

## Проблемы применения композиционных материалов при разработке ферменных конструкций двигательных установок

© М.И. Токарева, М.И. Ширяев

АО «Уральский научно-исследовательский институт композиционных материалов», Пермь, 614014, Россия

*Рассмотрены этапы проектирования, изготовления, сборки и испытаний силовой ферменной конструкции жидкостного ракетного двигателя из полимерных композиционных материалов. Предполагается, что силовая рама из углепластика аналогична металлической, а именно будет иметь то же расположение осей и мест крепления составляющих частей двигателя. В связи с этим исследованы пути преодоления ряда сложностей, возникающих при проектировании и изготовлении композитной силовой рамы. Выявлены преимущества и недостатки применения полимерных композиционных материалов при создании ферменных конструкций двигательных установок. В результате замены металлической силовой рамы углепластиковой в ферменной конструкции становится возможным снижение массы такой конструкции приблизительно в 2 раза, а массы двигателя — приблизительно на 20 кг.*

**Ключевые слова:** ферменные конструкции, проектирование ракетно-космической техники, рама жидкостного ракетного двигателя, углепластиковые конструкции

**Введение.** Одной из важнейших задач в области проектирования ракетно-космической техники является снижение массы конструкции при улучшении ее жесткостных, прочностных, механических и других характеристик. Силовая рама жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) — одна из таких частей двигателя, за счет которой можно значительно снизить его массу. Она представляет собой ферменную конструкцию, состоящую из труб, соединенных с помощью фитингов. Рама двигателя предназначена для закрепления на ней составляющих частей ЖРД (агрегатов подачи окислителя и топлива, агрегатов автоматики и регулирования, донной защиты камер, трубопроводов, рулевых машин и др.) и передачи силы тяги от двигателя к силовому шпангоуту ракетно-носителя. Традиционно такие конструкции в жидкостных ракетных двигателях изготавливают из металлов. В целях обеспечения снижения массы конструкции было принято решение изготовить ферменную конструкцию из углепластика на основе углеродной ленты ЛуП-0,1 и связующего ЭНФБ. Углеродные волокна легкие, они обеспечивают наибольшую жесткость и прочность. Полимерная матрица связывает волокна вместе, перераспределяет таким образом нагрузки армированных волокон и обеспечивает защиту волокон от воздействия внешней среды [1].

В настоящее время именно углеродные композиты получают все большее применение в различных пространственных конструкциях [2, 3]. Необходимо отметить, что углеродные композиты уже давно широко используются при проектировании изделий авиационной и ракетно-космической техники не только в России, но и за рубежом [4, 5]. Преимущество их применения заключается в том, что при малой плотности их характеристики не уступают металлическим сплавам, а по некоторым даже превосходят [6, 7]. Свойства углепластиков, как и всех полимерных композиционных материалов, можно регулировать уже на стадии проектирования конструкции, так как сами материалы образуются в процессе изготовления конструкций. Кроме того, углепластик способен обеспечить необходимую жесткость, прочность, а также устойчивость к воздействию факторов космического пространства, без чего невозможна работоспособность космических конструкций [8–10].

В то же время существует ряд проблем, связанных с проектированием и изготовлением ферменных конструкций из данного материала. Цель данной работы — выявление проблем, связанных с проектированием и производством ферменных конструкций из углепластика.

**Проектирование и испытания рамы.** Решение спроектировать ферменную конструкцию именно из углепластика обусловлено тем, что ранее аналогичное решение было применено к изготовлению рамы демонстратора, которая успешно прошла статические и вибрационные испытания.

Проектирование и испытание рамы ЖРД из углепластика для подтверждения возможности применения ее в конструкции реального двигателя планировалось провести в три этапа. Первый этап — проектирование, изготовление и испытание самого нагруженного элемента рамы — трапеции. Второй этап — проектирование, изготовление и испытание фрагмента рамы, составляющего ее четверть. Третий этап — проектирование, изготовление и испытание полноразмерной рамы [11].

