

ПОВЫШЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ НАХЛЕСТОЧНЫХ КЛЕЕМЕХАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ, АРМИРОВАННЫХ САМОНАРЕЗАЮЩИМИ ВИНТАМИ

А.А. Шакиров, Р.Г. Халилова, С.Б. Сапожников

Рассмотрен метод повышения жесткости нахлесточных клеємеханических соединений стеклопластика и металла с использованием армирования в трансверсальном направлении самонарезающими винтами. Суть метода – заполнение зазоров между резьбовым элементом и стенкой отверстия полимером (эпоксидной смолой холодного отверждения). Это приводит к залечиванию микротрещин, возникающих в композитном материале после вворачивания самонарезающего винта и увеличению эффективной площади контакта винтов и соединяемых деталей.

Стеклопластик исследуемых образцов соединений получен методом контактного формования на основе полиэфирной смолы и стекломата плотностью 300 г/м², стальные пластины – из горячекатаного листа марки СтЗпс. Клеевой слой толщиной 3 мм – полиуретановый конструкционный клей-герметик. Армирующие трансверсальные элементы – стальные самонарезающие винты диаметром 2,5 мм.

Испытания на циклическое растяжение-сжатие в продольном направлении проведены для 15 исходных и 15 модифицированных образцов (по 5 на каждом из 3 уровней нагрузки: 500, 600 и 700 Н).

Условием достижения предельного состояния было принято: для исходных образцов – увеличение их податливости на 30 % по сравнению с начальным состоянием; для модифицированных образцов – достижение той же податливости, что у исходных образцов.

Результаты испытаний показали, что в среднем модифицированные образцы демонстрируют на 35 % большую эквивалентную жесткость (отношение размаха нагрузки к размаху петли гистерезиса диаграммы испытаний), чем необработанные. При этом для обоих типов образцов темпы снижения жесткости соединения монотонно уменьшаются, оценки показывают, что стабилизация процесса деформирования образцов возможна после нескольких сотен циклов.

Ключевые слова: нахлесточное клеємеханическое соединение, композит, самонарезающий винт, кинетика циклического деформирования, залечивание микроповреждений.

Введение

В современном транспортном машиностроении существуют решения, позволяющие существенно снизить массу всей конструкции за счет использования в составе кузова силовой обшивки из композитных сэндвич-панелей [1]. Ввиду существенного различия в жесткости панели с обшивками из стеклопластика в стальном каркасе воспринимают в основном лишь сдвиговую часть нагрузок каркаса.

Тенденции к унификации технологий в машиностроении требуют, по аналогии с элементами остекления, использования вклеивания композитных сэндвич-панелей в каркас с использованием низко модульного полиуретанового клея, способного заполнять зазоры, образующиеся из-за допусков на геометрию сопрягаемых крупногабаритных деталей. Получаемые таким образом соединения можно отнести к группе односторонних нахлесточных (single-lap).

Клеевые нахлесточные соединения обладают рядом особенностей, обусловленных геометрией и технологией их изготовления:

– при сдвиге в клеевом слое возникают существенные по величине отрывные напряжения (peel stress) [2];

– в условиях промышленного производства качество обработки поверхности склеиваемых изделий зависит от ряда факторов и в большинстве случаев не является постоянным [3, 4].

Данные особенности сказываются на качестве и стабильности прочностных характеристик клеевых соединений и требуют дальнейшей проработки методов их улучшения, которые нашли

себя, прежде всего, в разработке гибридных клеемеханических соединений [4] (клееболтовых, клеезаклепочных и клеештифтовых). Их основным отличием от чисто клеевых аналогов является присутствие дополнительных элементов в трансверсальном (перпендикулярном к плоскости соединения) направлении, которые могут воспринимать как сдвиговые, так и отрывные усилия.

Традиционно в роли армирующих элементов выступают:

- цилиндрические металлические элементы (z-pin) диаметром менее 2,5 мм [5–7];
- резьбовые металлические элементы, заклепки диаметром более 4,5 мм [8–11].

Перспективной является возможность применения армирующих (усиливающих) элементов, сочетающих в себе преимущества первой и второй групп – металлических резьбовых элементов (самонарезающих винтов, self-tapped screws) малого диаметра (2,5 мм).

