. Designer of Federal State Industrial and Production Association “Avangard” (town Safonovo). Author of 7 publications in the field of engineering and manufacturing of composite products.