

Особенности разрушения при деформации растяжением клеевого соединения *сталь / сталь*

А.М. Устинов¹, А.А. Клопотов^{1,2}, А.И. Потехаев², С.В. Галсанов²,
Ю.А. Абзаев¹, В.С. Плевков¹

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет
(Томск, Россия)

²Национальный исследовательский Томский государственный университет
(Томск, Россия)

Study of Deformation Distribution in Steel / Steel Adhesive Joint

A.M. Ustinov¹, A.A., Klopotov^{1,2}, A.I. Potekaev², S.V. Galsanov², Yu.A. Abzaev¹,
V.S. Plevkov¹

¹Tomsk State University of Architecture and Building (Tomsk, Russia)

²National Research Tomsk State University (Tomsk, Russia)

Исследовано деформационное поведение в ходе растяжения клеевого соединения *сталь/сталь*. Выявлена временная эволюция изополей деформаций в приповерхностных слоях образцов соединений. Установлена корреляция между стадиями на деформационных кривых и картинами эволюции пространственных структурных элементов, которые на поверхности стальной накладке отражают пространственно-локализованное распределение деформационных полей. Эти деформационные поля ограничены изолиниями, внутри которых деформация имеет одинаковое значение. Выявлено, что на поверхности стальной накладке происходит расслоение на три типа областей: деформируемые области растяжения; деформируемые области сжатия; недеформируемые области.

На стадии, предшествующей разрушению клеевого соединения, установлено предельное значение сдвигового смещения, которое равно 0,0067 мм. При этом показано, что на близких к периферии участках на площадях склеивания начинают расти напряжения в направлении, перпендикулярном площади склеивания. Эти напряжения способствуют возникновению отдирающих усилий. Установлено, что для исследуемого случая характер разрушения клеевого соединения является адгезионным.

Ключевые слова: клеевое соединения, напряженно-деформированное состояние, корреляция цифровых изображений, сталь.

The deformation behavior during the stretching of the steel / steel adhesive joint is investigated. The temporal evolution of deformation isopoles in the near-surface layers of sample compounds is revealed. A correlation is established between the stages on the deformation curves and the evolution patterns of the spatial structural elements, which on the surface of the steel lining reflect the spatially localized distribution of the deformation fields. These deformation fields are bounded by iso-lines, within which the deformation has the same meaning. It was revealed that on the surface of the steel lining, separation occurs into three types of areas: deformable areas of tension; deformable compression areas; non-deformed areas.

At the stage prior to the destruction of the adhesive joint, a limit value of shear displacement was established, which is equal to 0.0067 mm. It has been shown that in areas close to the periphery in the areas of adhesion, stresses begin to grow in a direction perpendicular to the area of adhesion. These stresses contribute to the tearing effort. It has been established that in our case the nature of the destruction of the adhesive joint is adhesive.

Key words: adhesive joint, stress-strain state, digital image correlation, steel.

Введение

В настоящее время существенно расширяется использование конструкций, содержащих клеевые соединения [1, 2]. Это вызвано прежде всего существенным прогрессом в создании синтетических клеев, способствующих тому, что склеивание металлов и других материалов становится очень надежным способом соединения элементов в изделиях и конструкциях. В ряде случаев этот способ может быть единственным практически реализуемым методом соединения. Он обладает рядом преимуществ по сравнению с другими видами соединений: клепаным (заклепочным), сварным, паяным и болтовым. Отметим, что клепаные и болтовые соединения имеют неравномерность распределения напряжений в швах, ослабление отверстиями под заклепками и болтами, а также утяжеляют конструкции [3, 4]. Соединение методом сварки металлов и сплавов приводит к образованию в зоне сварного шва внутренних напряжений, что снижает прочность свариваемых металлов за счет термической обработки [5].