В инженерной практике самонарезающие винты не рекомендуются к применению в высоконагруженных соединениях композитов [4, 12, 13]. В первую очередь, это обусловлено локальным разрушением (эрозией) пластика в зоне отверстий, которое происходит за счет малой пластичности полимерной матрицы и возникновения дефектов при сверлении отверстия и монтаже армирующего элемента. В случае применения самонарезающих винтов в соединении металлических изделий разрабатываются методы повышения их прочности и жесткости [14].

В данной работе представлен метод повышения жесткости нахлесточных соединений композитов и металла, армированных самонарезающими винтами малого диаметра, который заключается в заполнении отверстий под армирующие элементы полимерной композицией, которая после отверждения выравнивает поля напряжений в зонах контакта.

Объект исследования

Нахлесточное клеемеханическое соединение показано на рис. 1, а. Соединяемые композитные элементы изготовлены из хаотически армированного стеклопластика, полученного методом контактного формования на основе полиэфирной смолы и стекломата плотностью 300 г/м², стальные части – из горячекатаного листа марки Ст3пс. Клей – полиуретановый конструкционный клей-герметик марки Sikaflex-265, требующий предварительной подготовки поверхностей по рекомендации производителя [15]. Армирующие трансверсальные элементы – стальные самонарезающие винты диаметром 2,5 мм [16]. Для их монтажа выполняются сквозные отверстия. Изготовлены два варианта образцов: исходный и модифицированный.

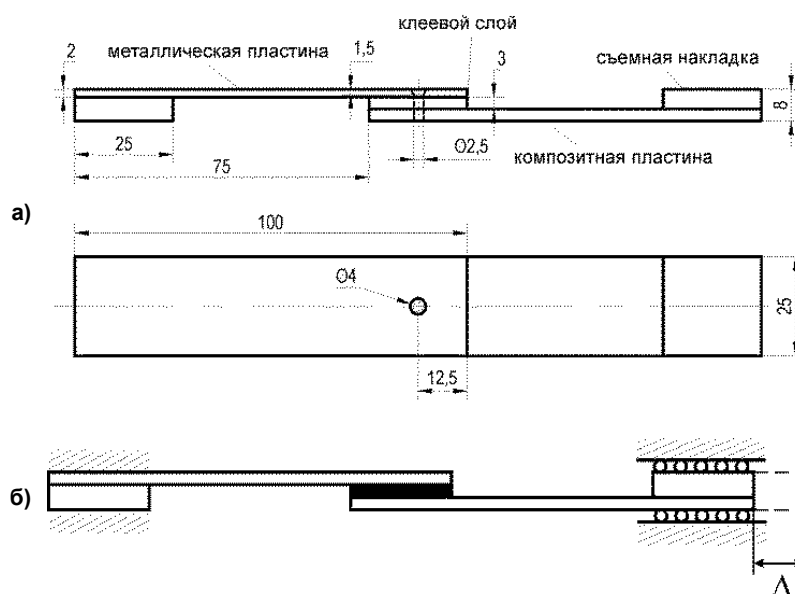


Рис. 1. Образец для испытаний на циклическую прочность: а – схема образца; б – схема нагружения образца

Монтаж армирующих элементов в исходном варианте был следующим: в готовом клеевом соединении сверлили технологическое отверстие диаметром 2,0 мм, в которое вворачивали армирующий элемент. Монтаж армирующих элементов в модифицированном варианте отличался

Расчет и конструирование

тем, что винты предварительно погружали в жидкую эпоксидно-диановую клеевую композицию на основе смолы ЭД-20 (100 в.ч.) и отвердителя ПЭПА (10 в.ч.) и вворачивали в технологическое отверстие; клеевую композицию отверждали далее по типовому температурному режиму (выдержка при комнатной температуре 24 ч, постотверждение в сушильном шкафу при температуре 80 °С 4 ч, охлаждение со шкафом). Образцы изготовлены на базе научно-образовательного центра «Композитные материалы и конструкции» ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ).

Экспериментальная часть

Испытания на циклическое растяжение-сжатие образцов нахлесточных соединений проведены на универсальной испытательной машине INSTRON 5882. Скорость движения траверсы 10 мм/мин, температура окружающей среды 23 ± 1 °С.