*Первый этап.* На первом этапе была спроектирована и изготовлена самая нагруженная часть рамы — трапеция. На данном этапе проблем не возникло в силу того, что трапеция — простая конструкция, состоящая из труб, соединенных с помощью фитингов. Все три трубы трапеции лежат в одной плоскости. При проведении испытаний были максимально точно смоделированы условия, приближенные к эксплуатационным. На рис. 1 показана трапеция, установленная в приспособление для испытаний.

Необходимо отметить, что при испытаниях трапеция выдержала нагрузку 52 620 Н, в то время как полноразмерная рама должна выдерживать нагрузку в 300 кН. Этот результат еще раз подтвердил правильность выбора материала для проектирования ферменной конструкции ЖРД.

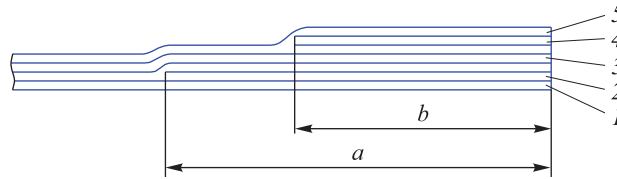


Рис. 1. Трапеция, установленная в приспособление для испытаний

*Второй этап.* На втором этапе была спроектирована и изготовлена четверть ферменной конструкции. Первые проблемы возникли уже на стадии проектирования. Они были связаны с трудностями в проведении прочностных расчетов конструкции, а также с компоновкой углепластиковых фитингов. Следует отметить, что практически все проблемы, связанные с проектированием и изготовлением рамы из композиционных материалов, вызваны разнонаправленностью осей рамы в пространстве. Не имея возможности получить достоверные расчеты фитинговых соединений, причиной чего являлась не только разнонаправленность осей рамы, но и анизотропность углепластика, было принято решение изготавливать детали заведомо толще. Толщина стенки трубы металлической рамы 1 мм, толщина стенки углепластиковой трубы 1,5 мм. Толщина металлических соединительных элементов (ребра, к которым крепятся трубы) 3 мм, углепластиковых 5 мм.

При изготовлении деталей сложной формы было необходимо выбрать оптимальную схему армирования, так как именно схема армирования оказывает большое влияние на прочность композитов при заданных условиях нагружения, а также метод изготовления материала, так как от него зависит качество полученного материала. Детали рамы были изготовлены двумя методами: метод намотки применялся для изготовления труб [12], а метод термовакуумного формования для изготовления накладок.

Намотка труб осуществлялась по схеме, представленной на рис. 2.



**Рис. 2.** Схема намотки труб:  
1–5 — слои намотки

Данная схема намотки предполагает наматывание первых слоев по длине всей оправки (обозначены на рисунке цифрой 1). Далее на расстоянии  $a$  от торцов оправки наматываются дополнительные слои (обозначены цифрой 2), обеспечивающие усиление элемента конструкции. Затем снова наматываются слои по длине всей трубы, а на расстоянии  $b$  от торцов оправки — дополнительные слои. В заключение снова наматываются слои по длине всей трубы. Такая схема намотки обеспечивает прочность трубы в местах ее соединения с накладками. Это необходимо в силу того, что при проведении испытаний нагрузка, поступающая на накладки, передается на трубы.

Следующим шагом данного этапа были физико-механические испытания образцов труб и соединений рамы. Для проведения испытаний были изготовлены образцы соединений, помещенные в заливочную композицию таким образом, как предполагалось их закрепление во фрагменте рамы. Один из образцов соединения представлен на рис. 3, а, а образец трубы — на рис. 3, б. Образцы труб были изготовлены длиной 170 мм и диаметром 30 мм, а также длиной 134 мм и диаметром 24 мм. Образцы труб испытывались на чистое сжатие, в то время как для образцов соединений определялась их несущая способность. Испытания образцов подтвердили целесообразность использования данных труб и соединений в конструкции фрагмента рамы.