В то же время при клеевых соединениях имеет место более равномерное распределение напряжений в соединяемых материалах. При достижении критических нагрузок происходит разрушение клеевых соединений, которое сопровождается деградацией структуры материала на различных масштабных уровнях, что обуславливает изменение физико-механических свойств [6, 7]. Разрывы межатомных связей на разных стадиях деформирования вызывают накопления повреждений в материале, который является самым

слабым местом в клеевом соединении [3]. В клеевом соединении этим слабым местом является граница сред *клей/сталь*. В области границы происходит деградация структуры, следовательно, свойств материалов [8, 9].

Клеевой слой, соединяющий элементы конструкций, становится таким же конструкционным материалом, применяемым в конструкциях. Он обладает определенными значениями прочностных характеристик. Это выдвигает требования к конструкциям, в которых действующие в клеевом слое напряжения не должны превышать допустимых. Поэтому решение задачи по созданию конструкций с надежным запасом прочности клеевого шва и минимальным весом является актуальными как в практическом, так и теоретическом плане.

Цель данной работы — на мезо- и макромасштабном уровнях исследовать *in situ* методом корреляции цифровых изображений эволюцию полей деформаций при растяжении на поверхности стальных пластин в клеевом соединении *сталь/сталь* и изучить особенности изменения напряжений на границе сред *клей/сталь*.

Материалы и методика исследования

Испытание образцов на растяжение осуществлялось на испытательной машине INSTRON 3386 с постоянной скоростью деформирования $0,0021 \text{ с}^{-1}$. Схема проведения эксперимента представлена на рисунке 1. Захваты испытательной машины обеспечивали надежное фиксирование и центрирование образцов.

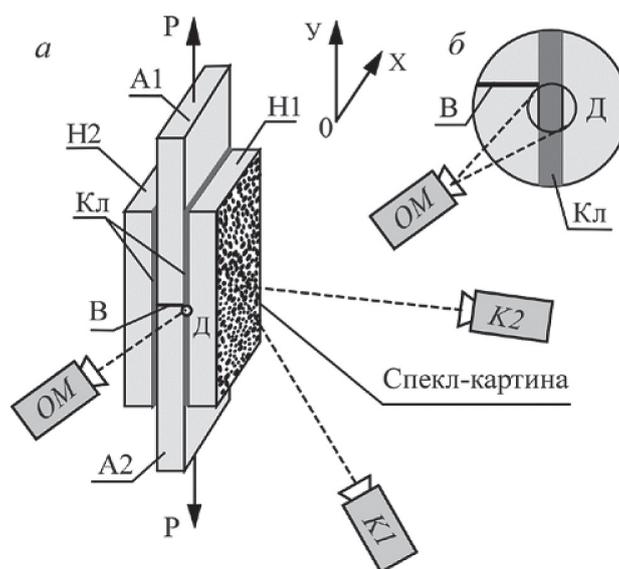


Рис. 1. Схема регистрации изображений со спекл-картины на стальной накладке, приклеенной к двум стальным пластинам, и регистрация распределения деформаций в клеевом слое при помощи оптической микроскопии при деформации растяжением (а): А1 и А2 — стальные пластины; Н1 и Н2 — накладки из стальных пластин; Кл — клеевой слой; В — место стыка двух стальных пластин; Д — место регистрации при помощи оптического микроскопа; ОМ — оптический микроскоп; К1 и К2 — цифровые камеры; Р — прикладываемая нагрузка. Место регистрации распределения деформаций в клеевом слое при помощи оптической микроскопии (б)

Измерения поверхностного деформирования накладки проводили цифровой оптической системой Vic-3D на основе метода корреляции цифровых стереоскопических изображений, в результате определены относительные деформации (ϵ_{xx} — по оси X, ϵ_{yy} — по оси Y, ϵ_{xy} — деформации сдвига) [10]. Распределение полей смещений на поверхности получено в результате объединения изменений в микрообласти. Это достигнуто при помощи спекл-структуры, созданной на поверхности образцов [11, 12]. В процессе испытания при помощи программы VicSnap проведена синхронная запись изображений с двух камер (см. рис. 1), которые затем были обработаны при помощи программы Vic-3D [10–13].