Испытания проведены на 15 исходных и 15 модифицированных образцах (по 5 на каждом из 3 уровней нагрузки: 500, 600 и 700 Н).

Приняты следующие условия достижения предельного состояния: для исходных образцов – увеличение их податливости на 30 % по сравнению с начальным состоянием; для модифицированных образцов – достижение той же податливости, что у исходных образцов.

Примеры типовых циклических диаграмм деформирования исходного и модифицированного образцов представлены на рис. 2.

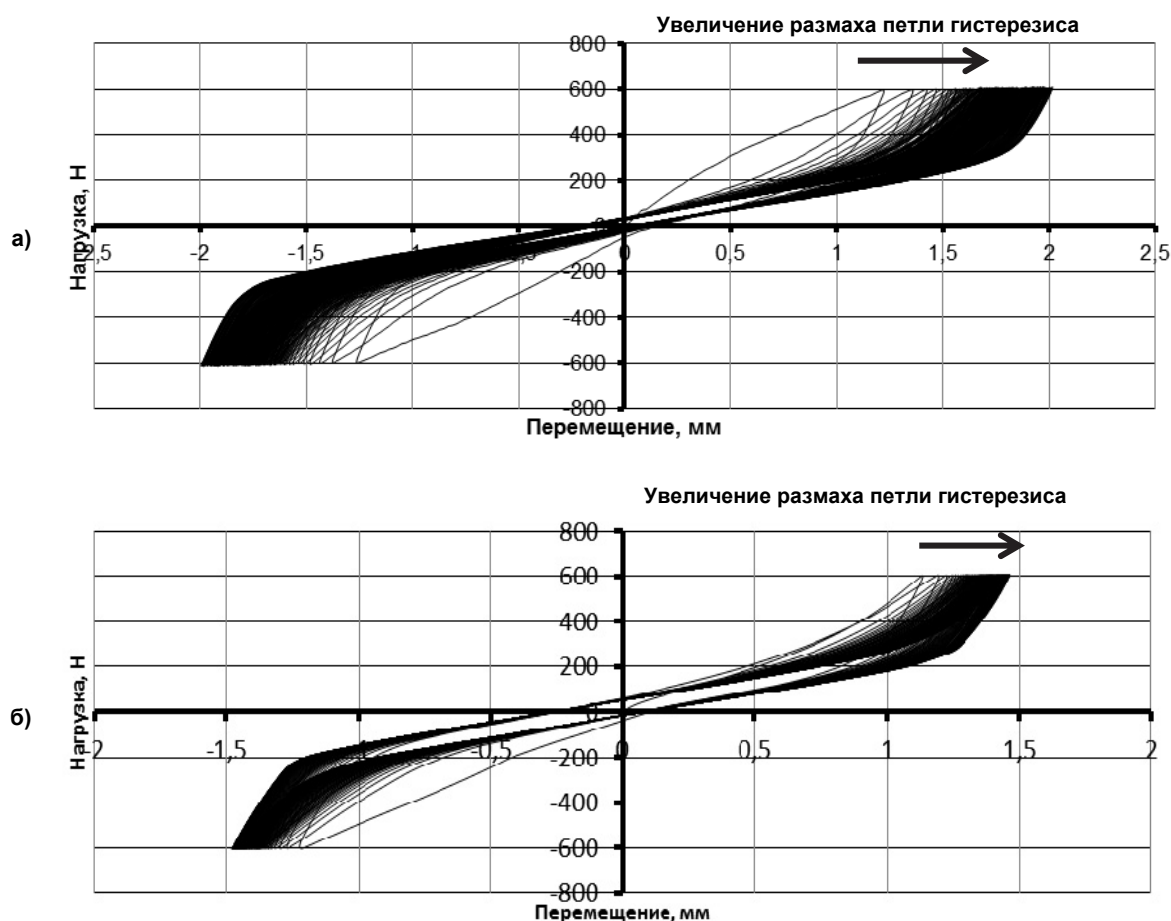


Рис. 2. Диаграмма циклических испытаний при максимальной нагрузке 600 Н: а – образец модифицированного соединения; б – образец исходного соединения

Анализ результатов

На рис. 3 показана картина повреждений в стеклопластике, образовавшихся в результате сверления технологического отверстия и монтажа армирующего элемента. Как видно из рисунка, основным механизмом повреждения стеклопластика при монтаже армирующих элементов является расслоение, образующееся в результате процесса создания резьбы. Для снижения уровня

начальных повреждений был выбран диаметр технологических отверстий 2 мм (при диаметре самих армирующих элементов – 2,5 мм).

