

УДК 624.078.41

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ БОЛТА С ПОТАЙНОЙ ГОЛОВКОЙ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ СОЕДИНЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКОГО МАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА И СВЕРХПРОЧНОГО СПЛАВА

Ц. Сунь, Ш. Чжао*, Ю. Чзан*, Ч. Лв**, С. Сунь***,
Ц. Цзя****, М. Ли*

Шэньянский институт проектирования самолетов Корпорации авиационной промышленности Китая, 110000 Шэньян, Китай

* Харбинский технологический институт, 150080 Харбин, Китай

** Китайская академия аэрокосмической аэродинамики, 100074 Пекин, Китай

*** Школа аэронавтики и астронавтики Харбинского технологического института, 150001 Харбин, Китай

**** Школа материаловедения и инженерии Харбинского технологического института, 150001 Харбин, Китай

E-mails: sunqian601@163.com, angel.zsy@126.com, zhym@hit.edu.cn, lvchaolixue@sina.com, sunxinyang1982@126.com, jiajin@hit.edu.cn, limingrui97@126.com

С использованием подпрограммы UMAT, встроенной в пакет Abaqus, выполнен двумерный анализ разрушения пластины из композита C/SiC, находящейся под действием растягивающей нагрузки, при наличии в пластине крепежного соединения в виде болта с потайной головкой. На основе разработанной модели проведено параметрическое исследование влияния параметров болта с потайной головкой на процесс разрушения комбинированного болтового соединения. Установлено, что жесткость болтового соединения практически не зависит от высоты потайной головки, которая для рассматриваемых ее диаметров изменяется в диапазоне от 1,5 до 2,5 мм. Показано, что нагрузка, при которой происходит разрушение керамического матричного композита и комбинированного болтового соединения, существенно зависит от параметров болта с потайной головкой. С увеличением высоты потайной головки болта увеличивается концентрация напряжений вблизи кромки отверстия в пластине из композитного материала. Соединение имеет максимальную несущую способность, если диаметр и высота головки болта составляют 9,4 и 1,5 мм соответственно.

Ключевые слова: двумерный композит C/SiC, анализ процесса разрушения, свойства материала при растяжении, болтовое соединение, параметры болта с потайной головкой.

DOI: 10.15372/PMTF20220123

Введение. Болтовые соединения композитов широко используются в аэрокосмической и авиационной промышленности [1–8], поскольку они обладают большой прочностью

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда предварительных исследований Шэньянского авиационного проектно-исследовательского института Корпорации авиационной промышленности Китая (грант № JH20128255) и Фонда предварительных исследований Департамента разработки оборудования Главной военной комиссии Китайской Народной Республики (грант № ZJJSN20200001), а также в рамках Программы фундаментальных исследований национальной обороны (грант № JZ20180032).

© Сунь Ц., Чжао Ш., Чзан Ю., Лв Ч., Сунь С., Цзя Ц., Ли Ц., 2022

и конструкции с таким соединением легко собираются и разбираются. Болтовые соединения являются слабыми элементами конструкции, поэтому их проектированию уделяется большое внимание. Поскольку болты с потайной головкой обеспечивают гладкость поверхностей соединяемых элементов и устойчивы к действующим на них нагрузкам, они широко используются в аэрокосмической промышленности при сборке самолетов, к аэродинамическим характеристикам которых предъявляются большие требования. Однако при использовании таких болтовых соединений в окрестности крепления возникает большая концентрация напряжений, вследствие чего снижается прочность всей композитной конструкции.

Проведены различные экспериментальные и численные исследования напряженно-деформированного состояния составных композитных конструкций, в которых для соединения пластин используются болты [1–6]. В основном исследования трехмерного напряженно-деформированного состояния комбинированных пластин из керамических матричных композитов (КМК) выполнены для соединений с использованием болтов с выступающими головками [7–9]. В работах [10, 11] с помощью программного кода Abaqus / Explicit проведен нелинейный анализ процесса разрушения при растягивающих нагрузках для соединения пластины из КМК с пластиной из сверхпрочного сплава, выполненного с использованием болта с выступающей головкой.

