

УДК 621.882.29

Проблемы прочности соединения деталей элементами из композиционных материалов

Бакулин А. А.^{1,2}, Захаров М. Н.¹,

Квитка Е. В.², Любченко М. А.^{1,2,*},

Магнитский И. В.², Пономарев К. А.²

* ma_ljubchenko@yandex.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

²ОАО «Комполит», Королев, Россия

В связи с повышением требований к эффективности современной машиностроительной, ракетно-космической и авиационной техники, по весовым, температурным и прочностным характеристикам, разрабатываются и внедряются новые конструкционные и теплозащитные материалы.

Научно-технический интерес представляют композиционные материалы (КМ) на основе углерода, углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) и изделия из них, особенно в области высоких температур.

В связи с этим актуально создание соединительных элементов, таких как винты, гайки, шпильки для работы в изделиях из КМ при экстремальных условиях термомеханического нагружения.

В работе были проанализированы результаты физико-механических испытаний шпилек из УУКМ по двум параметрам:

- влияние количества витков на прочность при резьбовом соединении;
- влияние шага на разрушающую нагрузку резьбы.

Ключевые слова: композиционные материалы, УУКМ 4DL, соединения из КМ, прочность резьбовых соединений

Введение

В настоящее время композиционные материалы (КМ) на основе химических волокон, армирующих полимерную, металлическую или керамическую матрицу, находят широкое применение в аэрокосмической и машиностроительной технике, где определяющим параметром служат весовые характеристики изделия, а также их функционирование в области высоких температур.

В настоящее время из композиционных материалов изготавливают: корпуса двигателей, головные обтекатели для твёрдотопливных ракет-носителей, транспортно-пусковые контейнеры, корпуса автомобилей, вертолётные лопасти и т.д.

1. Специфика композиционных материалов

Свойства КМ в целом не полностью определяются свойствами его компонент. На свойства композиционных материалов также оказывают существенное влияние технология производства, в том числе, изменения связи между компонентами. В общем случае композиционные материалы являются анизотропными. Это обстоятельство создает дополнительные трудности как при экспериментальном определении характеристик материала, так и при расчете прочности конструкций.

Еще одной проблемой использования деталей из композиционных материалов в машиностроении является их соединение.

Преимуществом КМ по сравнению с металлическими сплавами является способность работать при высоких температурах. Например, композиционный материал типа «углерод-углерод» (УУКМ) при высоких температурах на уровне 1800 - 2000 °С упрочняется на 20-40%. В связи с этим применение стандартного металлического крепежа при соединении деталей из композитов сводит на нет преимущества композиционных конструкций, так как устойчивый режим работы металлического крепежа до 1000 °С, а создание крепежа из высокотемпературного КМ весьма перспективно.

Основной спецификой композиционных материалов является ярко выраженный масштабный эффект прочности. При изготовлении из композита элементов резьбового соединения путем механической обработки заготовок перерезаются отдельные армирующие элементы и прочность резьбы существенно падает и определяется в основном прочностью связующего и интерфейса (интерфейсом называется промежуточный слой между армирующим наполнителем КМ и связующим, который составляет несколько десятков нанометров и не зависит от типа армирования композита). Данное явление, почти отсутствующий у металлических материалов, существенно зависит как от характерных размеров детали, так и от схемы армирования материала и направления вырезки детали из заготовки. Получение подобных зависимостей только расчетными методами затруднительно в связи со сложностью численного моделирования перечисленных эффектов и определении необходимых констант.

Различные классы композитов могут иметь специфические особенности, влияющие на работоспособность резьбовых соединений. Так, наполнитель и матрица УУКМ при температурах до 2000 °С не демонстрируют пластического поведения при квазистатическом нагружении [1,2], что препятствует перераспределению нагрузки между витками резьбы и между элементами соединения в целом. Вследствие этого можно предположить существенно большее влияние несовершенства формы и структуры деталей для таких материалов по сравнению с пластичными материалами.