Микрофотографии торца клевого соединения были получены при помощи оптического микроскопа «Техно» с 800-кратным увеличением и матрицей 1,3 Мп. Для обработки цифровых микрофотографий использован модуль Vic-2D, основанный на методе корреляции цифровых изображений.

Тип клевого соединения, на основе которого изготовлены образцы для испытаний, относится к симметричным соединениям внахлестку с двумя накладками (см. рис. 1).

При подготовке образцов клевого соединения руководствовались ГОСТ 14759-69 «Клеи. Методы определения прочности при сдвиге». Захваты испытательной машины не дают возможности испытания несимметричных образцов, поэтому для испытаний были изготовлены образцы клевого соединения встык с двумя

накладками (см. рис. 1). Размеры стыкуемых пластин $4 \times 40 \times 120$ мм, накладок $1,2 \times 40 \times 120$ мм. Длина нахлеста составляет 60 мм. Длина рабочей части образца — 140 мм. В качестве основы для создания образцов взята строительная малоуглеродистая сталь с механическими характеристиками, представленными в [13].

Эпоксидный клей Resin Laminate+ выполнен на основе тиксотропной смеси эпоксидных смол и алифатического отвердителя. Физико-механические характеристики клея приведены в [12].

Склеивание производилось при температуре $23 \pm 2^\circ\text{C}$ и атмосферном давлении. Время полного набора прочности составило пятеро суток.

ГОСТ регламентирует скорость движения зажима в пределах от 10 до 20 мм/мин. Для проведения испытаний с учетом частоты съемки цифровых камер была определена опытным путем оптимальная скорость движения зажимов, равная 18 мм/мин ($0,0021 \text{ c}^{-1}$). В процессе растяжения образца была получена диаграмма «нагрузка — деформации» на базе экс-тензометра, установленного на рабочую часть образца (см. рис. 2).

Результаты и их обсуждение

Экспериментальная деформационная кривая показывает изменение относительной деформации растяжения образца в зависимости от величины нагрузки (см. рис. 2). Измерительная система VIC-3D позволила получить картины, детально отражающие эволюцию распределения изополей относительных деформаций при различной нагрузке (см. рис. 3).

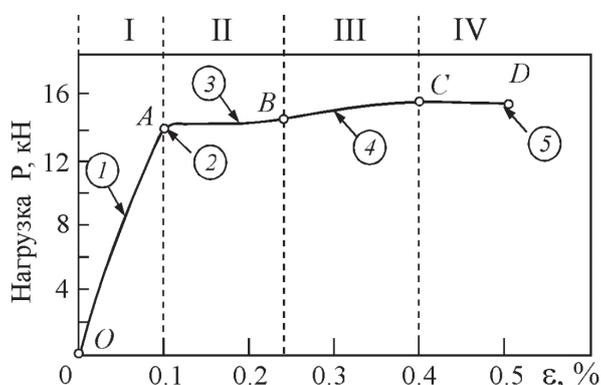


Рис. 2. Диаграмма деформирования. Цифры соответствуют положению на кривой картин деформационных структур (рис. 3). OA — стадия упругой деформации; AB — площадка текучести; BC — стадия пластической деформации; CD — стадия предшествующая разрушению клевого соединения *сталь/сталь*

Закономерности пластической деформации при анализе деформационной кривой (см. рис. 2) при растяжении клевого соединения (см. рис. 1) будем выявлять на основе выделений стадий пластических деформаций. При этом будем анализировать, как распределения деформационных полей на поверхности стальных накладок в клевом соединении *сталь/сталь* влияют на природу стадийности.