Рассмотрим далее сборку фрагмента рамы. Для сборки фрагмента рамы использовалось три стапеля. Четверть рамы условно была поделена на треугольники, которые собирались на отдельных стапелях без клея, а затем — с помощью комбинированного клеємеханического соединения. Комбинированное клеємеханическое соединение состоит из клеевого слоя, расположенного по всей поверхности склейки, и точечных металлических соединений, в данном случае использованы винты. Винты делают клеевое соединение более прочным [13]. Также это соединение можно назвать клеємеханическим в силу того, что труба соединяется с накладкой не только с помощью клея, но и с использованием «зацепа», образующегося во время укладки утолщенной части трубы в накладку, как показано на рис. 4.

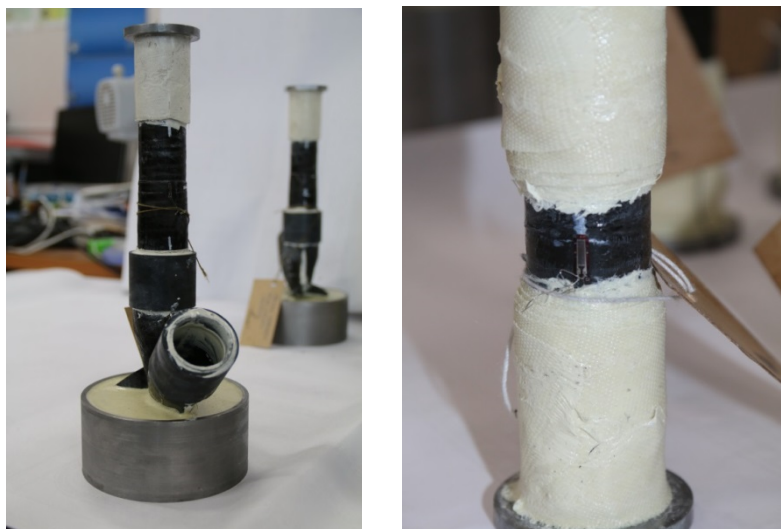


Рис. 3. Образец соединения (а) и образец трубы (б) для физико-механических испытаний

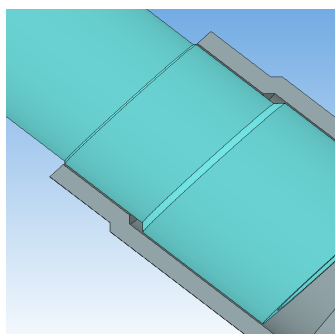


Рис. 4. Труба, вложенная в накладку



Рис. 5. Фрагмент рамы на стапеле для сборки

Последующая сборка фрагмента происходила на общем стапеле (рис. 5), где треугольники соединялись между собой, а также с остальными деталями фрагмента.

Следующим шагом второго этапа было испытание фрагмента рамы. Для этого из углепластика было спроектировано приспособление, моделирующее положение рамы в конструкции реального двигателя. Приспособление представляло собой опору, в которую устанавливался и жестко закреплялся фрагмент, сверху устанавливались траверсы для передачи вертикального нагружения, а сбоку — гидравлический цилиндр для передачи боковой нагрузки.

*Третий этап.* На третьем этапе планируется изготовление и испытание полноразмерной рамы ЖРД. После проведения испытаний фрагмента рамы, составляющего ее четверть, было принято решение изменить конфигурацию накладок, сделать их проще и надежнее. С одной стороны, ферменная конструкция больше не будет полностью пластиковой, как предполагалось изначально, с другой — снижение массы ожидается такое же, как и планировалось при использовании только композитных деталей. Изменения в основном коснулись деталей так называемого нижнего пояса. Если раньше соединения нижнего пояса представляли собой два фитинга, которые с одной стороны зажимали трубу, а с другой — охватывали опору (рис. 6), то теперь между этими накладками заложена металлическая пластина, привариваемая к опоре, также для увеличения надежности конструкции к этой пластине приваривается металлический упор (рис. 7). В таком соединении силовая труба упирается в металлический элемент, упор, который в процессе работы рамы исключает возникновение сдвиговых напряжений в клеевом соединении между трубой и накладками. Две накладки охватывают утолщение на углепластиковой трубе и металлическую пластину. Все это соединяется винтами и клеем. В результате образуется прочная жесткая клеомеханическая конструкция.

