

УДК 539.373

## Исследования прочности отверстий, полученных методом прокола

**Федотов Д.А.\*, Скворцов К.Г.\*\***

*АО «Авангард», ул. Октябрьская, 78, Сафоново,*

*Смоленская область, 215500, Россия*

*\*e-mail: [fedotov.da.88@mail.ru](mailto:fedotov.da.88@mail.ru)*

*\*\*e-mail: [kostyan-grinders@mail.ru](mailto:kostyan-grinders@mail.ru)*

### Аннотация

Применение композиционных материалов в летательных аппаратах не обходится без исполнения в них отверстий. Для повышения прочности соединительных элементов предложено формование отверстий методом прокалывания в еще неотвержденном полимерно-волокнутом материале конструкции. Внедрение этого метода является весьма актуальным и несомненно обладает новизной. Изучение этого нового предложения было осуществлено на специальном приспособлении, которое позволяет производить прокол отверстий различных диаметров в стеклопластиковых плитах толщиной до 30 мм с использованием прокалывающих элементов для гладких отверстий и отверстий с резьбой. Были проведены испытания таких отверстий: на растяжение, на срез, а также было проведено испытание на срез резьбы, полученной в препреге методом прокола. По результатам испытаний были сделаны следующие выводы: для ткани Т-13П диаметр отверстия величиной 20 мм является предельным; напряжения среза

стеклопластиковой резьбы имеют величину равную пределу прочности на срез материала стеклопластика, следовательно прокол отверстия с резьбой позволяет достигнуть максимальной величины прочностных характеристик; увеличивая толщину плиты, можно повысить прочность резьбового соединения, установить равнопрочность резьбы на срез напряжению растяжения в болте.

**Ключевые слова:** композиционное изделие, препрег, прокол отверстия, испытание, приспособление, резьба, ткань.

### **1 Формование отверстий в композиционных материалах методом прокола**

При создании композитных изделий любого назначения возникает необходимость сборки и соединения отдельных элементов конструкции и деталей между собой. Реализация механического соединения связана со сверлением отверстий в стенке уже отвержденных композитных деталей, что приводит к перерезанию нитей и потере прочности при растяжении волокнистого материала, растрескиванию связующего и расслоению композитного материала по стенке отверстия [1 – 3].

Альтернативой просверленным отверстиям является формование их методом прокалывания [4 – 7] в еще неотвержденном полимерно-волокнистом материале конструкции. В процессе формования отверстия с помощью заостренного стержня - индентора происходит раздвигание нитей и нарушение регулярной структуры материала изделия. Силовое поле армирующих волокон не прерывается. Стенка

отверстия из-за повышенного содержания волокон уплотняется.

Впервые идея прокалывания отверстий в армированных пластиках предложена в работе Эйдельмана Л. Я. [4]. Несмотря на то, что при получении таких отверстий армирующие волокна остаются целыми, в них создаются растягивающие напряжения, которые могут, при определенных условиях, сохраниться в отвержденном материале в виде остаточных напряжений. В предельном состоянии крайние нити, соприкасающиеся со стержнем, могут разрушаться. Существуют технологические приемы снижения этих напряжений: Колганов и др. [5, 8]. Например, прокалывающий стержень должен иметь переменное сечение, нижняя часть которого имеет диаметр больше заданного. Таким образом, прокалывающий стержень под действием силы оформляет отверстие диаметром больше заданного и фиксируется в положении, когда верхняя часть стержня будет располагаться в отверстии. Образовавшийся зазор вследствие упругих деформаций заполняется полуотвержденным материалом. В результате напряжения в нитях композиционно-волокнутого материала резко уменьшаются [5].

В результате прокола нити теряют свое первоначальное прямолинейное положение, изгибаются и растягиваются. Наибольшему деформированию подвергаются нити, соприкасающиеся с поверхностью стержня. При этом образуется так называемая «стрелка раскола слоя», протяженность ее составляет несколько диаметров отверстия (рисунок 1). Осуществляют прокол отверстия на стадии, когда композиционный материал находится в неотвержденном состоянии. В процессе прокола по мере продвижения конической части стержня увеличивается

зона уплотнения материала и повышается внутрислойное давление, которое приводит к перетеканию вязкого связующего через пористую волокнистую арматуру материала. При достаточно медленном процессе прокалывания через некоторое время наступает равновесное состояние измененной структуры материала с внедренным в нее индентором.

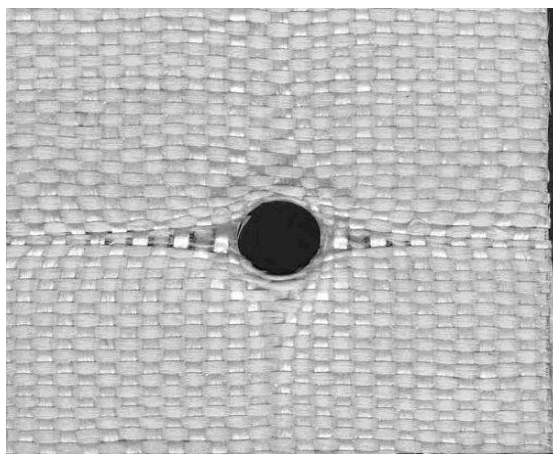


Рисунок 1 – Отверстие диаметром 20 мм, выполненное методом прокола в ткани ТР-0,7-80

Экспериментальные исследования, выполненные Л.-В. Чангом с соавторами [9] установили, что прочность на растяжение плоских образцов из тканых углепластиков и стеклопластиков с отформованными отверстиями диаметром  $3,15 \div 9,53$  мм повышается на  $2,7 \div 38,3\%$  по сравнению с просверленными образцами.