Состояние отверстий образцов до и после обработки показано на рис. 4.
Результаты испытаний образцов представлены в таблице.

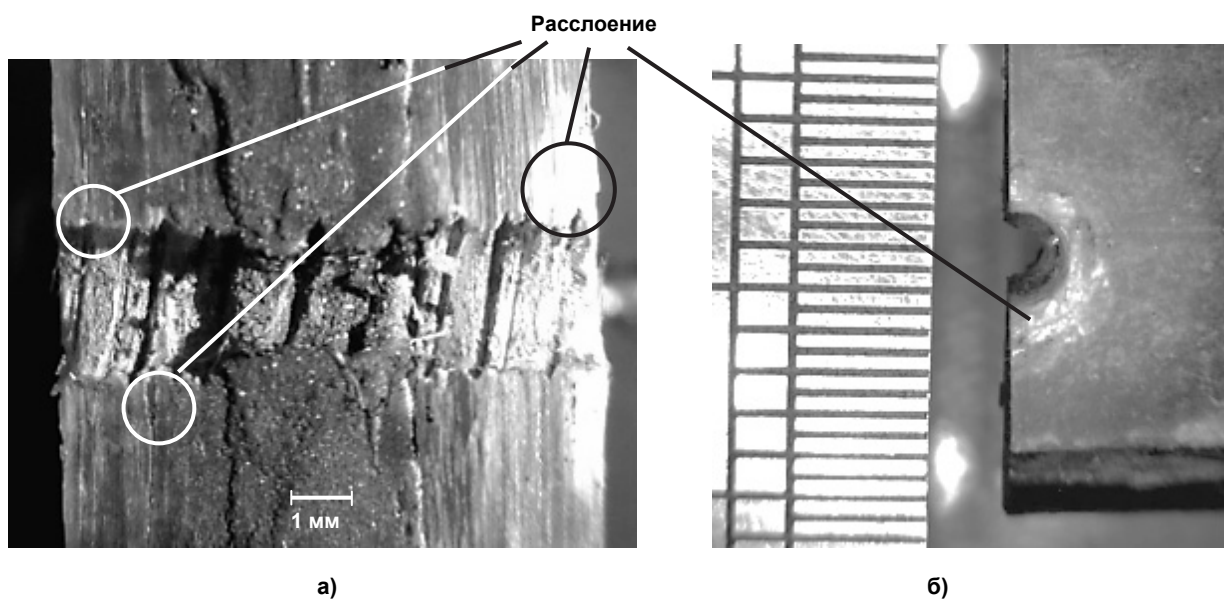


Рис. 3. Повреждения в стеклопластике в результате сверления отверстия и монтажа армирующего элемента:
а – поперечный разрез; б – вид сверху