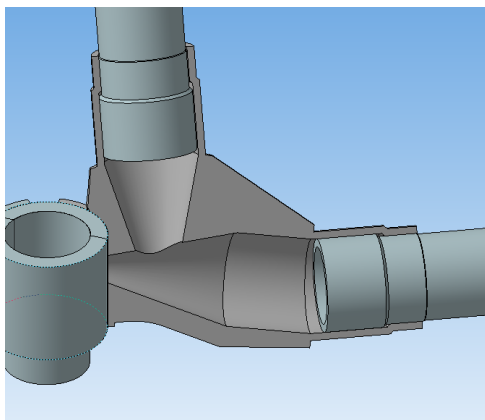


Рис. 6. Соединение трубы и фитинга

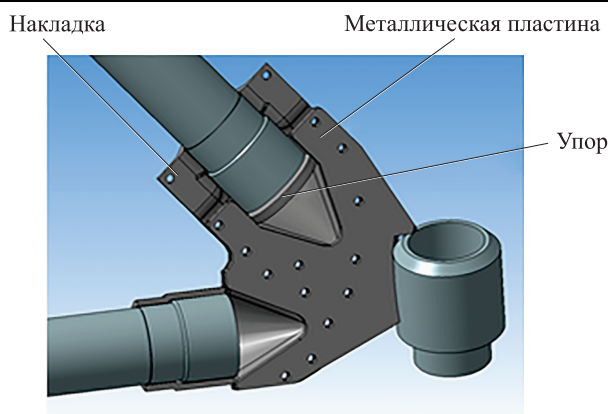


Рис. 7. Соединение трубы и фитинга с использованием металлической пластины и металлического упора

Сборку полноразмерной рамы планируется осуществлять на стапеле, состоящем из четырех частей, подобных стапелю для сборки четверти рамы, установленных на восьмиугольном основании.

**Заключение.** По результатам проведенной работы можно сделать выводы о преимуществах и недостатках применения полимерных композиционных материалов в ферменных конструкциях двигательных установок. Основными преимуществами являются снижение массы конструкции при одновременном улучшении прочностных и жесткостных характеристик, а также возможность заранее спроектировать свойства материала. К недостаткам можно отнести проблемы, которые возникают в процессе проектирования, изготовления и сборки данных изделий. К ним относятся:

- разнонаправленность осей ферменной конструкции (их расположение в разных плоскостях);
- сложности, связанные с проведением расчетов фитинговых соединений;
- трудности при формовании изделий из углепластика, имеющих сложную форму.

Данные проблемы можно обобщить и добавить, что главной проблемой, из которой вытекают остальные, является разнонаправленность осей рамы в пространстве в совокупности с анизотропностью используемого материала. Дальнейшие исследования покажут пути решения проблемы.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Макаров В.Ф., Мешкас А.Е., Ширинкин В.В. Технологии, позволяющие повысить эффективность обработки композиционных материалов. *Матер. XVI Всерос. науч.-техн. конф. «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации»*, ПНИПУ. Пермь, 2015, с. 179–189.