Испытания на растяжение, проведенные на многослойных тканых стеклопластиковых образцах с отверстием 8 мм показали снижение прочности на растяжение по сравнению с цельными образцами на 31,7% и 4,2% соответственно для просверленных и отформованных отверстий. Положительный результат с прокалыванием отверстий диаметром 16 мм в намотанном однонаправленном стеклопластике достигнут при внеполюсной заделке штуцера в тонкостенную

оболочку при изготовлении торовых баллонов [10].

## **2 Конечные деформации препрегов**

Технологический процесс изготовления изделий с отверстиями из композиционно-волокнистых материалов состоит из следующих стадий: формирование основных и свободных поверхностей заданной геометрии, т. е. получение полуфабрикатов в виде слоистой структуры семейств волокон (нитей) пропитанных связующим, отверждение связующего, механическая обработка поверхностей изделия до требуемых размеров. Особый интерес представляет стадия получения полуфабриката. На этой стадии можно производить некоторые дополнительные операции, позволяющие заменить механическую обработку после отверждения связующего, например, осуществлять прокол отверстия.

Препреги настолько податливы, что обладают некоторыми свойствами пластичности [11]. Это позволяет проводить с ними глубокую переработку. В результате уже сформированное изделие может приобрести новые формы с изменением размеров. Такое обстоятельство открывает перед технологами большие возможности, позволяющие в некоторых случаях упростить оснастку, уменьшить период изготовления изделия, повысить качество изделия и его прочностные свойства. При этом, если соблюдать заранее рассчитанные технологические параметры (геометрические размеры, силовые факторы, температуру среды и т.д.), то в процессе переработки в армирующем материале препрега не будут возникать

значительные напряжения, влияющие на качество изделия, и можно даже снизить величину так называемых остаточных напряжений в готовом изделии [12].

В дальнейшем будем иметь дело с многослойными препрегами, состоящими из нескольких слоев однонаправленных нитей или из слоев тканых материалов. Тканые материалы можно рассматривать как совокупность нескольких слоев однонаправленных семейств нитей. При этом такие ткани могут формироваться либо взаимным переплетением нитей (гладкие ткани), либо прошиваться полиэфирной нитью (мультиаксиальные ткани). Во всяком случае, все эти препреги характеризуются возможностью осуществлять большие перемещения нитей со скольжением.

Когда происходит изменение формы тела и взаимное расположение его частиц, то становится очевидным, что данное тело деформируется. Таким образом, деформация характеризуется изменением взаимного расположения частиц тела. В классической теории упругости перемещения считаются относительно малыми, однако, при рассмотрении деформации препрегов, перемещения могут достигать большой величины [13 – 17].

Будем предполагать, что препреги представляют собой плоские многослойные структуры, а каждый слой состоит из двух взаимно-перпендикулярных и связанных между собой семейств нитей тканого материала. Пусть в начальном или недеформированном состоянии семейства нитей препрега параллельны осям координат, причем, первое семейство нитей параллельно оси  $Ox$ , а второе – оси  $Oy$  (рисунок 2). Для препрегов необходимо знать перемещения точек каждого семейства

нитей. Возьмем точку  $(x, y)$  препрега в исходном состоянии, которая характеризует пересечение нити первого семейства с координатой  $y$  и нити второго семейства с координатой  $x$ . После деформации точки соприкосновения нитей разойдутся и будут находиться в одной плоскости, однако в разных местах. Вычисления перемещений по заданным нагрузкам необходимо проводить для нитей каждого семейства. При этом предполагается, что каждая нить семейства перемещается так, что не имеет разрывов между точками, принадлежащими этой нити [18].