На приведенной экспериментальной деформационной кривой можно выделить четыре стадии в зависи-

мости от функциональной зависимости $P=f(\epsilon)$. Стадия I (область OA на рисунке 2) характеризует упругую часть на деформационной кривой. Этот участок заканчивается при нагрузке 14 кН (см. рис. 2). Затем в области точки A упругая стадия сменяется пластической стадией II с коэффициентом деформационного упрочнения $\Theta = \partial P / \partial \epsilon = 0$ (участок AB на деформационной кривой). Затем наблюдается переход к стадии III, на которой происходит незначительное повышение коэффициента деформационного упрочнения $\Theta = \partial P / \partial \epsilon$. Переход в ре-

жим разрушения клеевого соединения *сталь/сталь* характеризуется коэффициентом деформационного упрочнения Θ до нуля (стадии IV, участок CD).

На соответствующих картинах деформаций на поверхности стальной накладки на различных стадиях наблюдается пространственно локализованное распределение деформационных полей. Эти деформационные поля ограничены изолиниями, внутри которых дефор-

мация имеет одинаковое значение (см. рис. 3). Видно, что на поверхности стальной накладки происходит расслоение на три типа областей: деформируемые области растяжения; деформируемые области сжатия; недеформируемые области (см. рис. 3). При этом наблюдается изменение на поверхности пластины конфигураций этих областей, локализованных с ростом приложенного напряжения.