В данной работе с использованием разработанного метода анализа процесса разрушения исследуется влияние геометрических параметров болта с потайной головкой на несущую способность соединения внахлест пластины из КМК и пластины из сверхпрочного сплава.

1. Конечно-элементное моделирование прочности соединения керамического матричного композита и сверхпрочного сплава с помощью болта с потайной головкой при одноосном растягивающем усилии. Исследуется соединение внахлест пластин из КМК и сверхпрочного сплава, выполненное с помощью болта с потайной головкой. Соединяемые пластины имели следующие параметры: размеры пластины из тканого композита C/SiC — $120 \times 50 \times 3$ мм, размеры пластины из сверхпрочного сплава GH4169 — $120,0 \times 50,0 \times 1,5$ мм, длина захвата — 50 мм, диаметр потайной головки болта из сплава GH4141 — 5 мм.

Для моделирования поведения комбинированного соединения под действием квазистатической растягивающей нагрузки с использованием пакета Abaqus создана конечно-элементная модель (рис. 1).

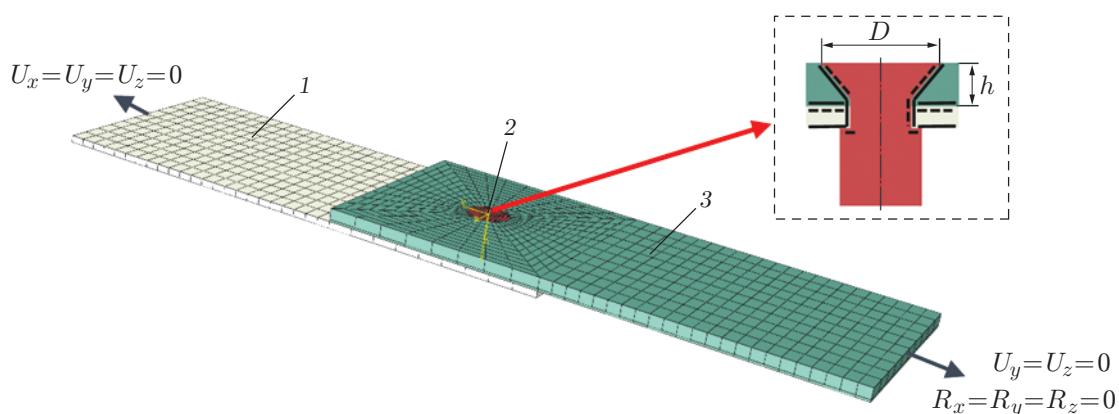


Рис. 1. Конечно-элементная модель комбинированного соединения:

1 — пластина из сверхпрочного сплава, 2 — болт с потайной головкой и гайкой, 3 — пластина из композита

Для дискретизации пластины из композита, пластины из сверхпрочного сплава и механического крепления использовались трехмерные восьмиузловые конечные элементы C3D8R с контролем неустойчивости типа “песочные часы”. Поведение материала пластины из композита C/SiC описано с помощью нелинейных определяющих соотношений, предложенных в работе [12]. Эти соотношения использовались при аппроксимации полиномами пятого порядка экспериментальных данных, полученных при одноосном растяжении и сдвиге. Касательный модуль определялся в результате дифференцирования полученных соотношений между напряжениями и деформациями:

$$E_i^{tan} = \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i} = A_1 + 2A_2\varepsilon_i + 3A_3\varepsilon_i^2 + 4A_4\varepsilon_i^3 + 5A_5\varepsilon_i^4 \quad (0 \leq \varepsilon_i \leq \varepsilon_i^f, \quad i = 1, 2),$$

$$G_{12}^{tan} = \frac{d\tau_{12}}{d\gamma_{12}} = B_1 + 2B_2\gamma_{12} + 3B_3\gamma_{12}^2 + 4B_4\gamma_{12}^3 + 5B_5\gamma_{12}^4 \quad (|\gamma_{12}| \leq \gamma_{12}^f).$$

Здесь ε_i^f ($i = 1, 2$) — значения главных деформаций (в направлениях 1 и 2 соответственно) при разрушении; γ_{12}^f — деформация сдвига (при сдвиге в плоскости главных направлений 1 и 2) при разрушении; A_j , B_j ($j = 1, 2, \dots, 5$) — коэффициенты в аппроксимирующих соотношениях между напряжениями и деформациями; E_i^{tan} , G_{12}^{tan} — начальные модули упругости (при $\varepsilon_i = 0$, $\gamma_{12} = 0$) композита C/SiC при одноосном растяжении и сдвиге соответственно.