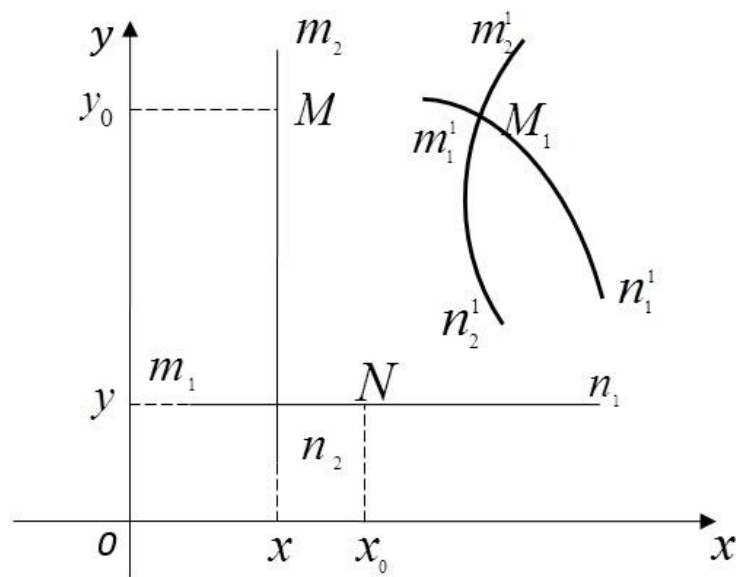


Рисунок 2 – Перемещение точек нитей препрега в условиях деформации

На рисунке 2 показано, как перемещаются точки нитей препрега в результате деформации. До деформации нить первого семейства занимает положение  $m_1n_1$ , а после деформации – положение  $m_1^1n_1^1$ . Нить второго семейства  $m_2n_2$ , после деформации занимает положение  $m_2^1n_2^1$ . Точки  $M$  и  $N$ , лежащие на нитях разных семейств до деформации, после деформации совпадают в точке  $M_1$ . Аналогичные рассуждения можно провести и для семейств нитей, расположенных под углом  $\alpha$  в исходном положении, например, для биаксиальных тканей.

Под действием внешней нагрузки могут возникать растягивающие напряжения в нитях, усилия сжатия нитей в поперечном направлении, взаимное смещение нитей одного семейства по нитям второго семейства [19 – 20]. При этом в плоскости их соприкосновения возникает сила сопротивления их относительному скольжению, т. е. сила трения скольжения. Величина этой силы, конечно, зависит от многих факторов, основными из которых являются: способ переплетения семейств нитей, вязкость связующего, а, следовательно, температура композиционного материала, давление внутри слоев пакета. Сила трения скольжения  $\tau$  между семействами нитей может принимать значения от нуля до значения  $\tau_{пр}$ , называемого предельной силой трения скольжения. Величина силы трения будет равна предельному значению  $\tau_{пр}$  лишь тогда, когда действующая на нить сдвигающая сила достигает такого значения, что при малейшем ее увеличении нити начинают двигаться (скользить). Такой способ рассмотрения напряженно-деформированного состояния препрегов предложен в работе Сахоненко С. В. [21].

### **3 Зависимость между напряжениями и деформациями при растяжении тканого материала**

Предметом исследований являются препреги, которые представляют собой многослойную композицию из тканого материала и полимерного связующего. Связующее находится в состоянии наименьшей вязкости, например, в разогретом состоянии до температуры 80°C. Для того, чтобы перейти к дальнейшим исследованиям, сделаем одно важное допущение: нити в тканых препрегах являются



абсолютно гибкими. Это означает, что они обладают следующими свойствами [22]: нити работают только на растяжение (отсутствие изгибной жесткости приводит к потере устойчивости при появлении сжимающих усилий в направлении по касательной к нити); усилие, растягивающее нить, всегда направлено по касательной к нитям.

В работе японских авторов [23] для описания зависимости между нагрузкой и деформацией у тканых материалов при двухосном растяжении использовалась зависимость, подобная обобщенному закону Гука

$$\begin{aligned}\varepsilon_{11} &= s_{11}\sigma_{11} + s_{12}\sigma_{22}, \\ \varepsilon_{22} &= s_{21}\sigma_{11} + s_{22}\sigma_{22},\end{aligned}\tag{1}$$

где  $s_{ij}$  - некоторые постоянные [23].

Однако указанные формулы применимы только при малой деформации, т. е. когда растягивающая деформация составляет не более 20% от разрывной. Упругие постоянные  $s_{ij}$  ( $i, j = 1, 2$ ) определяются с помощью двух двухосных экспериментов на образцах-полосках.

Зависимости (1) дают значительную ошибку при больших деформациях. Поэтому они неприемлемы, например, при построении теории расчета прокалываемых отверстий. Такими зависимостями могут быть

$$\begin{aligned}\varepsilon_{11} &= s_{11}\sigma_{11} + s_{12}\sigma_{22} + \gamma_{11}, \\ \varepsilon_{22} &= s_{21}\sigma_{11} + s_{22}\sigma_{22} + \gamma_{22}.\end{aligned}\tag{2}$$

Как показали ранее проведенные многочисленные испытания [24], зависимости (2) наиболее точно описывают связь между нагрузкой и деформациями

в области предельных деформаций. Экспериментально показано, что для тканей гладкого переплетения (полотняного, сатинового и саржевого плетений) коэффициенты  $s_{12}$  и  $s_{21}$  можно положить равными нулю [21, 25]. В этом случае

$$\begin{aligned}\varepsilon_{11} &= \frac{\sigma_{11}}{E_{11}} + \gamma_{11}, \\ \varepsilon_{22} &= \frac{\sigma_{22}}{E_{22}} + \gamma_{22},\end{aligned}\tag{3}$$

где  $\varepsilon_{11}$  - относительная деформация ткани при растяжении в направлении основы;  $\sigma_{11}$  - напряжения растяжения ткани в направлении основы;  $\gamma_{11}$  - коэффициент, описывающий свойство необратимости деформации при растяжении ткани в направлении основы;  $E_{11}$  - модуль упругости при растяжении ткани в направлении основы;  $\varepsilon_{22}$  - относительная деформация при растяжении в направлении утка;  $\sigma_{22}$  - напряжение растяжения в направлении утка;  $\gamma_{22}$  - коэффициент, описывающий свойство необратимости деформации при растяжении ткани в направлении утка;  $E_{22}$  - модуль упругости при растяжении в направлении утка. Необходимо также отметить, что во всех случаях нагружения препрегов компоненты деформаций  $\varepsilon_{11}$ ,  $\varepsilon_{22}$  и компоненты напряжений  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$  неотрицательны, исходя из абсолютной гибкости нитей.