Для композитов теплозащитного назначения, в том числе УУКМ, характерны невысокие значения прочности. Этот факт, а также особенности технологии изготовления и переработки таких материалов, могут сделать невозможным изготовление резьбовых деталей с головками по ГОСТ 18786-80 и ГОСТ 7805-70. Данный вопрос подлежит экспериментальной проверке.[7, 8]

2. Постановка задачи

Для экспериментального исследования резьбовых элементов из композиционных материалов был выбран пространственно армированный УУКМ на основе стержневого каркаса со схемой армирования 4DL и характерным поперечным размером армирующего элемента (стержня) 0,7 мм. Структура каркаса такого материала и условные обозначения направлений армирования показаны на рис. 1. Матрица материала представляет собой кокс каменноугольного пека. Материал изготавливался путем многократной пекопропитки с последующей карбонизацией и графитацией до конечной плотности 1950 кг/м^3 .

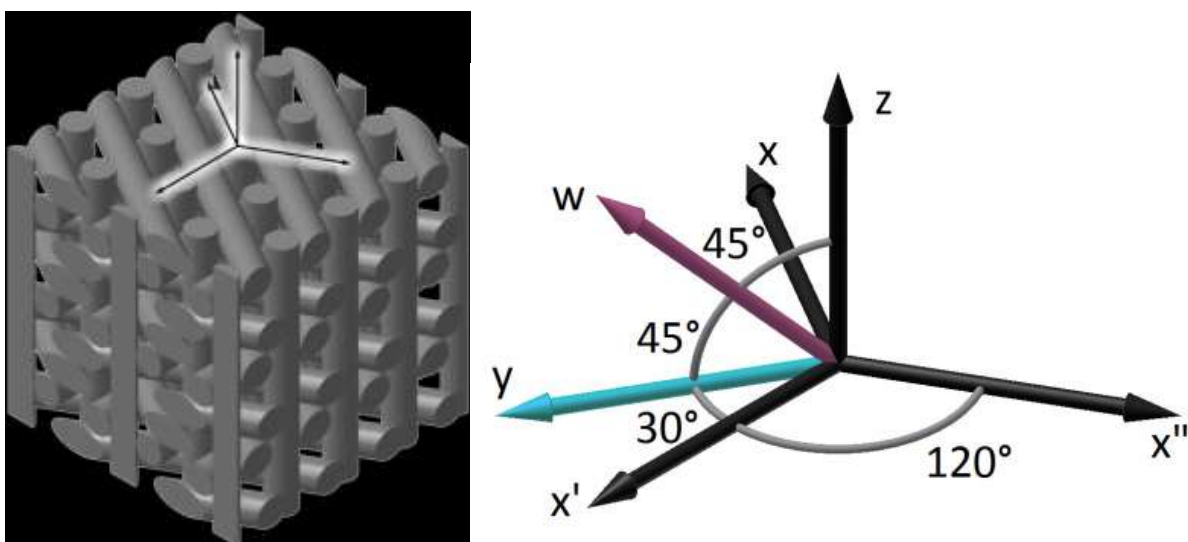


Рис.1. Структура каркаса материала со схемой армирования 4DL и основные направления материала со схемой армирования 4DL.

В задачи первого этапа экспериментальных исследований входят:

- отработка методов экспериментального исследования прочностных параметров резьбовых пар;
- определение зависимостей прочности резьбовой пары от количества задействованных витков резьбы и шага резьбы на минимальном наборе образцов;
- оценка разбросов характеристик резьбовых пар на современных УУКМ.

На первом этапе исследовалась только метрическая резьба. Образцы вырезались из материала вдоль направления x (см. рис.1). Образцы вырезались из двух различных заготовок, причем результаты обрабатывались совместно. Это соответствует поставленной задаче. В испытаниях использовалась следующая номенклатура размеров резьб: $M24 \times 1,5$; $M24 \times 2$; $M24 \times 3$.

Зависимость прочности резьбы от количества витков определялась в диапазоне от 3 до 10 витков на резьбе $M24 \times 2$. На каждый виток в диапазоне использовалось не менее 3 образцов. Остальные образцы применялись для получения зависимости несущей способности резьбы от шага, причем на различный шаг резьбовой пары приходилось по 5 образцов. При испытаниях с различным шагом резьб количество витков не учитывалось, но

число витков выбиралось таким образом, чтобы длина задействованной части резьбы составляла $0,7 \div 0,9$ от ее диаметра.