При разгрузке и последующем догружении модуль упругости E_1^u и модуль сдвига G_{12}^u определяются соотношениями

$$E_i^u = A_6 + \frac{A_7 - A_6}{1 + (\varepsilon_i^m/x_0)^{p_0}} \quad (\varepsilon_i \leq \varepsilon_i^m, \quad i = 1, 2),$$

$$G_{12}^u = B_6 + \frac{B_7 - B_6}{1 + (|\gamma_{12}^m|/x_1)^{p_1}} \quad (|\gamma_{12}| \leq |\gamma_{12}^m|).$$

Экспериментальные кривые зависимости напряжений от деформаций при одноосном нагружении и сдвиге, а также механические свойства двумерного тканого композита C/SiC и суперсплавов, используемые в данной работе, приведены в [10, 11].

Для рассматриваемого соединения были определены пять контактных пар между болтом и отверстиями в пластинах, между головкой или гайкой крепежа и внешними поверхностями двух пластин и между соприкасающимися поверхностями двух пластин. Предполагается, что между контактирующими поверхностями возможно проскальзывание. На всех контактных поверхностях использовался закон трения Кулона с коэффициентом трения, равным 0,3. В конечно-элементной модели, используемой в пакете Abaqus, размер зазора между болтом и отверстием был принят равным 0,05 %, а предварительный натяг для всех соединений — 5000 Н. Полагались равными нулю смещения левого конца пластины из сверхпрочного сплава во всех трех направлениях ($U_x = 0$, $U_y = 0$, $U_z = 0$), смещения правого конца композитной пластины в двух направлениях ($U_y = 0$, $U_z = 0$) и углы поворота сечений относительно трех осей ($R_x = 0$, $R_y = 0$ и $R_z = 0$). В направлении x была приложена квазистатическая растягивающая нагрузка.

2. Анализ разрушения пластин, соединенных с помощью болта с потайной головкой. Исследование процесса разрушения выполнено с использованием коммерческого программного обеспечения Abaqus. В модель конечных элементов была встроена пользовательская подпрограмма UMAT, включающая нелинейные определяющие соотношения, а также критерии повреждения и разрушения материала. Сначала строилась конечно-элементная модель исследуемого болтового соединения и задавались механические константы материала, геометрические параметры, граничные условия, начальная нагрузка и

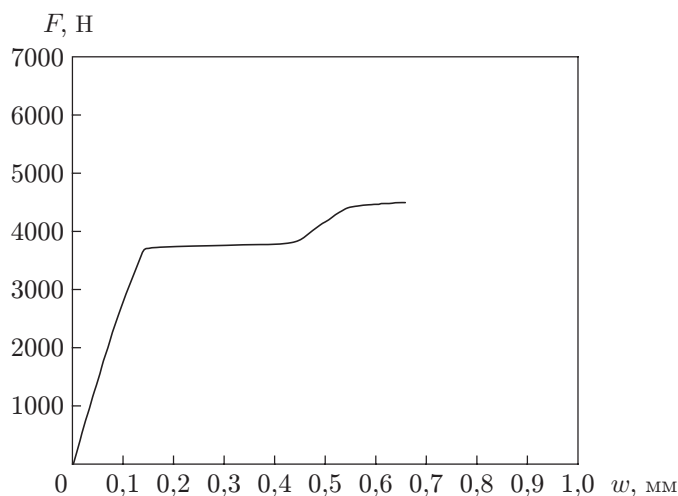


Рис. 2. Зависимость нагрузки от смещения при нагружении пластин из КМК и сверхпрочного сплава, соединенных с помощью болта с потайной головкой диаметром 8 мм и высотой 1,5 мм

шаг по нагрузке. Затем с помощью описанных выше моделей и уравнений вычислялись напряжения в каждом элементе болтового соединения. Для определения момента возникновения разрушения на основе рассчитанных напряжений использовался критерий прочности Цая — Ву. Если при текущей нагрузке разрушения не происходит, то нагрузка увеличивается и вычисляются новые параметры жесткости композитного материала. В случае если происходит полное разрушение конструкции, параметры жесткости материала уменьшаются до значений, равных 1 % их значений для неповрежденного композита C/SiC. Вычисления прекращаются в тех случаях, когда происходит полное разрушение композитной конструкции либо начинает расходиться численный алгоритм. Более подробно предложенный метод вычисления процесса разрушения описан в работах [10, 11].