При подтверждении зависимостей (3) путем испытаний полоса ткани нагружалась поперечными растягивающими нагрузками. Затем одновременно производилось нагружение этой же полосы в продольном направлении. Такие испытания проводились на семи видах тканей гладкого переплетения. Оказалось, что на всем диапазоне нагружения продольными нагрузками при постоянной

нагрузке в поперечном направлении не наблюдалось деформации в поперечном направлении. Из этого был сделан вывод, что для тканей гладкого переплетения из многоволоконных нитей справедливы зависимости (3). Однако к ним можно прийти и путем логических рассуждений. Действительно, рассматривая зависимости (2), предположим, что напряжения  $\sigma_{11}$  постоянны, а напряжения  $\sigma_{22}$  изменяются в сторону увеличения. В результате нити семейства «2» распрямляются, а нити семейства «1» из-за переплетения их с нитями семейства «2», наоборот, искривляются еще больше. Учитывая постоянство напряжений  $\sigma_{11}$ , отметим, что удлинение  $\varepsilon_{11}$  должно в таком случае уменьшаться при увеличении значений  $\sigma_{22}$ . На этом основании заключаем, что  $s_{12} \leq 0$ . По той же причине выполняется и условие  $s_{21} \leq 0$ . С другой стороны, при распрямлении нитей одного семейства в местах контакта с другим семейством возникает сдвиг (это характерно для тканей гладкого переплетения), который приводит к возникновению касательных напряжений. А увеличение амплитуды у другого семейства нитей приводит к изменению формы сечения у первого семейства, точнее, после появления касательных напряжений создаются условия, при которых происходит сжатие сечения. При этом на первой стадии имеет место неупругое сжатие, когда комплексная нить доуплотняется. Дальнейшее уплотнение является упругим и поэтому оно несущественно мало, так как усилия сжатия сечения нитей в этом случае малы и недостаточны для заметного изменения формы сечения. Другими словами, существует нижний предел распрямления нитей в ткани при их растяжении. Следовательно, когда наступает вторая стадия сжатия, нити первого

семейства перестают распрямляться и поэтому дальнейшее увеличение усилий растяжения в них не приводит к уменьшению компоненты  $\varepsilon_{11}$ . К сказанному следует добавить, что первая стадия сжатия заканчивается еще при относительно малых усилиях растяжения в нитях. Все это в совокупности приводит нас к выводу, что для тканей гладкого переплетения, выполненных из многоволоконных нитей, должно быть

$$s_{12} = s_{21} = 0$$

Таким образом, для тканей гладкого переплетения зависимости (2) могут быть представлены в виде (3).

Модель, представляемую зависимостью (3), можно описать следующим образом. Если идеальный упругий элемент может быть представлен как пружина (рисунок 3, а), то рассматриваемая модель представляется в виде двух пружин, последовательно соединенных между собой (рисунок 3, б).

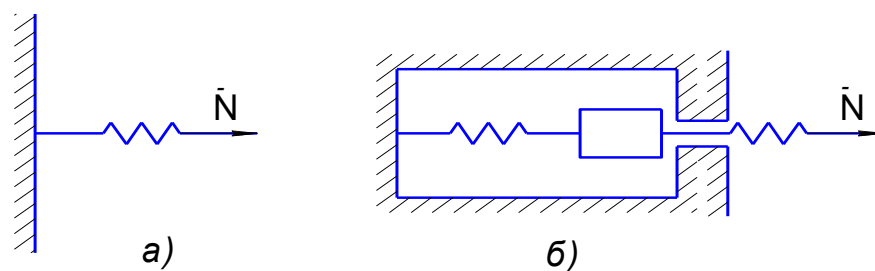
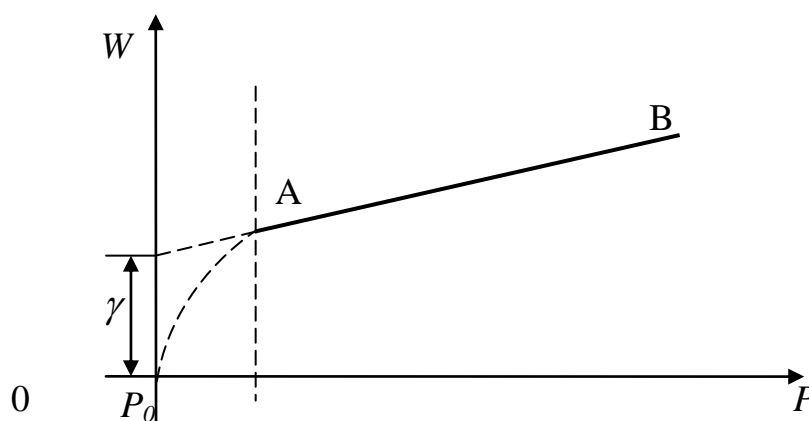