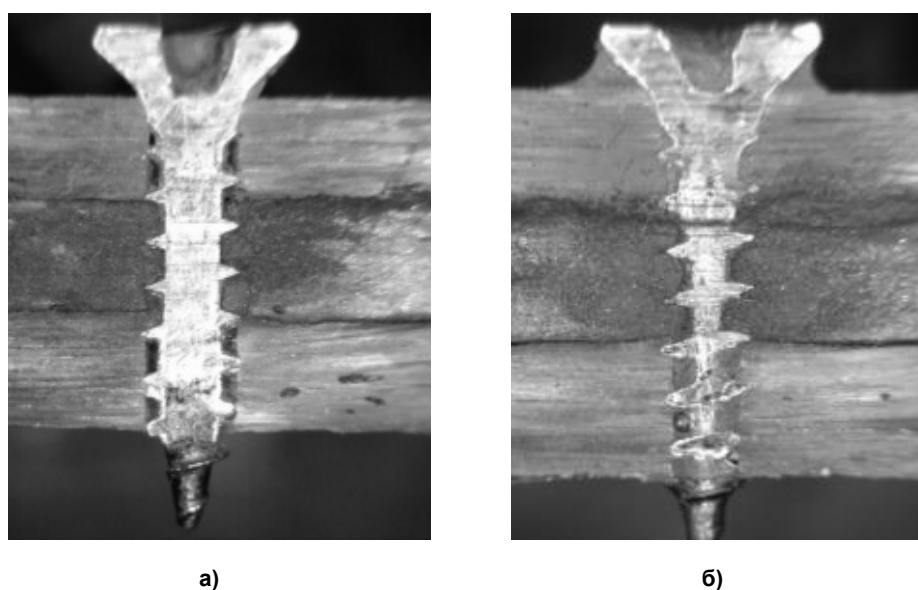


Рис. 4. Поперечный разрез образца нахлесточного соединения с армирующим элементом:
а – исходный; б – модифицированный

Результаты испытаний образцов нахлесточных соединений

Уровень нагрузки, Н	500	600	700
Выборочное среднее количество циклов до достижения предельного состояния модифицированных образцов	116	106	103
Прирост выборочного среднего количества циклов по сравнению с исходными образцами, %	28	26	18

Расчет и конструирование

В результате обработки эпоксидная композиция проникает в пустоты и расслоения, образующиеся при монтаже армирующего элемента, создавая монолитное соединение с увеличенной площадью взаимодействия элемента и соединяемых материалов.

В среднем, модифицированные образцы демонстрируют на 20 % большее количество циклов до достижения предельного состояния и на 15 % меньшую дисперсию результатов, чем необработанные.

Диаграммы испытаний образцов имеют значительную нелинейность, связанную с тремя основными этапами работы клеемеханического соединения (см. рис. 2):

- наличие значительных зазоров между самонарезающим винтом и стенками отверстия (на жесткость соединения влияет в основном клеевой слой);
- выборка зазоров между самонарезающим винтом и стенками отверстия (на жесткость соединения влияют и самонарезающий винт, и клеевой слой);
- взаимодействие самонарезающего винта и стенок отверстия (на жесткость соединения влияет в основном самонарезающий винт).

Для определения эквивалентной жесткости образцов использовалось отношение размаха нагрузки к размаху петли гистерезиса диаграммы испытаний (пример диаграммы на рис. 2). История изменения выборочной средней эквивалентной жесткости для модифицированных и исходных образцов при уровне нагрузки 600 Н показана на рис. 5. Из рисунка видно, что резкое снижение жесткости за счет роста локальных деформаций и области расслоения происходит в первые 20–30 циклов, далее темпы разупрочнения снижаются. Экспоненциальные аппроксимации позволяют оценить число циклов нагружения до стабилизации жесткости упрочненного нахлесточного соединения в несколько сотен.

Выводы

Экспериментальное исследование нахлесточных образцов клеемеханических соединений показало эффективность предложенного метода увеличения их жесткости при циклическом нагружении. Обработка отверстий эпоксидной композицией в процессе монтажа самонарезающих винтов приводит к снижению уровня остаточных повреждений в стеклопластике, увеличению эффективной площади взаимодействия винта и стенок отверстия для него. Эффективность данного метода может быть увеличена путем зенковки отверстий в стеклопластике под армирующие элементы, приводящей к дополнительному увеличению площади взаимодействия армирующего элемента и стеклопластика, а также к уменьшению объема повреждений в результате создания резьбы.