- [2] Соколовский М.И., Шатров В.Б., Шайдурова Г.И., Васильев И.Л. Исследование, разработка и перспективы использования инновационных подходов в материаловедении и технологиях производства изделий РКТ. *Матер. II Всерос. науч.-техн. конф. «Климат-2017. Проблемы оценки климатической стойкости материалов и сложных технических систем»*. ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ. Геленджик, 2017, с. 113–120. 1 CD-ROM.
- [3] Зимин В.Н., Смердов А.А. Проектирование композитных соединительных узлов в задачах оптимизации многосекционных композитных космических ферменных конструкций. *Вестник СибГАУ*, 2017, т. 18, № 1, с. 123–131.
- [4] Кондратенко А.Н., Голубкова Т.А. Полимерные композиционные материалы в изделиях зарубежной ракетно-космической техники (Обзор). *Конструкции из композиционных материалов*, 2009, № 2, с. 24–35.
- [5] Scelsi L., Bonner M., Hodzic A., Soutis C., Wilson C., Scaife R., Ridgway K. Potential Emissions Savings of Lightweight Composite Aircraft Components Evaluated Through Life Cycle Assessment. *eXPRESS Polymer Letters*, 2011, vol. 5, no. 3, pp. 209–217.
- [6] Зорин В.А. Опыт применения композиционных материалов в изделиях авиационной и ракетно-космической техники (Обзор). *Конструкции из композиционных материалов*, 2011, № 4, с. 44–59.
- [7] Портной К.И., Салибеков С.Е., Светлов И.Л., Чубаров В.М. *Структура и свойства композиционных материалов*. Москва, Машиностроение, 1979, 255 с.
- [8] Смердов А.А., Таирова Л.П., Тимофеев А.Н., Шайдуров В.С. Методика проектирования и экспериментальной отработки размеростабильных трубчатых стержней из углепластика. *Конструкции из композиционных материалов*, 2006, № 3, с. 12–23.
- [9] Liangquan Zhang, Hui Li, Jinping Ou. Experimental Investigation and Analysis on Mechanical Behavior of Filament-Wound CFRP Tubes. *Pacific Science Review*, 2008, vol. 10, no. 3, pp. 335–340.
- [10] Зорин В.А. Методология проектирования оболочечных конструкций из композиционных материалов. *Конструкции из композиционных материалов*, 2012, № 3, с. 3–10.
- [11] Ширяев М.И., Токарева М.И., Лянгузова Т.А. Применение углепластика при проектировании несущих элементов рамных конструкций двигательных установок. *Сб. матер. V Междунар. конф. с элементами научной школы для молодежи «Функциональные наноматериалы и высококачественные вещества»*. Минобрнауки России, РАН, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, ОАО «КОМПОЗИТ». Суздаль, 2014, с. 179–180. 1 CD-ROM.
- [12] Дмитриев О.С., Малков И.В. Влияние режимов термообработки на геометрические и механические характеристики углепластиковых трубчатых элементов. *Вестник Тамбовского гос. техн. ун-та*, 2016, т. 22, № 3, с. 427–438.
- [13] Крысин В.Н., Крысин М.В. *Технологические процессы формования, намотки и склеивания конструкций*. Москва, Машиностроение, 1989, 240 с.

Статья поступила в редакцию 15.11.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Токарева М.И., Ширяев М.И. Проблемы применения композиционных материалов при разработке ферменных конструкций двигательных установок. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 1.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-1-1840>



**Токарева Мария Ивановна** — аспирант кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций» ПНИПУ, инженер-конструктор АО «Уральский научно-исследовательский институт композиционных материалов».  
e-mail: tokareva.mi@yandex.ru

**Ширяев Михаил Иванович** — начальник лаборатории, АО «Уральский научно-исследовательский институт композиционных материалов»

## Problems of using composite materials in the development of truss structures of propulsion systems

© M.I. Tokareva, M.I. Shiryayev

JSC “Ural Research Institute of Composite Materials”, Perm, 614014, Russia

*The article considers the stages of design, manufacture, assembling and testing a power truss structure of a liquid rocket engine made of polymer composite materials. It is assumed that the power frame of carbon fiber will be similar to the metal, i.e. it will have the same location of the axes and mounting points of the engine components. Hence, the ways of overcoming a number of difficulties arising in the composite power frame design and manufacture are investigated. The advantages and disadvantages of using polymer composite materials when creating truss structures of propulsion systems are revealed. As a result of the metal power frame replacement in the truss structure for the carbon-fiber plastic one, it becomes possible to reduce the mass of such a structure by about 2 times, and the engine mass by about 20 kg.*