Рисунок 3 – Механические модели упругих сред

Процесс растяжения этого материала делится на две стадии. Первая стадия соответствует области изгиба и растяжения, когда искривленная нить выпрямляется и одновременно растягивается, вторая стадия – область после изгиба, когда выпрямленная нить только растягивается. Экспериментально установлено, что

после снятия внешней нагрузки при растяжении образцов имеет место существование остаточных деформаций. Практически они равны  $\gamma_{11}$  и  $\gamma_{22}$  для соответствующих семейств нитей. Эта необратимость имеет место на начальной стадии нагружения и действует до тех пор, пока практически не выпрямится изогнутая при формовании ткани нить. Наиболее точное поведение ткани при растяжении соответствует зависимости, представленной на графике (рисунок 4). При  $0 < P < P_0$  деформация ткани осуществляется, в основном, за счет распрямления нитей, а при  $P > P_0$  – только за счет упругой деформации нитей ткани.



$W$  – удлинение ткани под действием нагрузки  $P$ ;  $\gamma$  – величина равная  $\gamma_{11}$  или  $\gamma_{22}$  в зависимости от направления испытания образца ткани

Рисунок 4 – Диаграмма напряженно-деформированного состояния ткани при растяжении

В процессе переработки текстильные каркасы испытывают различные виды нагружения, основными из которых являются двухосное растяжение и сжатие [26 – 30]. Однако, ввиду абсолютной гибкости нитей сжатие в обычном смысле в направлении плоскости ткани невозможно, так как оно приводит к потере

устойчивости текстильного каркаса. Существует и другой вид сжатия. Силы, осуществляющие такое сжатие, лежат в плоскости ткани и направлены поперек нитей. В составе тканого материала такое сжатие может быть осуществлено только совместно с растяжением второго семейства нитей. Например, при перемещении одного семейства нитей вдоль второго у последнего семейства возникают растягивающие напряжения. А первое семейство нитей сжимается в перпендикулярном направлении к нитям.

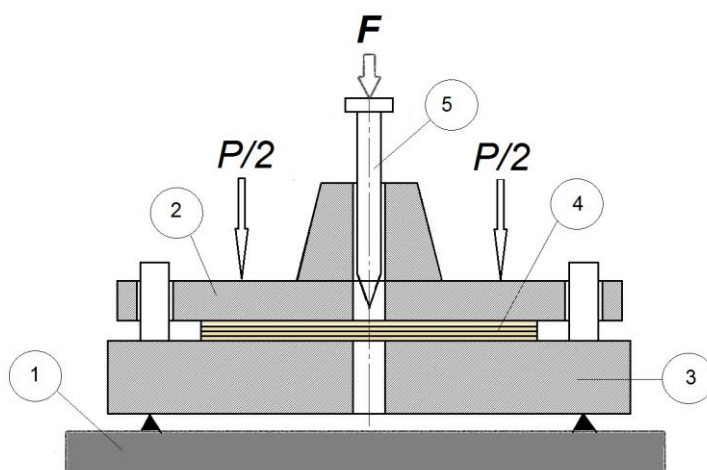
На основании проведенных исследований можно предположить, что в условиях поставленной задачи о сжатии тканого материала само сжатие осуществляется следующим образом. Происходят геометрические изменения параметров сечения нити до установления тех размеров, которые обеспечивают целостность ее формы независимо от величины приложенной внешней нагрузки. Также происходит параллельный сдвиг нитей, уменьшая расстояния между соседними нитями. В результате в районе прокалываемого отверстия образуется жесткое ядро, увеличивающееся в размере. Сжатие сечения нити происходит в две стадии. Вторая стадия сжатия семейства нитей характеризуется только упругими деформациями. Если на первой стадии деформации сжатия значительны, то во время второй стадии сжатия деформация на несколько порядков меньше. Это объясняет существование предельного значения диаметра отверстия при проколе. Силы трения в композиционном материале увеличиваются настолько, что становится невозможным дальнейшее уплотнение нитей в районе отверстия при достижении его предельного значения [31], другими словами, у каждого типа ткани

существует предельный диаметр отверстия, выше которого прокол отверстия и получения резьбы методом прокола невозможны.

#### 4 Экспериментальные исследования по определению влияния прокола отверстий на прочность конструкций из композиционных материалов

Было разработано специальное приспособление для прокола отверстий различных диаметров в стеклопластиковых плитах толщиной до 30 мм, а также прокалывающие элементы для гладких отверстий и отверстий с резьбой.

Схема устройства для проведения экспериментов по проколу неотвержденного препрега показана на рисунке 5.



1 – основание, 2 – подвижная плита, 3 – неподвижная плита, 4 – пакет препрега, 5 – индентор,  $F$  – усилие, прикладываемое на индентор,  $P$  – усилие сжатия пакета препрега.

Рисунок 5 – Схема устройства для прокола отверстия  
(устройство для прогрева препрега не показано)

#### 4.1 Испытание образцов на растяжение

Испытаниям подвергались образцы, вырезанные из изготовленных заранее пластин размером 350x350 мм. Для изготовления пластин была выбрана ткань Т-13П, пропитанная связующим ЭП-5122. Пластины изготавливались на специальном приспособлении (рисунок 6). Слои ткани укладывались чередованием утка и основы. Такой приём позволил получать характеристики материала пластин, одинаковые во всех направлениях армирования. В центре каждой пластины изготавливались отверстия методом прокола.