Образцы представляли собой шпильки размеров, достаточных для их закрепления в захватах. Последние изготавливались из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и устанавливались на разрывной машине SchenckTrebel RMC-100 через шаровую опору. Испытательная сборка показана на рис. 2. Нагружение проводилось на скорости движения активного захвата машины, равной 5 мм/мин.

Моментом разрушения считалось монотонное падение нагрузки более, чем на 50 % от максимальной. Характер диаграммы оценивался после разрушения по критерию «мгновенное – постепенное». Разрушение считалось постепенным, если на диаграмме явно идентифицируется последовательное разрушение отдельных витков, проявляющееся в некотором быстром падении нагрузки с последующим ее ростом. В противном случае разрушение считалось мгновенным.



Рис.2. Испытательная оснастка с образцом в сборе

3. Результаты испытаний

Результаты измерения прочности резьбы с различным количеством задействованных витков приведены в табл. 1. График соответствующей зависимости показан на рис. 3., доверительный интервал (ДИ) определен с вероятностью 95 %, P – значение разрушающей нагрузки, $P_{\text{ср.}}$ – среднее значение разрушающей нагрузки, S_q – среднеквадратичное отклонение среднего значения величины, синим цветом показаны значения отношения $P_{\text{тек.}}$ текущей нагрузки на витке к $P_{\text{max.}}$ максимальному значению при проведенных испытаниях, а красным цветом проведена аппроксимация и экстраполяция по средним арифметическим значениям относительной разрушающей нагрузки, методом наименьших квадратов.[6]

Наблюдается явная корреляция между количеством витков и разрушающей нагрузкой, коэффициент корреляции 0,856.

Из приведенных данных видно, что при числе витков $n=10$ разрушающая нагрузка составляет более 90% от возможной для данного типа резьбы (табл. 2), что отличается от данных на металлических образцах, где согласно задаче Жуковского 10-й виток дает приращение к нагрузке менее 1 %. [3, 2]

