

# Оценка влияния пористости на механические характеристики толстостенных углепластиковых деталей, получаемых методом вакуумной инфузии

## Assessment of the influence of porosity on the mechanical characteristics of thick-walled carbon fiber parts produced by vacuum infusion

*В.В. СОКОЛОВ, А.М. ГУЛЯЕВ, С.И. ВОЙНОВ,  
П.Ю. АНТИПОВ, О.А. ГОЛИШЕВ, С.В. ДОЛИНСКИЙ*

*V.V. SOKOLOV, A.M. GULYAEV, S.I. VOINOV, P.YU. ANTIPOV, O.A. GOLISHEV, S.V. DOLINSKY*

АО «Кронштадт», Москва, Россия  
Kronshtadt JSC, Moscow, Russia  
skit988@mail.ru

В работе исследовано влияние макропор на механические характеристики при сжатии толстостенных углепластиковых деталей, получаемых методом вакуумной инфузии. Определен механизм разрушения толстостенного углепластика с содержанием пор более 1% при сжатии.

*Ключевые слова:* толстостенный углепластик, пористость, ультразвуковой контроль

In this paper, the effect of macropores on the mechanical characteristics during compression of thick-walled carbon fiber parts obtained by vacuum infusion has been studied. The mechanism of destruction of thick-walled carbon fiber reinforced plastic with a pore content of more than 1% under compression has been determined.

*Keywords:* carbon fiber composite, voids, ultrasonic testing

DOI: 10.35164/0554-2901-2023-11-12-54-56

В настоящее время толстостенные конструкции из полимерных композиционных материалов (ПКМ), получаемые методом вакуумной инфузии, широко используются в самолетостроении. Типичным примером толстостенной углепластиковой конструкции является лонжерон – основной элемент продольного силового набора крыла самолета. Углепластиковые лонжероны активно используются в конструкциях современных пассажирских самолетов, а также беспилотных летательных аппаратов различных классов.

Одним из наиболее динамично развивающихся методов производства ПКМ является вакуумная инфузия. Суть метода заключается в следующем: в оснастку укладывается заданное количество слоев армирующего материала, затем на преформу устанавливается вакуумный пакет, внутри которого создается разрежение. В процессе вакуумной инфузии жидкое связующее распространяется в преформе по крупным каналам, образованным пересечением основных и уточных нитей, за счет наличия градиента давления в соответствии с законом Дарси. Также связующее за счет капиллярных сил заполняет микропустоты между филаментами нитей.

Изготовление толстостенных углепластиковых конструкций методом вакуумной инфузии сопряжено с необходимостью решения сложной технологической задачи по обеспечению условий пропитки преформы связующим, способствующих получению детали, не содержащей пор.

При вакуумной инфузии в готовом изделии могут образовываться поры двух типов: микропоры и макропоры. Ключевым фактором, определяющим структуру пор, является скорость пропитки. При низкой скорости пропитки преформы за счет действия капиллярных сил связующее из полостей между нитями отводится в межфиламентное пространство, в результате чего в местах переплетения нитей образуются макропоры. Быстрое течение связующего внутри каналов, образованных пересечением основных и уточных нитей, приводит к формированию микропор в межфиламентном пространстве, где скорость движения связующего за счет капиллярных сил ниже [1–4].

Во многих исследованиях [5, 6] отмечается негативное влияние пористости на прочностные свойства ПКМ. В связи с чем

технология изготовления композитных деталей должна обеспечивать формирование монолитной, не содержащей пор структуры. В случае появления пор необходимо иметь данные по их влиянию на прочностные характеристики конструкции, что позволит принять решение о ее годности.

Вместе с этим следует учитывать, что повышенная пористость оказывает влияние не только на механические характеристики композита, но и на его эксплуатационные свойства. В тонкостенной конструкции, формируемой методом вакуумной инфузии, поры случайным образом могут соединиться в сквозные каналы (рис. 1) и нарушить ее герметичность. Эту особенность ПКМ следует учитывать при производстве деталей авиационного назначения, формирующих топливный бак. Следует отметить, что для толстостенных конструкций вероятность формирования сквозного канала ничтожно мала.