Рисунок 6 – Приспособление для изготовления пластин с проколотым отверстием

Были изготовлены 18 пластин с проколотыми в центре отверстиями диаметром 6; 9; 13; 16; 18 и 20 мм. По 3 пластины на каждый диаметр. Из них вырезались образцы: по 1 с проколотым отверстием, 2 образца, у которых отверстия были просверлены и по 2 образца без отверстий. Ширина образцов определялась равной 3 диаметрам отверстия. Образцы с отверстиями 20 мм были шириной 50 мм. Все



образцы подвергались растяжению до разрушения. Результаты испытаний представлены в таблице 1.

Результаты испытаний образцов на растяжение

Таблица 1

№	Сила разрушения, кН					
	ø6	ø9	ø13	ø16	ø18	ø20
1	24,5	34,1	38,3	42,1	46,1	19,4
	22,8	33,2	40,1	40,9	45,4	24,3
	21,9	35,2	37,5	44,1	43,2	27,6
2	15,9	21,4	27,2	30,2	33,1	25,9
	14,8	22,6	25,7	31,1	32,4	20,8
	10,4	20,4	23,4	27,8	30,1	19,4
3	17,1	22,0	24,2	32,4	30,9	25,3
	13,4	20,6	28,1	29,1	34,2	28,6
	11,5	18,4	20,8	28,6	31,6	21,4
4	38,8	54,2	68,9	98,4	105,3	94,5
	40,1	56,1	70,1	96,4	108,6	96,0
	36,2	55,4	67,2	95,8	105,4	92,1
5	37,4	53,2	69,3	94,4	101,3	92,8
	38,1	55,8	72,1	100,1	107,6	95,1
	41,2	54,0	67,4	94,3	108,4	98,4

В таблице 1 образцы под номером 1 – с проколотым отверстием; №2 и №3 – те, у которых отверстия были просверлены; №4 и №5 – без отверстий.

В таблице 2 представлены средние напряжения при разрушении образцов. Они рассчитывались по данным таблицы 1 в пересчёте на площадь сечения без отверстия.

### Средние напряжения при разрушении

Таблица 2

№	Напряжения при разрушении, МПа					
	ø6	ø9	ø13	ø16	ø18	ø20
1	408	379	295	263	256	129
	380	369	308	256	252	162
	365	391	288	276	240	184
2	265	238	209	189	184	173
	247	251	198	194	180	139
	173	227	180	174	167	129
	ø6	ø9	ø13	ø16	ø18	ø20
3	285	244	186	202	172	169
	223	229	216	182	190	191
	192	204	130	179	176	143
4	431	401	353	410	390	378
	446	415	359	402	402	384
	402	410	345	399	390	368

5	416	394	355	393	375	371
	423	413	370	417	398	380
	458	400	346	393	401	394

По результатам проведенных испытаний были сделаны следующие выводы:

1. Для ткани Т-13П отверстие  $\varnothing 20$  мм является предельным размером при его проколе. При этом требовалась значительная нагрузка для осуществления прокола. Происходило закусывание ткани между прокалывающим элементом и краем отверстия у втулки. Такое положение вызвано невозможностью дальнейшего сжатия нитей перпендикулярно к ним и стало невозможным дальнейшее расширение отверстия. При проколе отверстия диаметром 18 мм – подобного не наблюдалось. Следовательно, можно утверждать, что предельное значение отверстия для осуществления прокола в ткани Т-13П находится в пределах от 18 до 20 мм.
2. Для ткани Т-13П отверстия  $\varnothing 6$  мм и менее не создают концентрацию напряжений возле отверстий в материале стеклопластика.
3. Конструкции с проколотыми отверстиями примерно в полтора раза прочнее по сравнению с конструкциями, у которых отверстия просверлены.
4. С увеличением диаметра прокалываемого отверстия концентрация напряжений увеличивается.

#### **4.2 Испытание образцов на срез**

Для проведения испытаний были изготовлены 5 плит с проколотыми отверстиями. Из этих же плит были вырезаны образцы для проведения испытаний.

При этом один образец с проколотым отверстием, а два – с просверленными. В отверстия вставлялись втулки, через которые осуществлялось нагружение образца. Схема нагружения и размеры образцов показаны на рисунке 7.

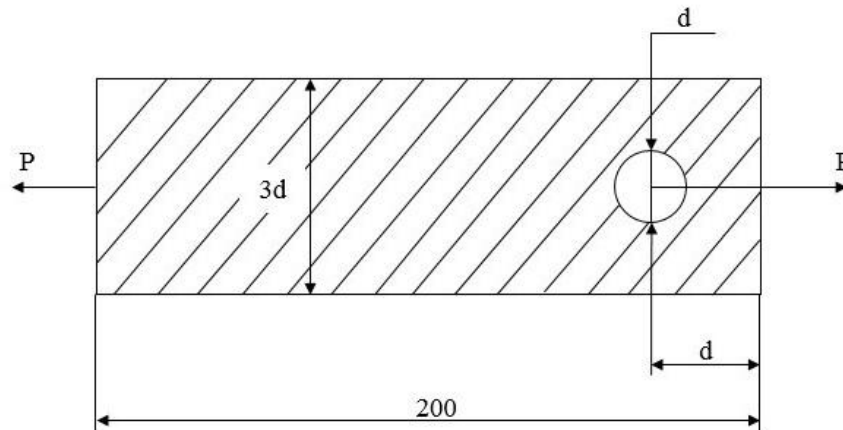


Рисунок 7 – Схема испытания образца на срез

Нагрузка  $P$  приложена с одной стороны к образцу, а с другой – к штифту. При таких испытаниях штифт срезает материал образца по двум плоскостям. Результаты испытаний приведены в таблице 3.