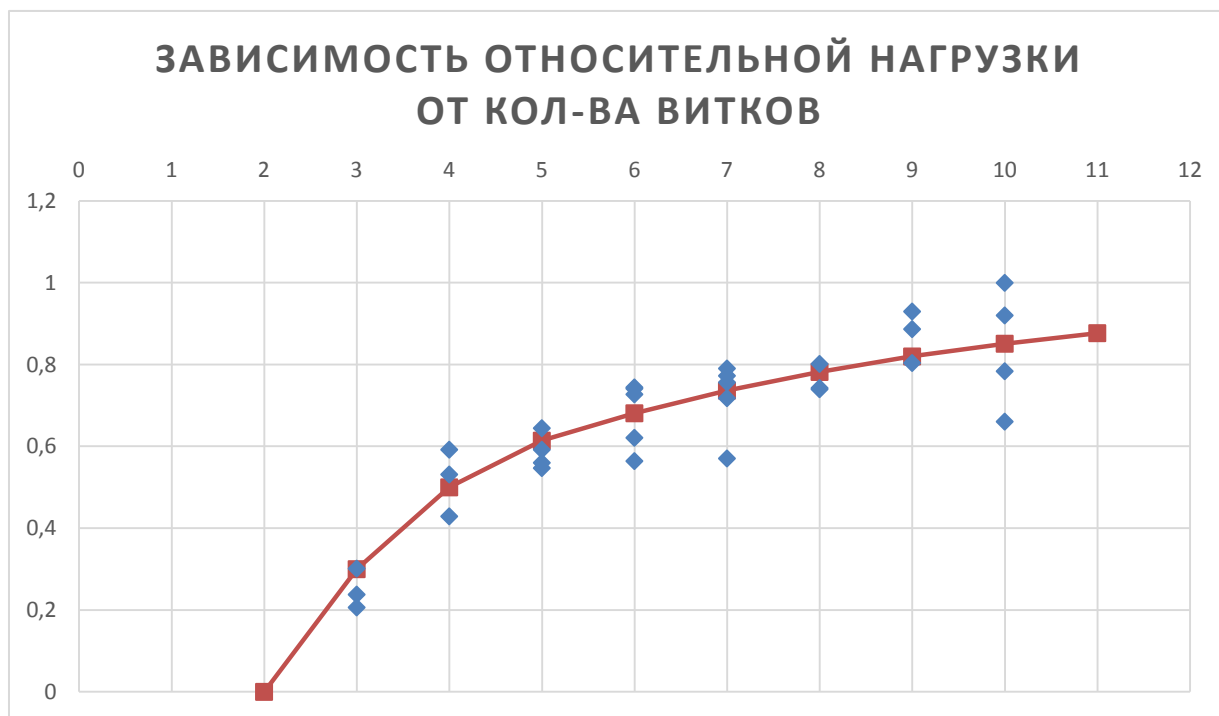


Рис.3. Зависимость относительной нагрузки от количества витков

где $\blacksquare$ — $\frac{P_{ср.}}{P_{ср.мах}}$, $\blacklozenge$ — $\frac{P_{тек.}}{P_{мах}}$.

Из 30 испытанных образцов 7 отчетливо продемонстрировали постепенный характер разрушения.

Зависимость относительной разрушающей нагрузки от количества витков можно экстраполировать формулой:

$$y = 1 - e^{(-0.1905x)} \quad (1)$$

где x — количество витков находящихся в контакте пары винт-гайка; y — значение относительно разрушающей нагрузки; за единицу принято $P=P_{мах}$.

При этом установить однозначную связь между характером разрушения и разрушающей нагрузкой не представляется возможным. На материале не удастся провести эксперимент для 1 - 2 витков, поэтому авторами принято допущение, что нагрузка на втором витке равна нулю. Дальнейшая обработка результатов велась методом наименьших квадратов.[6]

Результаты испытаний прочих резьбовых элементов приведены в табл. 3. Наблюдается явная зависимость увеличения несущей нагрузки резьбы от ее шага. Увеличение прочности резьбы при увеличении шага зависит от соотношения между шагом и характерным размером ячейки материала. Ячейка композиционного материала — это структурная еди-

ница, многократным плоскопараллельным переносом которой образуется массив материала произвольных размеров.

Таблица 1. Результаты испытаний резьб М24х2 с различным количеством задействованных витков

№ обр.	Кол-во витков	Р, Н	Р _{ср} , Н	S _q	±ДИ, Н	Характер разрушения
1	3	3391	4085	459	±1141	Мгновенный
2	3	4953				Мгновенный
3	3	3910				Мгновенный
4	4	7051	8505	782	±1942	Мгновенный
5	4	8733				Мгновенный
6	4	9730				Мгновенный
7	5	9204	9629	357	±568	Мгновенный
8	5	9729				Мгновенный
9	5	8990				Мгновенный
10	5	10593				Мгновенный
11	6	10207	11169	604	±750	Мгновенный
12	6	11952				Мгновенный
13	6	9271				Мгновенный
14	6	12184				Постепенный
15	6	12231				Постепенный
16	7	12433	11859	651	±809	Мгновенный
17	7	9376				Мгновенный
18	7	12697				Мгновенный
19	7	11798				Мгновенный
20	7	12991				Мгновенный
21	8	12158	12512	331	±823	Постепенный
22	8	12205				Мгновенный
23	8	13174				Постепенный
24	9	13212	14355	607	±1507	Постепенный
25	9	15280				Мгновенный
26	9	14573				Постепенный
27	10	16431	14811	1231	±1959	Постепенный
28	10	12880				Мгновенный
29	10	10856				Мгновенный
30	10	15122				Мгновенный

Таблица 2. Приращение нагрузки от количества витков

Диапазон витков	Приращение нагрузки, Н
3-4	4420
4-5	1124
5-6	1540
6-7	690
7-8	653
8-9	1843
9-10	456

Результаты испытаний прочих резьбовых элементов приведены в табл. 3. Наблюдается явная зависимость увеличения несущей нагрузки резьбы от ее шага. Увеличение прочности резьбы при увеличении шага зависит от соотношения между шагом и характерным размером ячейки материала. Ячейка композиционного материала это структурная единица, многократным плоскопараллельным переносом которой образуется массив материала произвольных размеров.