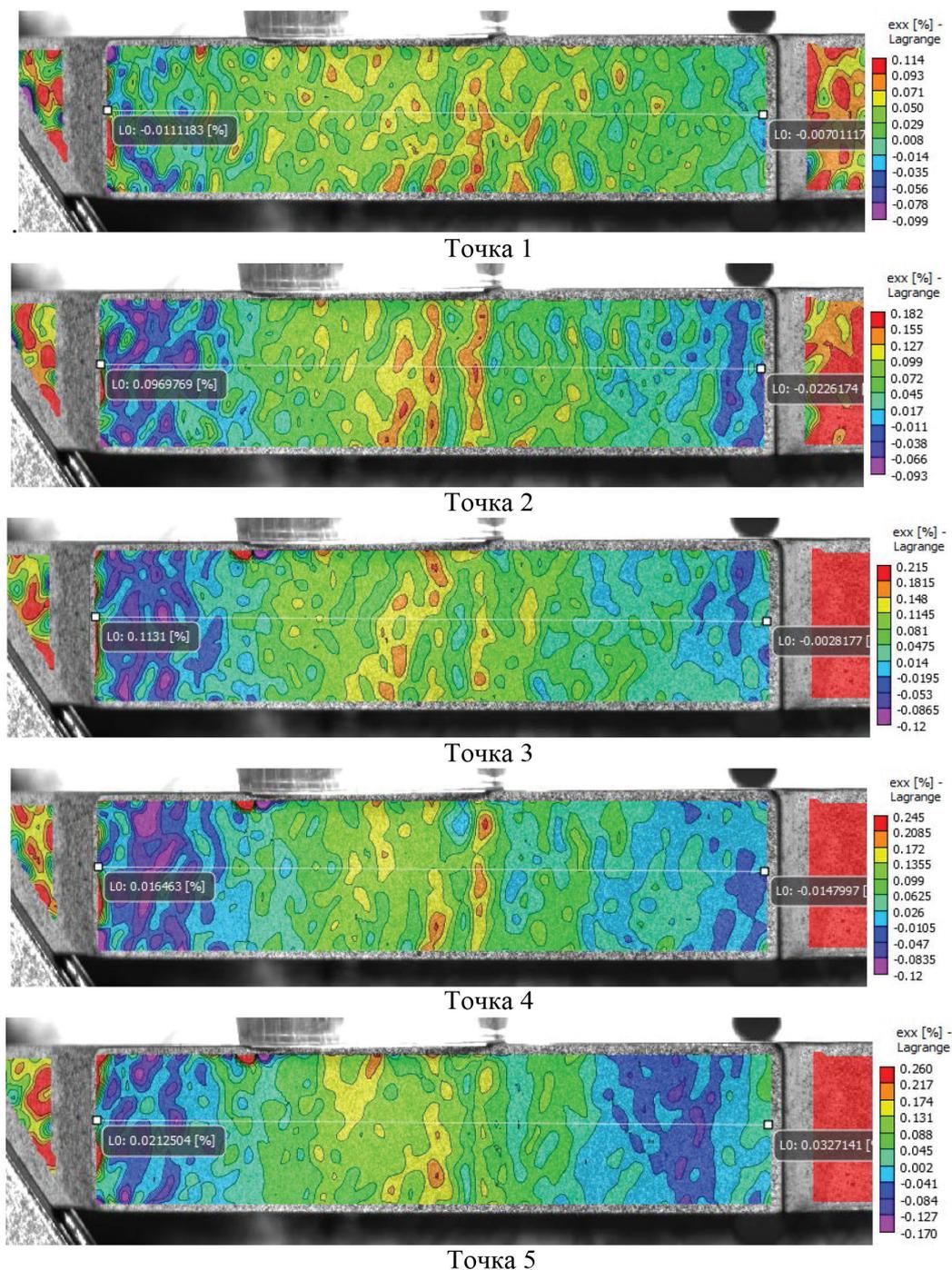


Рис. 3. Картины относительных деформаций по оси X (ϵ_{xx}) рабочей области образца клеевого соединения. Номера показывают на диаграмме на рисунке 2 соответствующие деформационно-напряженные состояния клеевого соединения при испытании

На начальном этапе — упругой стадии деформационной кривой (см. рис. 2, точка 1, стадия I) наблюдается хаотическое распределение локализованных областей деформаций по всей поверхности стальной накладки, за исключением центральной части образца в районе стыка двух стальных пластин под накладкой. В этом месте на поверхностном слое стальной накладки локальные деформируемые области слились в одну протяженную область с положительным значением деформации, перпендикулярную направлению приложенного напряжения.

В конце упругой стадии деформационной кривой (см. рис. 2, точка 2, стадия I) на поверхностном слое в центральной части стальной накладки деформируемый объем расслаивается на слои, которые деформируются с разными положительными значениями (см. рис. 3). Подобная картина в расположении слоистых областей деформации наблюдается на концах стальной накладки, но только с отрицательными значениями деформации.

С ростом приложенной нагрузки наступает переход от упругой стадии к пластической (см. рис. 2, стадия II). Анализ картин распределения деформационных полей, полученных на этом этапе, в поверхностном слое стальной накладки (рис. 3, точка 3) позволил выявить ряд важных закономерностей. При этом происходит следующее:

- трансформация слоистых локализованных областей деформаций на «островковое» распределение;
- увеличение площадей локализованных областей положительных деформаций с более высокими значениями деформаций в них;
- в среднем уменьшение разницы между максимальными и минимальными значениями между де-

формируемыми областями с разными положительными значениями деформации;

- в среднем увеличение разницы между максимальными и минимальными значениями между деформируемыми областями с разными отрицательными значениями на концах стальной пластины-накладки.

Дальнейшее увеличение приложенного напряжения приводит к переходу на следующую пластическую стадию деформации (стадия III). В результате распределение деформационных полей в поверхностном слое стальной накладки происходит образование обширных областей с близкими значениями деформаций в них (см. рис. 3, точка 4). Этот процесс продолжает развиваться дальше с ростом внешнего приложенного напряжения (см. рис. 3, точка 5) и переходит в стадию, предшествующую разрушению клеевого соединения *сталь/сталь* (стадия IV). При этом происходит увеличение отрицательных значений деформаций на фоне значительного роста площадей этих областей и в изменении распределений деформационных полей на концах стальной пластины-накладки клеевого соединения *сталь/сталь*.