Результаты испытания образцов на срез

Таблица 3

№ п/п	Толщина плиты, мм	Диаметр отверстия, мм	Разрушающая сила $P$ , Н		
			Просверленное отверстие		Проколотое отверстие
			№1	№2	
1	10	13	37600	39000	62600
2	10	9	24500	24400	47600
3	10	6	17800	17200	51400
4	5	6	7100	7400	28400
5	5	20	15700	16300	31000

Анализ таблицы 3 показывает, что разрушающие напряжения на срез у образцов с проколотыми отверстиями в 2-3 раза больше, чем у образцов с просверленными. Этот результат объясняется тем, что в первом случае нити армирующего материала возле отверстия не перерезаны, а сверление перерезает их. Значительный эффект для отверстий, полученных методом прокола, позволяет рекомендовать технологию получения таких отверстий для внедрения в изделиях, которые в результате внешнего воздействия испытывают значительные сдвигающие напряжения.

#### **4.3 Испытание на срез резьбы, полученной в препреге методом прокола**

Для получения плит с отверстиями с резьбой были изготовлены прокалывающие элементы, показанные на рисунке 8, у которых на цилиндрической части нарезана резьба. Были изготовлены пять плит с различными диаметрами отверстий. Для испытаний резьбы в отверстия были вкручены болты с соответствующей резьбой.



Рисунок 8 – Прокалывающие элементы с резьбой

К болту прикладывалась вырывающая сила  $P$  до разрушения резьбы.

Результаты проведённых испытаний представлены в таблице 4.

Результаты усилий вырывания болта из отверстия с резьбой

Таблица 4

№ п/п	Толщина плиты, мм	Диаметр отверстия, мм	Усилие разрушения $P$ , Н		
			$P$ , Н	$\sigma$ , МПа	$\tau$ , МПа
1	10	5	11000	300	72
2	10	10	28400	380	82
3	10	16	32800	364	109
4	10	20	27000	90	45
5	10	20	14800	49	24

В таблице в столбце ( $\sigma$ ) представлены напряжения растяжения, которые вызывают напряжения растяжения в болте, при которых происходит разрушение стеклопластиковой резьбы. В столбце ( $\tau$ ) представлены средние напряжения среза резьбы.

По результатам испытаний были сделаны следующие выводы:

1. Диаметр отверстия величиной 20 мм для ткани Т-13П представляет собой предельный случай, поэтому результаты испытаний для такого диаметра не отражают общей закономерности.

2. Напряжения среза стеклопластиковой резьбы имеют величину равную пределу прочности на срез материала. Таким образом прокол отверстия с резьбой позволяет достигнуть максимальной величины прочностных характеристик.

3. При испытаниях болт был завинчен без клеевой прослойки. Включение клеевой прослойки очевидно поможет увеличить прочность резьбового соединения.

## 5 Заключение

Известен способ изготовления отверстий в изделиях из композиционных материалов [5, 32]. Известны также способы получения отверстий в неотвержденном композиционно-волокнистом материале [33]. В формулах этих изобретений отсутствует упоминание о возможности изготовления в стеклопластике отверстий с резьбой под крепежные элементы. Таким образом, способ изготовления отверстий с резьбой и без резьбы в изделиях из армированных пластмасс путем

прокалывания заостренным стержнем неотвержденного материала с раздвиганием арматуры отличается от существующих методов сверления и нарезания резьбы. Такое нововведение позволяет уменьшить в несколько раз концентрацию напряжений в изделиях с отверстиями и существенно повысить их прочность.

### Библиографический список

1. Башаров Е.А., Вагин А.Ю. Анализ применения композиционных материалов в конструкции планеров вертолетов // Труды МАИ. 2017. № 92. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=77071>
2. Карпов Я.С. Проектирование деталей и агрегатов из композитов. - Харьков.: Национальный аэрокосмический университет «ХАИ», 2010. - 768 с.
3. Ендогур А.И., Кравцов В.А. Идеология проектирования авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57755>
4. Эйдельман Л.Я. Игла для прокалывания отверстия. Авторское свидетельство № 78397. Бюлл. №12, 01.12.50.
5. Колганов А.В., Сахоненко В.М. Способ получения отверстий в композиционном материале. Авторское свидетельство № 1445978. Бюлл. №47, 22.08.88.
6. Комков М.А., Колганов А.В. Формование отверстий в композитных конструкциях методом прокалывания неотвержденного материала // Материалы 2-й международной научной конференции «Ракетно-космическая техника:



фундаментальные и прикладные проблемы». Москва, МГТУ, 18-21 ноября 2003, С. 9 - 13.