Таблица 3. Результаты испытаний резьбы одного диаметра с различным шагом

Типоразмер резьбы	№ обр.	Кол-во витков	P, Н	P ср., Н	Sq	±ДИ, Н	Характер разрушения
M24×1,5	1	8	8465	8858	248	±308	Постепенный
	2	7	8281				Постепенный
	3	10	8905				Постепенный
	4	9	8924				Постепенный
	5	16	9716				Постепенный
M24×2	1	7	12433	12415	207	±257	Мгновенный
	2	8	12158				Постепенный
	3	7	12697				Мгновенный
	4	7	11798				Мгновенный
	5	7	12991				Мгновенный
M24x3	1	7	14750	12847	872	±1083	Мгновенный
	2	7	9999				Мгновенный
	3	7	14345				Мгновенный
	4	6	13307				Мгновенный
	5	7	11834				Постепенный

Таким образом, твердо установленной можно считать наличие существующей нелинейной зависимости прочности резьбы от количества задействованных витков.

Остальные зависимости: от диаметра, от профиля и т.д. не исследовались на данном этапе. Также следует отметить, что метод испытаний, применявшийся в исследовании, не полностью имитирует резьбовое соединение из композиционных материалов, поскольку охватываемая деталь изготавливалась из стали.

Заключение

1. Построенная зависимость несущей способности резьбового соединения от количества витков (винт УУКМ – гайка сталь 12Х18Н10Т) показала:
 - а) приращение несущей способности с увеличением количества витков, уменьшается. Однако выражено оно менее значительно, чем при металлической паре винт – гайка. Так, при паре винт – гайка (металл), согласно задаче Жуковского, 10-й виток дает приращение к нагрузке менее 1 %. В случае резьбы на УУКМ исследованного типа приращение составило более 10%.
 - б) на исследованном УУКМ не удалось провести эксперимент для 1-2 витков, устойчивое значение нагрузки можно получить при наличии на резьбовом элементе от 3-х витков.
 - в) широкий диапазон ДИ разрушающей нагрузки по виткам можно объяснить тем, что материал отличается заметной структурной неоднородностью, с разной степенью вероятности попадания в элементарную ячейку матрицы и наполнителя материала. Тем не менее, диапазон ДИ стабилен, что косвенно свидетельствует о возможном использовании методики испытаний для дальнейшего исследования резьбовых элементов из композиционного материала.
2. Наблюдается явная зависимость несущей нагрузки резьбы от ее шага. Увеличение прочности резьбы при увеличении шага зависит от соотношения между размером шага и характерным размером ячейки материала, поскольку они имеют одинаковый порядок, и если при мелком шаге элементарная ячейка повреждена, то ожидаемая прочность не достигается.
3. Проведенные испытания показывают, что можно создать крепеж из УУКМ для работы при повышенных температурах, аналогичный металлическому, при условии подбора необходимых параметров, таких как профиль, шаг, диаметр и количество витков резьбы.

Список литературы

1. Бушуев Ю.Г., Персин М.И., Соколов В.А. Углерод-углеродные композиционные материалы. М.: Металлургия, 1994. 128 с.
2. Костиков В.И., Варенков А.Н. Сверхвысокотемпературные композиционные материалы. М.: Интермет Инжиниринг, 2003. 560 с.
3. Андриенко Л.А., Байков Б.А., Захаров М.Н. Детали машин: учеб. для вузов / под ред. О.А. Ряховского. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Из-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 465 с.

4. Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Резьбовые и фланцевые соединения. М.: Машиностроение, 1990. 368 с.
5. Кинцис Т.Я., Розе А.В., Жигун И.Г. Методы статистических испытаний армированных пластиков: справ. пособие. Рига: Зинатне, 1972. 228 с.
6. Горяинова Е.Р., Панков А.Р., Платонов Е.Н. Прикладные методы анализа статистических данных: учеб. пособие. М.: Высшая школа экономики, 2012. 310 с.
7. ГОСТ 18786-80. Винты ступенчатые с шестигранным углублением под ключ. Конструкция и размеры. Введ. 1982-01-01. М.: Изд-во стандартов, 2012. 4 с.
8. ГОСТ 7805-70. Болты с шестигранной головкой класса точности А. Конструкция и размеры. Введ. 1972-01-01. М.: Изд-во стандартов, 2010. 10 с