**Keywords:** truss structures, rocket and space technology design, liquid rocket engine frame, carbon fiber structure

### REFERENCES

- [1] Makarov V.F., Meshkas A.E., Shirinkin V.V. Tekhnologii, pozvolyaushchie povysit effektivnost obrabotki kompozitsionnykh materialov [Technologies to improve the processing efficiency of composite materials]. *Materialy XVI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i innovatsii”* [Proceedings of the XVI All-Russia scientific and technical conference: Aerospace Engineering, High Technology and Innovation]. Perm, Perm National Research Polytechnic University Publ., 2015, pp. 179–189.
- [2] Sokolovsky M.I., Shatrov V.B., Shaydurova G.I., Vasilyev I.L. Issledovanie, razrabotka i perspektivy ispolzovaniya innovatsionnykh podkhodov v materialovedenii i tekhnologiyakh proizvodstva izdeliy RKT [Research, development and prospects for the use of innovative approaches in material science and production technologies of rocket and space technology products]. *Materialy II Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Klimat-2017. Problemy otsenki klimaticheskoy stoykosti materialov i slozhnykh tekhnicheskikh sistem”* [Proceedings of the II All-Russia Scientific and Technical Conference “Climate 2017. Problems of assessing the climatic resistance of materials and complex technical systems]. Gelendzhik, FGUP All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials Publ., 2017, pp. 113–120. 1 CD-ROM.
- [3] Zimin V.N., Smerdov A.A. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M. F. Reshetneva — Herald of Reshetnev Siberian State Aerospace University*, 2017, vol. 18, no. 1, pp. 123–131.
- [4] Kondratenko A.N., Golubkova T.A. *Konstruktsii iz kompozitnykh materialov (Composite material structures)*, 2009, no. 2 pp. 24–35.
- [5] Scelsi L., Bonner M., Hodzic A., Soutis C., Wilson C., Scaife R., Ridgway K. *eXPRESS Polymer Letters*, 2011, vol. 5, no. 3, pp. 209–217.
- [6] Zorin V.A. *Konstruktsii iz kompozitnykh materialov (Composite material structures)*, 2011, no. 4, pp. 44–59.

- [7] Portnoy K.I., Salibekov S.E., Svetlov I.L., Chubarov V.M. *Struktura i svoystva kompozitsionnykh materialov* [Structure and properties of composite materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979, 255 p.
- [8] Smerdov A.A., Tairova L.P., Timofeev A.N., Shaidurov V.S. *Konstruktsii iz kompozitnykh materialov (Composite material structures)*, 2006, no. 3, pp. 12–23.
- [9] Liangquan Zhang, Hui Li, Jinping Ou. *Pacific Science Review*, 2008, vol. 10, no 3, pp. 335–340.
- [10] Zorin V.A. *Konstruktsii iz kompozitnykh materialov (Composite material structures)*, 2012, no. 3, pp. 3–10.
- [11] Shiryaev M.I., Tokareva M.I., Lyanguzova T.A. Primenenie ugleplastika pri proektirovanii nesushchikh elementov ramnykh konstruktsiy dvigatelnykh ustanovok [The use of carbon fiber in the design of bearing elements of propulsion system frame structures]. *Sbornik materialov V mezhdunarodnoy konferentsii s elementami nauchnoy shkoly dlya molodezhi "Funksionalnye nanomaterialy i vysokochistye veshchestva"* [Proceedings of the V International conference with elements of a scientific school for young people "Functional nanomaterials and high-purity substances"]. Suzdal, 2014, pp. 179–180. 1 CD-ROM.
- [12] Dmitriev, O.S., Malkov, I.V. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta — Transactions of Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 427–438.
- [13] Krysin V.N., Krysin M.V. *Tekhnologicheskie protsessy formovaniya, namotki i skleivaniya konstruktsii* [Technological processes of forming, winding and gluing structures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 240 p.

**Tokareva M.I.**, post-graduate student, Department of Mechanics of Composite Materials and Structures, Perm National Research Polytechnic University, design engineer, JSC "Ural Research Institute of Composite Materials". e-mail: tokareva.mi@yandex.ru

**Shiryaev M.I.**, Head of Laboratory, JSC "Ural Research Institute of Composite Materials".