7. Комков М.А., Колганов А.В. Моделирование процесса формования отверстий в изделиях из неотвержденного полимерно-волокнистого материала // Вестник машиностроения МГТУ им. Баумана. 2004. № 8. С. 15 - 18.

8. Dixit A., Harlal Singh Mali. Modeling techniques for predicting the mechanical properties of woven-fabric textile composites: a Review // Mechanics of Composite Materials, 2013, vol. 49, no. 1, pp. 1 - 20.

9. Chahg L.W. Yau S.S, Chou T.W. Notched strength of woven fabric composites with molded-in holes // Composites, 1987, no. 18 (3), pp. 233 - 241.

10. Комков М.А. Определение конструктивных и технологических параметров намотки композитных баллонов торовой формы. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. - 24 с.

11. Кербер М.Л. и др. Полимерные конструкционные материалы: структура, свойства, технология. - СПб.: Профессия, 2008. - 560 с.

12. Huang Y., Jin K.K., Ha S.K. Effects of fiber arrangement on mechanical behavior of unidirectional composites // Journal of composite materials, 2008, no. 42, pp. 1851 - 1871.

13. Миткевич А.Б. и др. Модель деформирования конструкционных тканей // Вопросы оборонной техники. Серия 15. 2010. № 1 (156) - 2 (157). С. 3 - 10.

14. Василевич Ю.В. и др. Расчет потенциальной энергии деформации препрегов // Актуальные вопросы машиностроения. 2015. № 4. С. 317 – 320.

15. Kulikov G.M., Plotnikova S.V. A method of solving three-dimensional problems of elasticity for laminated composite plates // *Mechanics of Composite Materials*, 2012, vol. 48, no. 1, pp. 23 - 36.
16. Xue P., Cao J., Chen J. Integrated micro/macro-mechanical model of woven fabric composites under large deformation // *Composite Structures*, 2005, vol. 70, no. 1, pp. 69 - 80.
17. Zhu B. Yu T.X., Tao X.M. Large deformation and slippage mechanism of plain woven composites in bias extension // *Composites: Part A*, 2007, vol. 38, pp. 1821 – 1828.
18. Василевич Ю.В., Сахоненко В.М., Сахоненко С.В., Горелый К.А., Малютин Е.В. Определение характеристик препрегов при сжатии // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2012. № 2 (19). С. 53 – 57.
19. Launay J., Hivet G., Duong A., Boisse P. Experimental analysis of the influence of tensions on in plane shear behaviour of woven composite reinforcements // *Composite Science and Technology*, 2008, vol. 68, no. 2, pp. 506 – 515.
20. Harrison P. Clifford M.J., Long A.C. Shear characterization of woven textile composites // *10th European Conference on Composite Materials*, 3-7th June, Brugge, 2002, p. 280.
21. Сахоненко С.В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния препрегов для нахождения максимальных напряжений вблизи проколотого круглого отверстия. Дисс. канд. физ.- мат. наук. - Минск, 2009. - 154 с.

22. Василевич Ю.В. и др. Зависимость между поперечными деформациями нитей и усилиями сжатия тканых материалов препрегов // Теоретическая и прикладная механика. 2012. С. 97 - 102.
23. Whintey J.M. Stress analysis of thick laminated composite and sandwich plates // Journal of Composite Materials, 1972, no. 6, pp. 426 - 440.
24. Колганов В.И. и др. Теоретические и экспериментальные исследования композиционных систем на стадии формования изделий // Материалы межотраслевой научно-практической конференции «Проблемы создания новых материалов для авиакосмической отрасли в XXI веке», Москва, 25-26 июня, 2002, ЦИАМ, С. 55 - 60.
25. Колганов В.И. и др. Особенности построения методики эксперимента для нахождения коэффициентов внутреннего трения препрегов // Материалы XVI Российской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика», Санкт-Петербург, 9-12 сентября 2002, С. 19 - 22.
26. Василевич Ю.В. и др. Определение характеристик препрегов при сжатии // Механика машин, механизмов и материалов. 2012. №2 (19). С. 53 - 57.
27. Adams D.F. Open Hole Compression Testing // High Performance Composites, March 2005, pp. 12 - 13.
28. Babushkin A.V. et al. Research of the effectiveness of mechanical testing methods with analysis of features of destructions and temperature effects // Frattura ed Integrita Strutturale, 2013, vol. 24, pp. 89 - 95.

29. Cao J. et al. Characterization of mechanical behavior of woven fabrics: Experimental methods and Benchmark results // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008, vol. 39, no. 6, pp. 1037 - 1053.
30. Lomov S.V. et al. Experimental methodology of study of damage initiation and development in textile composites in uniaxial tensile test // Composites Science and Technology, 2008, vol. 68, no. 12, pp. 2340 - 2349.
31. Колганов В.И. и др. Моделирование процессов растяжения и сжатия в материале препрегов при выполнении отверстий // Вопросы оборонной техники. Серия 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. 2004. № 1 (134)-2 (135). С. 31 - 37.
32. Сахоненко С.В. Процессы растяжения и сжатия в материале препрегов при проколе отверстий // Депонированная рукопись № Д200516, 10.03.2005. – Минск: Белорусский государственный университет, 2004. – 25 с.
33. Patent № 57-137114, Japan; cl. In 29 D 3/02, 1981.