3. Результаты исследования и их обсуждение. На рис. 2 приведена зависимость нагрузки F от смещения w при нагружении пластин из КМК и сверхпрочного сплава, соединенных с помощью болта с потайной головкой высотой $h = 1,5$ мм и диаметром $D = 8$ мм. Болт установлен с зазором, размер которого равен 0,05 %, предварительное натяжение составляет 5000 Н.

На начальной стадии нагружения зависимость нагрузки от смещения является линейной и угол наклона кривой соответствует начальной жесткости конструкции. При нагрузке, превышающей 3209 Н, в элементах, находящихся в окрестности края отверстия, появляются повреждения, при этом происходит медленное увеличение несущей способности болтового соединения. Повреждение развивается до тех пор, пока максимальное напряжение не достигнет значения, равного 4405 Н. Затем происходит резкое уменьшение несущей способности конструкции.

Выполнено параметрическое исследование влияния размеров головки болта на поведение болтового соединения при растяжении. На рис. 3 приведена зависимость нагрузки от смещения для пластин, соединенных внахлест, при различных значениях высоты и диаметра головки болта.

Из анализа зависимостей, приведенных на рис. 3, следует, что если высота головки болта изменяется в диапазоне $h = 1,5 \div 2,5$ мм, то при всех рассмотренных значениях диаметра головки жесткость соединения практически одна и та же. Однако нагрузка, при которой происходит разрушение соединения, существенно зависит от геометрических