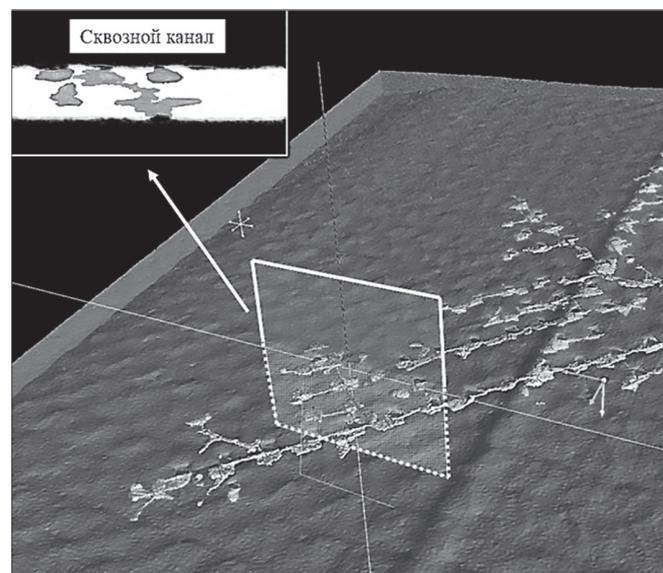


Рис. 1. Результаты компьютерной томографии фрагмента углепластиковой детали толщиной 1,5 мм.

Целью работы является оценка влияния пористости на механические характеристики при сжатии толстостенных углепластиковых деталей, получаемых методом вакуумной инфузии.

*Экспериментальная часть*

В качестве объекта исследований в работе использовали углепластиковую пластину толщиной ~ 13 мм, сформованную методом вакуумной инфузии на основе ткани 21701, однонаправленной ленты 10524, а также эпоксидного связующего Т26, произведенных ООО «Итекма».

Определение прочности при сжатии образцов углепластика выполняли в соответствии с ГОСТ Р 56812-2015 на испытательной машине Tinius Olsen серии ST.

Для качественной и количественной оценки пористости материала в работе использовались следующие методы:

- оптическая микроскопия;
- ультразвуковой контроль (УЗК);
- рентгеновская компьютерная томография (РКТ).

Микрофотографии срезов углепластика были получены при помощи инвертированного металлографического микроскопа Olympus GX53.

Ультразвуковые исследования образцов проводились с помощью дефектоскопа Olympus OmniScan SX и ультразвуковых пьезоэлектрических преобразователей с технологией фазированных решеток 5L64 A12 и 2.25L64 A12 при частотах 5 и 2,25 МГц соответственно. За основной критерий наличия пористости в материале при использовании ультразвукового метода, при прочих равных, была выбрана амплитуда донного сигнала. Эффективная отражающая поверхность пор слишком мала, чтобы выявлять их в виде отдельных сигналов в толщине материала, однако концентрация таких пор вызывает эффект рассеивания и затухания ультразвуковой волны. Исследования методом рентгеновской компьютерной томографии проводились на томографе General Electric v|tome|x m300 с микрофокусной трубкой.

Метод УЗК обладает высокой производительностью при проведении контроля и позволяет определить расположение и форму пористого участка с погрешностью не более 3 мм. Метод РКТ позволяет зафиксировать фактическое расположение пор по толщине материала и проводить количественную оценку содержания пор.

*Результаты и их обсуждение*

Первостепенной задачей, которая была решена в ходе данного исследования, являлось получение пластины из углепластика с повышенной пористостью.

Учитывая, что скорость пропитки преформы является одним из факторов, определяющих объемное содержание пор в материале, а также их тип, было принято решение посредством варьирования данного параметра обеспечить формирование пористой структуры углепластика. Скоростью пропитки можно управлять при помощи использования различных схем установки вспомогательных материалов. В частности, увеличив расстояние между распределительной сеткой и приемной магистралью, можно снизить скорость распространения связующего по преформе. В соответствии с этим пористость в углепластиковой пластине была обеспечена посредством применения схемы установки вспомогательных материалов (в частности, распределительной сетки), не обеспечивающей качественную пропитку преформы. То есть система пор, сформировавшаяся в изготовленной пластине, являлась следствием технологических отклонений, а, следовательно, полностью имитировала поры, появляющиеся в композитных деталях при их изготовлении вакуумной инфузией.

Первичное исследование полученной пластины ультразвуковым методом показало наличие в ней зон с повышенной пористостью. В связи с тем, что, помимо пор, на амплитуду донного сигнала оказывает влияние множество других факторов, ультразвуковой контроль не может быть использован для количественной оценки пористости. С целью определения объемного содержания пор в пластине была выполнена ее компьютерная томография. Результаты РКТ показали, что содержание пор в углепластике находится в пределах от 0,5 до 4,0%. Сравнение результатов РКТ и УЗК обнаружило их высокую сходимость и достоверность с точки зрения выявления зон с повышенной пористостью (рис. 2).