Были проведены металлографические исследования в области клеевого шва (см. рис. 1). На рисунке 4 а приведена микрофотография, полученная с поперечного сечения клеевого соединения. Область измерения смещений находится в 2 мм от стыка нагружающих пластин А1 и А2. При общей деформации растяжением $\epsilon_{\text{общ}} = 0,503\%$ клеевого соединения было определено распределение деформации в поперечном сечении образца. Результаты этих измерений представлены на рисунке 4 б.

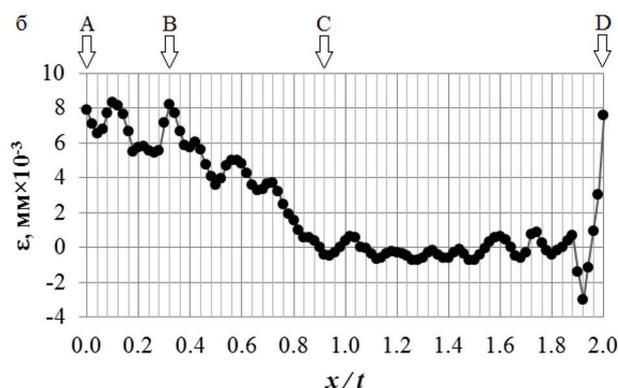
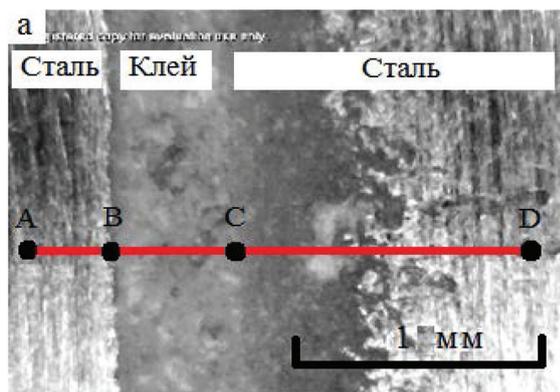


Рис. 4. Микрофотография поперечного сечения клеевого соединения (а); диаграмма распределения абсолютных деформаций по линии ABCD в клеевом шве (б); x — текущее расстояние от точки А до точки D; t — длина линии ABCD, проведенная по толщине образца

В результате обработки экспериментальных данных, полученных методом корреляции цифровых изображений, составлена диаграмма распределения смещений по толщине образца (рис. 4). На этой диаграмме наблюдаются два недеформируемых участка — А-В, С-Д. Недеформируемые участки относятся к стали. Участок В-С относится к клею, в нем сконцентрированы основные смещения, возникающие при деформации клеевого соединения.

руемых участка — А-В, С-Д. Недеформируемые участки относятся к стали. Участок В-С относится к клею, в нем сконцентрированы основные смещения, возникающие при деформации клеевого соединения.

Напряжения сдвига в слое клея для данного типа соединения определяются взаимными смещениями склеиваемых поверхностей стальных пластин и толщиной слоя клея [14]. Для нашего случая толщина клеевого слоя равна 0,51 мм. Экспериментально было определено значение сдвигового смещения в клеевом слое на предшествующей разрушению стадии, которое оказалось равным 0,0067 мм.

Необходимо отметить, что при таком типе клеевого соединения, несмотря на то, что в клее возникают преимущественно напряжения сдвига, на близких к периферии участках площадей склеивания возникают напряжения растяжения в направлении, перпендикулярном площади склеивания, что приводит к возникновению отдирающих усилий [15]. Установлено, что для нашего случая характер разрушения клеевого соединения является адгезионным.

Выводы

В ходе процесса деформирования клеевого соединения *сталь/сталь* на разных стадиях деформационной кривой наблюдается формирование различных распределений деформационных областей. Эволюция распределений деформационных областей проявля-

ется в их перемещении, расслоении и слиянии в зависимости от стадий, которые выявлены на деформационной кривой. Эти деформационные области на поверхности стальной пластины могут рассматриваться как дефекты макроскопического уровня. Эти дефекты отражают взаимодействие стальной пластины накладки клеевого соединения *сталь/сталь* и ответственны за локализацию пластического течения.