Strength of Composite Joints in Structural Components and Articles

A.A. Bakulin^{1,2}, M.N. Zakharov¹, E.V. Kvitka²,
M.A. Lyubchenko^{1,2,*}, I.V. Magnitskiy²,
K.A. Ponomarev²

[*ma.lyubchenko@yandex.ru](mailto:ma.lyubchenko@yandex.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

²ОАО «Композит», Korolev, Russia

Keywords: composite materials, 4DL CCCM, CM joints, screw joint strength

Currently, the composite materials (CM) are widely used in the aerospace technology and mechanical engineering where the key parameters characterizing structural components and articles are related to their weight characteristics as well as their performance under high temperatures.

For the experimental investigation of composite-based threaded items, the rod-based 3D-reinforced carbon-carbon composite material (CCCM) was chosen.

The subject of the research was the metric thread. The test samples were cut of the aforesaid material along one of the reinforcement direction. The following thread sizes were analyzed: M24×1.5; M24×2; M24×3.

Dependence of the thread strength on the number of thread turns was determined within the range of 1 to 10 thread turns for M24×2 thread size. The remaining test samples were used to obtain the relationship between the thread load bearing capacity and the thread pitch.

The obtained dependence of the thread load bearing capacity on the number of thread turns showed the following:

- a) An increment in the thread load bearing capacity decreases with increasing number of thread turns. However, this effect is less pronounced than that observed for the metal 'screw/nut' pair.
- b) With the CCCM material under study, it proved to be impossible to test configurations having only 1 or 2 thread turns.
- c) The wide confidence range (CR) of the failure load can be explained by the fact that the material under study features an apparent structural heterogeneity, with a different probability of hitting a unit cell of the matrix and filler of the material. Nevertheless, the confidence range is stable, thus indicating indirectly the possibility of using this test method for further study of composite-based threaded items.

There is an explicit correlation between the thread load bearing capacity and the thread pitch. Increase in the thread strength with increasing thread pitch depends on the relationship between the pitch size and the characteristic size of the unit cell of the material.

The test research has shown that it is possible to make CCCM-based screw joints designed for operation under high temperatures as an alternative for metal screw joints, provided that the key parameters such as the thread profile, pitch, diameter and the number of thread turns are properly chosen.

References

1. Bushuev Yu.G., Persin M.I., Sokolov V.A. *Uglerod-uglerodnye kompozitsionnye materialy* [Carbon-carbons composite materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1994. 128 p. (in Russian).
2. Kostikov V.I., Varenkov A.N. *Sverkhvysokotemperaturnye kompozitsionnye materialy* [Composite materials of very high temperature]. Moscow, Internet Inzhiniring Publ., 2003. 560 p. (in Russian).
3. Andrienko L.A., Baikov B.A., Zakharov M.N. *Detali mashin: ucheb. dlya vuzov* [Details of machines: textbook for universities]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014. 465 p. (in Russian).
4. Birger I.A., Iosilevich G.B. *Rez'bovye i flantsevye soedineniya* [Threaded and flange connections]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 368 p. (in Russian).
5. Kintsis T.Ya., Roze A.V., Zhigun I.G. *Metody statisticheskikh ispytaniy armirovannykh plastikov: sprav. posobie* [Methods of statistical tests of reinforced plastics: reference book]. Riga, Zinatne Publ., 1972. 228 p. (in Russian).
6. Goryainova E.R., Pankov A.R., Platonov E.N. *Prikladnye metody analiza statisticheskikh dannykh: ucheb. posobie* [Applied methods of analysis of statistics: tutorial]. Moscow, Higher School of Economics, 2012. 310 p. (in Russian).
7. *GOST 18786-80. Vinty stupenchatye s shestigrannym uglubleniem pod klyuch. Konstruktsiya i razmery* [State Standard 18786-80. Female shouldered screws. Design and dimensions]. Moscow, Standards Publishing House, 2012. 4 p. (in Russian).
8. *GOST 7805-70. Bolty s shestigrannoi golovkoi klassa tochnosti A. Konstruktsiya i razmery* [State Standard 7805-70. Hexagon bolts, product grade A. Construction and dimensions]. Moscow, Standards Publishing House, 2010. 10 p. (in Russian).