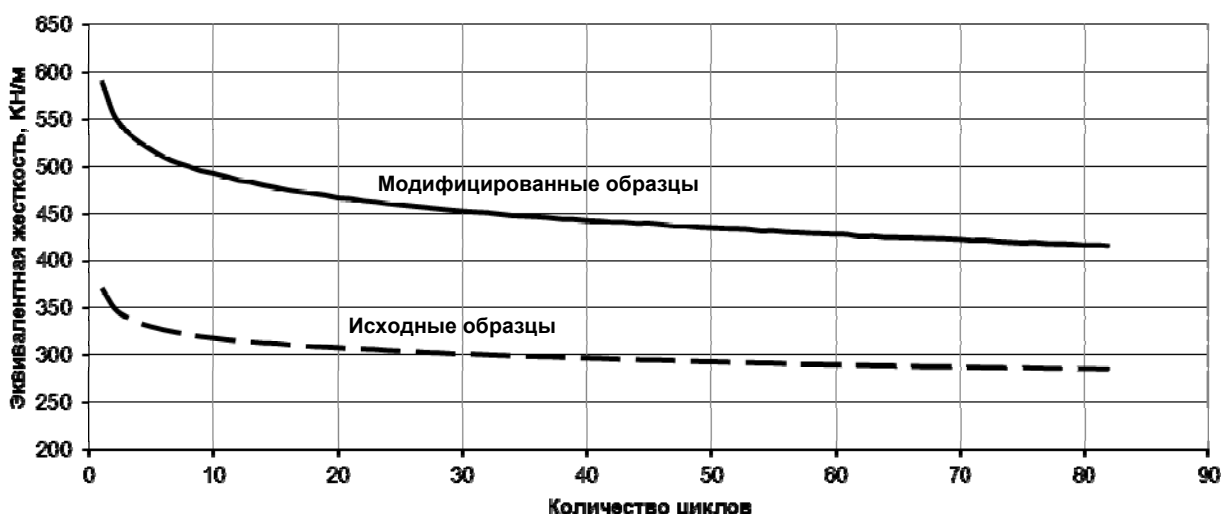


Рис. 5. История изменения эквивалентной жесткости образцов при циклическом нагружении для уровня нагрузки 600 Н

Выявлена существенная нелинейность диаграммы деформирования соединений, обусловленная наличием зазоров между самонарезающим винтом и стенкой отверстия. Темпы снижения

жесткости соединения монотонно уменьшаются, оценки показывают, что стабилизация процесса деформирования образцов возможна после нескольких сотен циклов.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства модельного ряда инновационных энергосберегающих трамвайных вагонов модульной конструкции для развития городских пассажирских транспортных систем» по договору № 02.G25.31.0108 от 14.08.2014 г.

Литература / References

1. Vaidya U. Composites for Automotive, Truck and Mass Transit: Materials, Design, Manufacturing. USA, DEStech Publ. Inc., Lancaster, 2010. 433 p.
2. Tong L., Steven G.P. Analysis and Design of Structural Bonded Joints. Kluwer Academic Publishers Group, 2006. 288 p.
3. Matsuzaki R., Shibata M., Todoroki A. Reinforcing an Aluminum / GFRP Co-Cured Single Lap Joint Using Inter-Adherend Fiber. *Composites: Part A*, 39, 2008, pp. 786–795.
4. Heslehurst R. Design and Analysis of Structural Joints with Composite Materials. USA, DEStech Publications, 2013. 464 p.
5. Son H.-G., Park Y.-B., Kweon J.-H., Choi J.-H. Fatigue Behaviour of Metal Pin-Reinforced Composite Single-Lap Joints in a Hygrothermal Environment. *J. Composite structures*, 2014, № 108, pp. 151–160.
6. Grassi M., Cox B., Zhang X. Simulation of Pin-Reinforced Single-Lap Composite Joints. *J. Composites Science and Technology*, 2006, № 66, pp. 1623–1638.
7. Heimbs S., Nogueira A.C., Hombergsmeier E., May M., Wolfrum J. Failure Behaviour of Composite T-Joints with Novel Metallic Arrow-Pin Reinforcement. *J. Composite Structures*, 2014, № 110, pp. 16–28.
8. Kelly G. Quasi-Static Strength and Fatigue Life of Hybrid (Bonded/Bolted) Composite Single-Lap Joints. *J. Composite Structures*, 2006, № 72, pp. 119–129.
9. Barut A., Madenci E. Analysis of Bolted-Bonded Composite Single-Lap Joints under Combined in-Plane and Transverse Loading. *J. Composite Structures*, 2009, № 88, pp. 579–594.
10. Hai N.D., Mutsuyoshi H. Structural Behavior of Double-Lap Joints of Steel Splice Plates Bolted/Bonded to Pultruded Hybrid CFRP/GFRP Laminates. *J. Construction and Building Materials*, 2012, № 30, pp. 347–359.
11. DiFranco G., Fratini L., Pasta A. Analysis of the Mechanical Performance of Hybrid (SPR/Bonded) Single-Lap Joints Between CFRP Panels and Aluminum Blanks. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2013, № 41, pp. 24–32.
12. Mossalam Ayman S. Design Guide for FRP Composite Connections. Reston VA, American Society of Civil Engineers, 2011. 601 p.
13. Hollaway L.C. Polymers and Polymer Composites in Construction. London, T. Telford, 1990. 275 p.
14. Гузеев В.И., Шаламов П.В. Прочность резьбового соединения на срез в отверстиях с отбортовками, образованных вращающимся пуансоном в тонколистовых заготовках. Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2012. № 19. С. 209–213. [Guzeev V.I., Shalamov P.V. (Strength of the Connecting Thread in the Flange Holes Made by Rotating Tool in Thin Sheet Workpiece). *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2012, no. 19. pp. 209–213. (in Russ.)]
15. Sikaflex® -265 DG-3. Техническое описание продукта. М., ООО «Зика», 2009. Версия 2. 2 с. [Sikaflex® -265 DG-3. *Tekhnicheskoe Opisanie Produkta* (Technical Product Description). Moscow, Zika Publ., 2009, versiya 2, 2 p.]
16. Шуруп-саморез универсальный UK. <http://metall.nk-grouppltd.ru/SHURUP-SAMOREZ-UNIVERSALNIJ-UK.html>. [Shurup-Samorez Universal'nyy UK. (Self-Tapping Universal UK). Available at: <http://metall.nk-grouppltd.ru/SHURUP-SAMOREZ-UNIVERSALNIJ-UK.html>.]