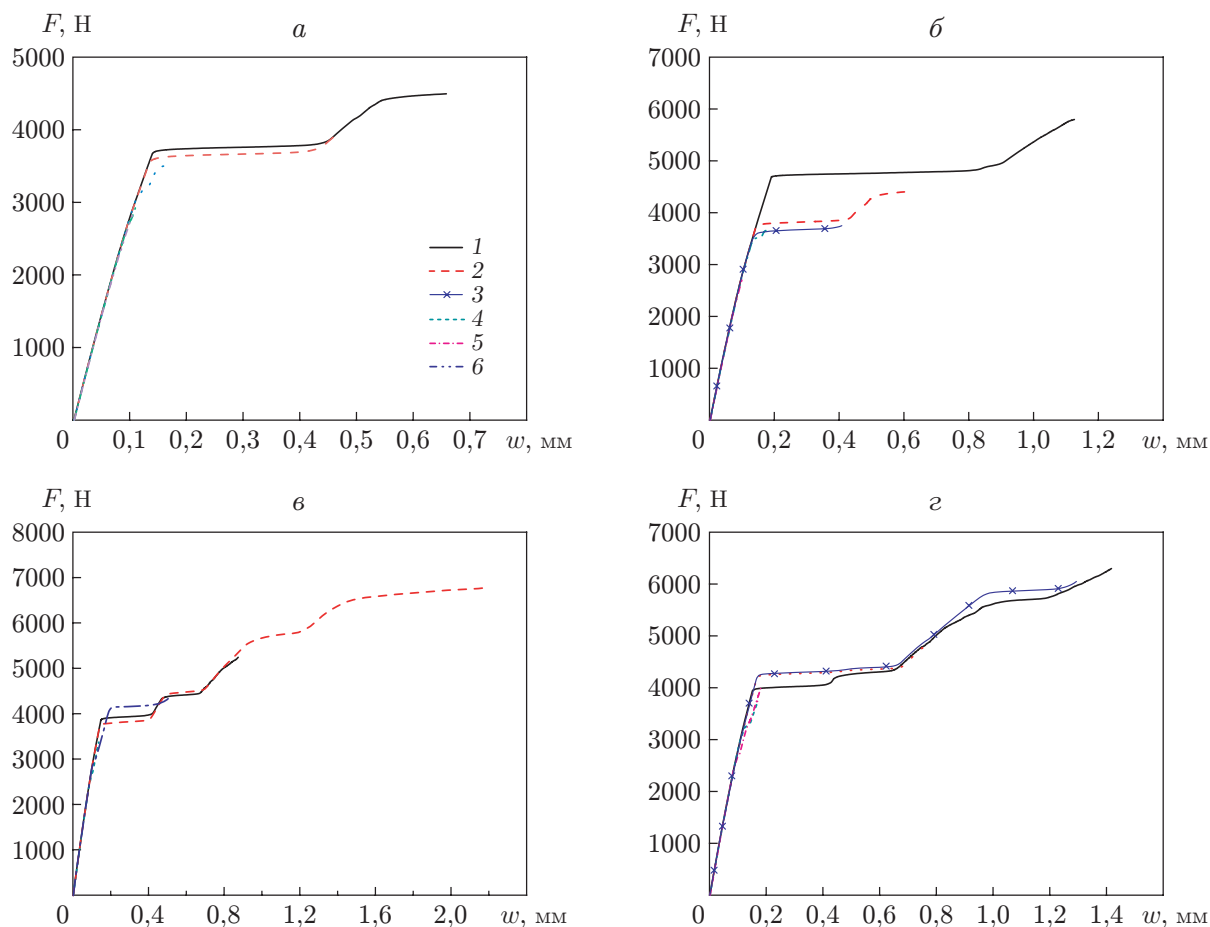


Рис. 3. Зависимость нагрузки от смещения для пластин из КМК и сверхпрочного сплава, соединенных с помощью болта с потайной головкой с различными высотой и диаметром: *а* — $D = 8,0$ мм, *б* — $D = 8,6$ мм, *в* — $D = 9,4$ мм, *г* — $D = 10,0$ мм; 1 — $h = 1,5$ мм, 2 — $h = 1,7$ мм, 3 — $h = 1,9$ мм, 4 — $h = 2,1$ мм, 5 — $h = 2,3$ мм, 6 — $h = 2,5$ мм

параметров болта с потайной головкой. На рис. 4 показана зависимость нагрузки, при которой происходит разрушение комбинированного соединения, от высоты и диаметра потайной головки болта.

Если диаметр потайной головки равен 8,0 или 8,6 мм, то нагрузка, при которой происходит разрушение комбинированного соединения, быстро уменьшается по мере увеличения высоты головки болта. Если диаметр головки болта составляет 9,4 мм, то нагрузка сначала увеличивается с 5243 до 6782 Н, а затем, при увеличении высоты болта с 1,5 до 2,5 мм, уменьшается до 3374 Н.

В случае соединения с болтом, диаметр потайной головки которого равен 10 мм, с увеличением высоты головки болта происходит уменьшение предельной нагрузки, а затем ее увеличение. Во всех рассмотренных случаях для соединения, выполненного с помощью болта с потайной головкой диаметром 9,4 мм и высотой 1,7 мм, предельная нагрузка достигает максимального значения, равного 6782 Н. На рис. 5 показаны изолинии эффективных напряжений σ_e при нагрузке, при которой происходит разрушение композитной пластины, а также конечные элементы, в которых произошло разрушение материала. В настоящее время существует небольшое количество работ, в которых исследуется влияние высоты потайной головки болта на предельную нагрузку композитов, соединенных внахлест. В ра-

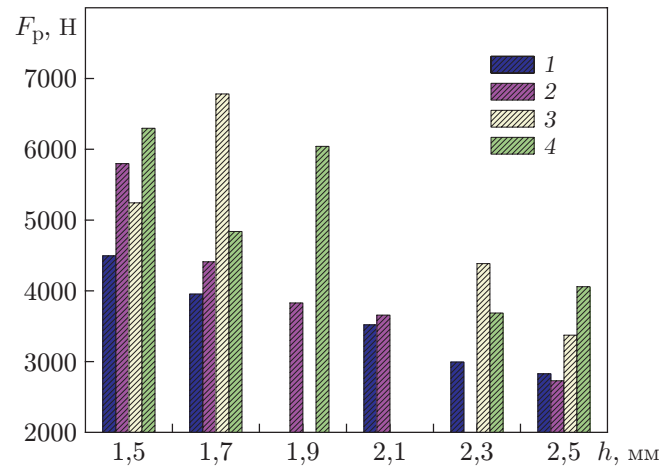


Рис. 4. Зависимость несущей нагрузки F_p комбинированного соединения, выполненного с помощью болта с потайной головкой, от высоты головки при различных значениях ее диаметра:

1 — $D = 8,0$ мм, 2 — $D = 8,6$ мм, 3 — $D = 9,4$ мм, 4 — $D = 10,0$ мм

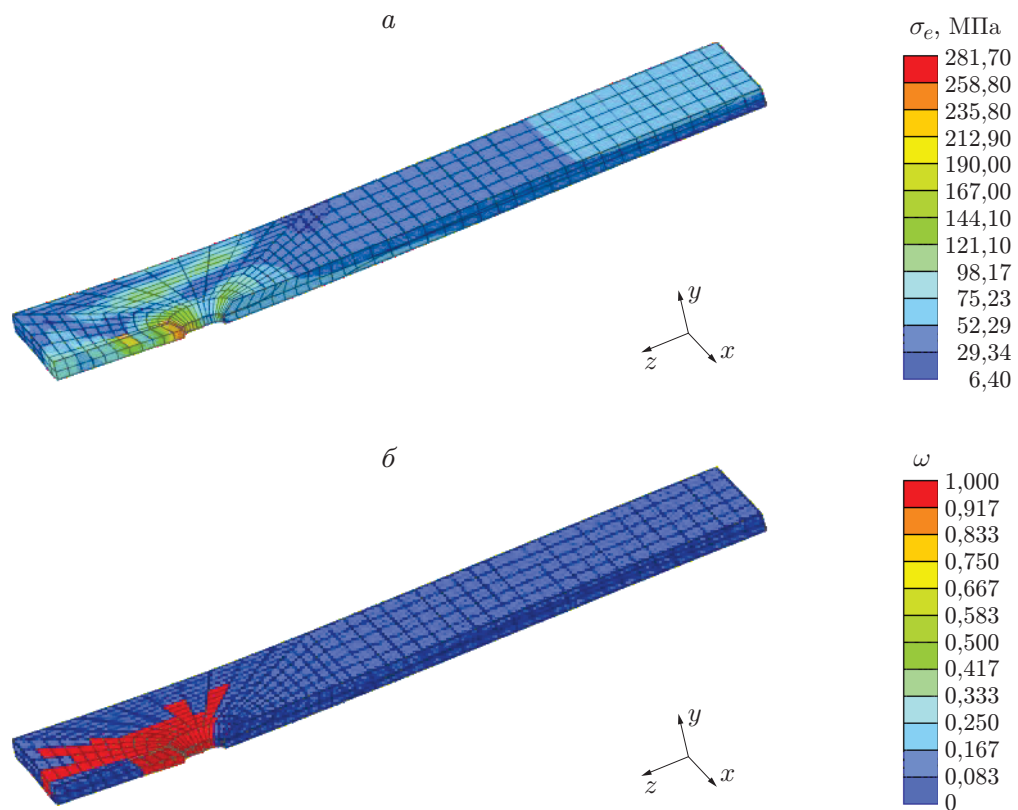


Рис. 5. Изолинии эффективных напряжений σ_e (а) и параметра повреждения материала ω (б) при разрушении соединения пластин из КМК и сверхпрочного сплава, выполненного с помощью болта с потайной головкой ($D = 9,4$ мм, $h = 1,7$ мм)

ботах [5, 6, 13] приводятся некоторые данные о влиянии высоты потайной головки болта на предельную нагрузку. В болтовом соединении пластин из КМК и сверхпрочного сплава на цилиндрическую часть головки болта приходится основная часть нагрузки при растяжении. В окрестности меньшей прямой кромки возникает больший эксцентриситет нагрузки, поскольку на эту область приходится большая часть нагрузки [5, 6]. С увеличением высоты потайной головки болта, с одной стороны, увеличивается начальная концентрация напряжений, что приводит к усложнению распределения напряжений в окрестности отверстия в пластине из композитного материала, с другой — улучшается форма поперечного сечения крепежа, вследствие чего уменьшается напряжение, вызванное растяжением.