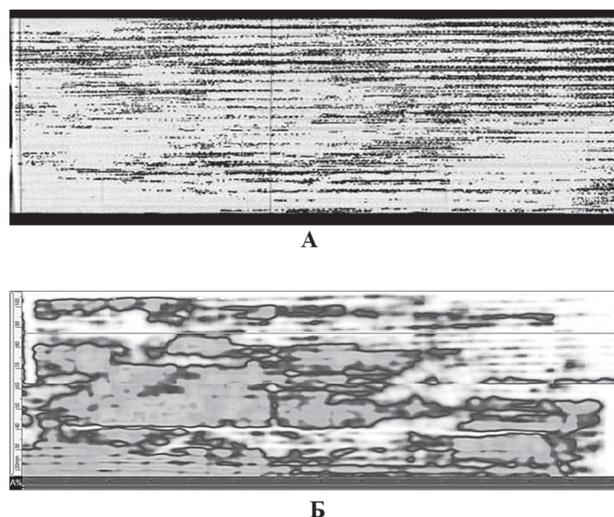


Рис. 2. Сравнение результатов РКТ (А) и УЗК (Б).

Для определения типа пор, сформировавшихся в углепластиковой пластине, был проведен анализ ее микроструктуры, результаты которого приведены на рис. 3.

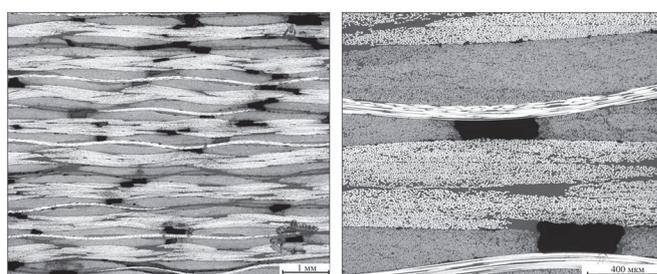


Рис. 3. Микрофотографии изготовленного толстостенного углепластика.

Из рис. 3 видно, что в композите присутствуют макропоры с габаритами до ~ 600 мкм, расположенные в межслойном пространстве и в местах переплетения нитей. Наличие макропор является свидетельством низкой скорости пропитки преформы.

На основании результатов РКТ из изготовленной пластины были вырезаны образцы с различным объемным содержанием пор (от 0,5 до 3,5%) для определения их прочности при сжатии. Объемное содержание пор в каждом образце находилось в пределах ± 0,2%.

На рис. 4 приведена зависимость прочности толстостенного углепластика при сжатии от объемного содержания пор в образце.

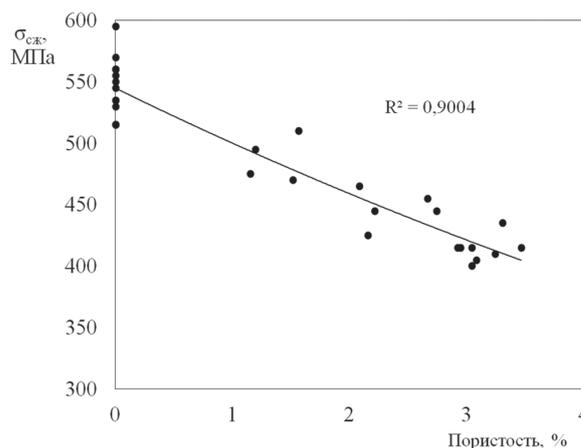


Рис. 4. Зависимость прочности толстостенного углепластика при сжатии от объемного содержания пор в образце.

Из рисунка видно, что с увеличением пористости от 0 до 3,5% прочность углепластика монотонно снижается на 27%. Точки, полученные при испытании образцов, концентрируются вблизи расчетной прямой, о чем свидетельствует высокий коэффициент корреляции – 0,9. Вместе с тем по мере увеличения пористости происходит изменение механизма разрушения углепластика. При содержании пор до 0,1% разрушение образцов было инициировано межслойным растрескиванием связующего [7], что видно на фотографии испытанного образца (рис. 5). Механизм разрушения ПКМ, объем пор в котором превышает 1%, при сжатии приведен на

рис. 6. При сжатии углепластика филаменты, граничащие с порой, отслаиваются от связующего и изгибаются в сторону данной поры, после чего происходит их разрушение. Вслед за этим изгибаются и разрушаются соседние филаменты. Начинается рост полосы сдвига (так называемого кинка) с изломом филаментов (рис. 7). Угол между осью волокон и плоскостью полосы сдвига примерно равен  $45^\circ$ . В результате углепластик полностью разрушается.

В результате данной работы установлено влияние макропор, образующихся в структуре толстостенного ПКМ на основе углеродных волокон, на его прочностные характеристики. Выявленные закономерности следует учитывать при оценке снижения прочности углепластиковых деталей в случае образования пор в их структуре из-за нарушения технологического процесса пропитки преформы.