Шакиров Александр Александрович. Аспирант кафедры «Прикладная механика, динамика и прочность машин», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), shakirov.cmi@gmail.com.

Халилова Рамзиля Газимовна. Студент кафедры «Прикладная механика, динамика и прочность машин», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), KhalilovaRG@gmail.com.

Сапожников Сергей Борисович. Доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная механика, динамика и прочность машин», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), SSB@susu.ac.ru.

Поступила в редакцию 31 октября 2014 г.

**Bulletin of the South Ural State University
Series "Mechanical Engineering Industry"
2014, vol. 14, no. 4, pp. 30–36**

STIFFENING OF SINGLE-LAP HYBRID JOINTS REINFORCED WITH SELF-TAPPED SCREWS

A.A. Shakirov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, shakirov.cmi@gmail.com,

R.G. Khalilova, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, KhalilovaRG@gmail.com,

S.B. Sapozhnikov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, SSB@susu.ac.ru

The paper discusses the method of stiffening of single-lap hybrid joints of glass-fiber reinforced plastic and metal adherents with transversal reinforcement by self-tapped screws. The method uses a filling of gaps between screw and hole-wall by room-hardened epoxy resin. The healing results to stiffening of joint due to the growing of element-adherent interaction area and the reduction of residual damages of GFRP, which occurred after a screw mounting process.

Glass-fiber reinforced plastic adherent was made of polyester resin and glass mat with surface density of 300 g/m²; metal adherent was made of hot-rolled sheet of mild steel. Adhesive with thickness of 3 mm is low-modulus polyurethane composition. Steel self-tapped screws with diameter of 2.5 mm were used as reinforce elements.

Cyclic longitudinal tension-compression tests were performed for 15 original and 15 modified specimens (by 5 specimens for each one of 3 loading levels: ±500, ±600 and ±700 N).

The growth of mechanical compliance for more than 30 % in comparing with initial condition was accepted as limit condition for original specimens; for modified specimens this condition formulated as the growth of mechanical compliance up to the level of original specimens.

Modified specimens had equivalent stiffness (the ratio between total amplitudes of load and hysteresis loop of specimen test diagram) higher than non-modified by an average 35 %. Also the both types of specimens demonstrated the slow monotonic stiffness reduction. The estimation of stiffness reduction slope shows that a stabilization of the deformation process will appear after a few hundred cycles.

Keywords: screwed/bonded joint, self-tapped screw, composite, micro damage healing, cyclic kinetics.

Received 31 October 2014