Заключение. В работе с использованием программного обеспечения Abaqus построена модель разрушения при одноосном растяжении пластин из КМК и сверхпрочного сплава, соединенных внахлест с помощью болта с потайной головкой. На основе разработанной модели проведено параметрическое исследование влияния параметров болта с потайной головкой на прочность соединения. Установлено, что при изменении высоты головки болта в диапазоне $1,5 \div 2,5$ мм жесткость болтового соединения практически не меняется. С увеличением высоты головки болта увеличивается начальная концентрация напряжений в окрестности кромки отверстия в пластине из композитного материала. При значениях диаметра и высоты головки болта, равных 9,4 и 1,5 мм соответственно, соединение имеет максимальную несущую способность, равную 6782 Н. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании болтового соединения керамических матричных композитов в летательных аппаратах.

ЛИТЕРАТУРА

1. McCarthy C. T., McCarthy M. Three-dimensional finite element analysis of single-bolt, single-lap composite bolted joints. Pt 2. Effects of bolt-hole clearance // Composite Structures. 2005. V. 71. P. 159–175.
2. McCarthy M., McCarthy C. T., Lawlor V. P., Stanley W. F. Three-dimensional finite element analysis of single-bolt, single-lap composite bolted joints. Pt 1. Model development and validation // Composite Structures. 2005. V. 71. P. 140–158.
3. Egan B., McCarthy C. T., McCarthy M., et al. Stress analysis of single-bolt, single-lap, countersunk composite joints with variable bolt-hole clearance // Composite Structures. 2012. V. 94. P. 1038–1051.
4. Qin T., Zhao L., Zhang J. Fastener effects on mechanical behaviors of double-lap composite joints // Composite Structures. 2013. V. 100. P. 413–423.
5. Chishti M., Wang Ch. H., Thomson R. S., et al. Numerical analysis of damage progression and strength of countersunk composite joints // Composite Structures. 2012. V. 94. P. 643–653.
6. Chishti M., Wang Ch. H., Thomson R. S., et al. Experimental investigation of damage progression and strength of countersunk composite joints // Composite Structures. 2012. V. 94. P. 865–873.
7. Li G., Wu X., Zhang Ch., et al. Theoretical simulation and experimental verification of C/SiC joints with pins or bolts // Materials Design. 2014. V. 53. P. 1071–1076.
8. Zhao L., Yang W., Cao T., et al. A progressive failure analysis of all-C/SiC composite multi-bolt joints // Composite Structures. 2018. V. 202. P. 1059–1068.
9. Mei H., Cheng L. F., Ke Q. Q., Zhang L. T. High-temperature tensile properties and oxidation behavior of carbon fiber reinforced silicon carbide bolts in a simulated re-entry environment // Carbon. 2010. V. 48. P. 3007–3013.

10. **Lv Ch., Zhao Sh., Li Z., et al.** Bolt design of ceramic matrix composite and superalloy bolted joint based on damage failure load // J. Harbin Inst. Technol. (New series). 2021. V. 28, iss. 2. P. 55–61.
11. **Zhao Sh., Dong J., Lv Ch., et al.** Thermal mismatch effect and high-temperature tensile performance simulation of hybrid CMC and superalloy bolted joint by progressive damage analysis // Intern. J. Aerospace Engng. 2020. V. 2020. 8739638.
12. **Li J.** Research on the nonlinear constitutive relationship of 2D C/SiC composites. Sian: Northwestern Polytech. Univ., 2014.
13. **Garrett R. A.** Effect of manufacturing defects and service-induced damage on the strength of aircraft composite structures // Proc. of the 7th conf. "Composite materials: testing and design", Philadelphia (USA), 1984. S. 1.: ASTM Intern., 1986. P. 5–33.

*Поступила в редакцию 6/X 2020 г.,
после доработки — 6/X 2020 г.
Принята к публикации 30/XI 2020 г.*