Рис. 5. Фотография разрушенного образца углепластика с объемным содержанием пор  $\sim 0,1\%$ .

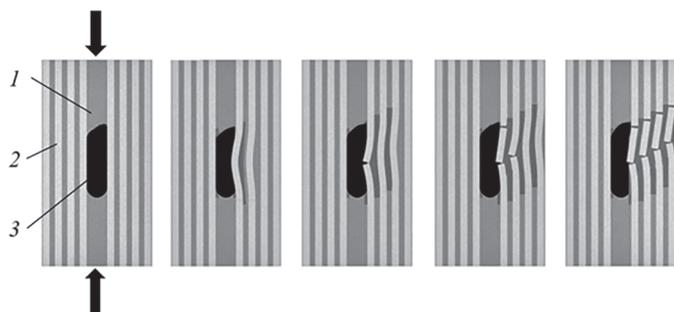


Рис. 6. Механизм разрушения пористого углепластика при сжатии, где 1 – связующее; 2 – филамент; 3 – пора.

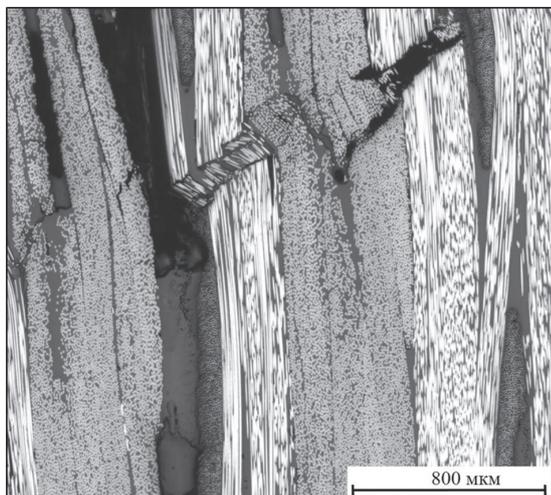


Рис. 7. Микрофотография разрушенного образца углепластика с объемным содержанием пор  $\sim 3\%$ .

### Заключение

1. Установлены закономерности, связывающие содержание макропор в толстостенном углепластике и его прочность. Показано, что с увеличением пористости от 0 до 3,5% прочность углепластика при сжатии монотонно снижается на 27%. Разрушение углепластика с объемным содержанием пор более 1% протекает по следующему механизму: при сжатии композита филаменты, граничащие с порой, отслаиваются от связующего и изгибаются в сторону данной поры, после чего происходит их разрушение. Вслед за этим изгибаются и разрушаются соседние филаменты, начинается рост полосы сдвига. В результате углепластик полностью разрушается.

2. Сравнительный анализ результатов ультразвукового контроля и рентгеновской компьютерной томографии показал их высокую сходимость и достоверность с точки зрения выявления зон с повышенной пористостью в углепластиковых деталях.

### Литература

1. M. Mehdikhani, L. Gorbatikh, I. Verpoest, S. Lomov. Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance // *Journal of Composite Materials*. – 2019. – Vol. 53(12). – P. 1579–1669.
2. J. Sébastien Leclerc, E. Ruiz. Porosity reduction using optimized flow velocity in Resin Transfer Molding // *Composites: Part A*. – 2008. – №39. – P. 1859–1868.
3. М.И. Душин, К.И. Донецкий, Р.Ю. Караваев, И.А. Коротков. Некоторые особенности жидкостного формования полимерных композиционных материалов (обзор) // *Труды ВИАМ*. – 2017. – №2 (50). – С. 54–64.
4. S.M. Sisodia, S.C. Garcea, A.R. George, D.T. Fullwood, S.M. Spearing, E.K. Gamstedt. High-resolution computed tomography in resin infused woven carbon fibre composites with voids // *Composites Science and Technology*. – 2016. – №131. – P. 12–21.
5. Xueshu L., F. Chen. Review of Void Formation and its Effects on the Mechanical Performance of Carbon Fiber Reinforced Plastic // *ENGINEERING TRANSACTIONS*. – 2016. – 64(1). – P. 33–51.
6. А.С. Бойчук, В.Ю. Чертищев, И.А. Диков, А.С. Генералов. Оценка возможности определения пористости в углепластике ультразвуковым теньевым методом // *Труды ВИАМ*. – 2017. – №7 (55). – С. 102–109.
7. J.A. D'haen, M. May, C. Boegle, S. Hiermaier. Damage Evolution Analysis on Compression-Loaded Multidirectional Carbon Fiber Laminates Using Ex-Situ CT Scans // *J. Compos. Sci.* – 2022. – №6, 63. – P. 1–7.