На стадии, предшествующей разрушению клеевого соединения, установлено предельное значение сдвигового смещения, которое равно 0,0067 мм. При этом показано, что на близких к периферии участках на площадях склеивания начинают расти напряжения в направлении, перпендикулярном площади склеивания. Эти напряжения способствуют возникновению отдирающих усилий. Установлено, что для нашего случая характер разрушения клеевого соединения является адгезионным.

Таким образом, полученные экспериментальные данные необходимы для уточнения теории прочности клеевого шва, что позволит наиболее полно её использовать при конструировании несущей способности клеевых соединений.

Библиографический список

1. Manalo A., Sirimanna C., Karunasena W., McGarva L., Falzon P. Pre-impregnated Carbon Fibre Reinforced Composite System for Patch Repair of Steel I-beams // *Construction and Building Materials*. 2016. V. 105.
2. Sweedan A.M.I., El-Sawy K.M., Alhadid M.M.A. Interfacial behavior of mechanically anchored FRP laminates for strengthening steel beams // *Journal of Constructional Steel Research*. 2013. V. 80.
3. Аронович Д.А., Варламов В.П., Войтович В.А., Гладких С.Н., Калинчев В.А., Малышева Г.В., Мотовилин Г.В., Чеканов А.Н. Склеивание в машиностроении. М., 2005.
4. Металлические конструкции : в 3 т. Т. 2: Стальные конструкции зданий и сооружений : справочник проектировщика / под общ. ред. В.В. Кузнецова. М., 1998.
5. Лясоцкая В.С. Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов. М., 2003.
6. Colombi P., Bassetti A., Nussbaumer A. Delamination effects on cracked steel members reinforced by prestressed composite patch // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2003. V. 39.
7. Ghafoori E., Aljabar N.J., Zhao X.L., Al-Mahaidi R., Motavalli M., Koay Y.C., Fatigue tests on UHM-CFRP strengthened steel plates with central inclined cracks under different damage levels // *Composite Structures*. 2017. V.160.
8. Lesiuk G., Katkowski M., Duda M., Królicka A., Correia J.A.F.O., De Jesus A.M.P., Rabiega J. Improvement of the fatigue crack growth resistance in long term operated steel strengthened with CFRP patches // *Procedia Structural Integrity*. 2017. V.5.
9. Wang Hai-Tao, Wu G., Dai Yun-Tong, He Xiao-Yuan. Determination of the bond-slip behavior of CFRP-to-steel bonded interfaces using digital image correlation // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2016. V. 35.
10. Ustinov A., Kopanitsa D., Abzaev Yu., Klopotov A., Koshko B., Kopanitsa G. Study of deformations evolution near-surface layers of adhesive joints // *AIP Conference Proceedings*. 2017. N 1800.
11. Третьякова Т.В., Третьяков М.П., Вильдеман В.Э. Оценка точности измерений с использованием видеосистемы анализа полей перемещений и деформаций // *Вестник ПГТУ. Механика*. 2011. № 2.
12. Устинов А.М., Клопотов А.А., Потехаев А.И., Абзаев Ю.А., Плевков В.С. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния поверхностных слоев углепластика при осевом растяжении методом корреляции цифровых изображений // *Известия Алтайского гос. ун-та*. 2018. №1. DOI: 10.14258/izvasu(2018)1-10.
13. Третьяков А.В., Трофимов Г.К., Гурьянова М.К. Механические свойства сталей и сплавов при пластическом деформировании : справочник. М., 1971.
14. Артюхин Ю.П. Напряжения в клеевых соединениях // *Исследования по теории пластин и оболочек*. Вып. 10. Казань, 1973.
15. Кардашов Д. А. Конструкционные клеи. М., 1980.