Комплекс испытаний для определения влияния напряженного состояния на прочность металлополимерных адгезионных соединений / С.В. Смирнов, И.А. Веретенникова, М.В. Мясникова, Д.И. Вичужанин. – DOI: 10.15593/perm.mech/2024.5.08 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2024. – № 5. – С. 91–105.

Perm Polytech Style: Smirnov S.V., Veretennikova I.A., Myasnikova M.V., Vichuzhanin D.I. Tests to Determine the Influence of Stress on the Strength of Metal-Polymer Adhesive Joints. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2024, no. 5, pp. 91-105. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.5.08

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 5, 2024
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2024.5.08
УДК 531.7

КОМПЛЕКС ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ АДГЕЗИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ

С.В. Смирнов, И.А. Веретенникова, М.В. Мясникова, Д.И. Вичужанин

Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 30 сентября 2024 г.
Одобрена: 23 октября 2024 г.
Принята к публикации:
05 ноября 2024 г.

Ключевые слова:

металлополимерные композиты, адгезионные соединения, напряженное состояние, прочность, разрушение, испытания на адгезионную прочность модифицированные образцы Аркана, многослойные образцы, эпоксидная смола, адгезив.

АННОТАЦИЯ

Расширение области использования металлополимерных адгезионных соединений является перспективным направлением создания композиционных материалов, сотовых и слоистых силовых конструкций, сочетающих высокую прочность и малый вес. Для адекватного проектирования металлополимерных соединений с использованием современных систем инженерного анализа необходимо иметь сведения о предельных механических свойствах адгезионных соединений при напряженном состоянии, которое может быть реализовано в проектируемых элементах конструкций в процессе эксплуатации. В статье описаны особенности использования методик проведения и обработки результатов комплекса механических испытаний на растяжение модифицированных образцов Аркана и поперечное сжатие склеенных цилиндрических *BNS*-образцов. Для уменьшения концентрации опасных напряжений на краях образцов предложено формировать выступающий за пределы контактной поверхности дополнительный объем адгезива. Для учета особенностей разрушения слоистых металлополимерных соединений предложено проводить испытания многослойных образцов на трехточечный изгиб с одновременной видеофиксацией процесса деформирования образцов. Начальный момент разрушения адгезионного соединения определяется по возникновению относительного сдвига предварительно нанесенных реперных линий. Предложен критерий разрушения адгезионных соединений, основанный на рассмотрении предельного состояния условного выделенного микрообъема, содержащего границу соединения материалов. Приведены аналитические формулы для расчета эффективных значений нормального модуля упругости и коэффициента Пуассона условного выделенного микрообъема. Рассмотрены особенности реализации методик на примерах испытаний металлополимерных адгезионных соединений поверхностей алюминиевых сплавов посредством эпоксидных смол. По результатам проведенных испытаний построены диаграммы предельной плотности энергии деформации, которые могут быть использованы для проектной оценки ресурса адгезионной прочности металлополимерных адгезионных соединений.

© **Смирнов Сергей Витальевич** – д. т. н., зав. лаб. микромеханики материалов, гл. н. с., e-mail: smirnov.sergy@bk.ru.
Веретенникова Ирина Андреевна – к. т. н., с. н. с. лаборатории микромеханики материалов, e-mail: stpxia@gmail.com.
Мясникова Марина Валерьевна – к. т. н., с. н. с. лаборатории микромеханики материалов, e-mail: marina@imach.uran.ru.
Вичужанин Дмитрий Иванович – к. т. н., с. н. с. лаборатории микромеханики материалов, e-mail: mmm@imach.uran.ru.

Sergey V. Smirnov – Doctor of Technical Sciences, Researcher, Head of the Laboratory of Material Micromechanics, IES UB RAS, e-mail: smirnov.sergy@bk.ru.
Irina A. Veretennikova – PhD in Technical Sciences, Senior Research, Laboratory of Material Micromechanics, IES UB RAS, e-mail: stpxia@gmail.com.
Marina V. Myasnikova – PhD in Technical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Material Micromechanics, IES UB RAS, e-mail: marina@imach.uran.ru.
Dmitry I. Vichuzhanin – PhD in Technical Sciences, Senior Research, Laboratory of Material Micromechanics, IES UB RAS, e-mail: mmm@imach.uran.ru.

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

TESTS TO DETERMINE THE INFLUENCE OF STRESS ON THE STRENGTH OF METAL-POLYMER ADHESIVE JOINTS

S.V. Smirnov, I.A. Veretennikova, M.V. Myasnikova, D.I. Vichuzhanin

Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 30 September 2024
Approved: 23 October 2024
Accepted for publication: 05 November 2024

Keywords:

metal-polymer composites, adhesive joints, stress state, strength, damage, adhesive strength tests, modified Arkan samples, multilayer samples, epoxy resin, adhesive.

ABSTRACT

It is promising to expand the scope of applications of metal-polymer adhesive joints in order to create composite materials, honeycomb and layered structures that combine high strength and low weight. For an adequate design of metal-polymer joints using modern engineering analysis systems, it is necessary to have information about the ultimate mechanical properties of adhesive joints under stress conditions that can be realized in the designed structural elements during operations. The article describes the features of using the methods for conducting and processing the results of a set of mechanical tests for tension of modified Arkan samples and transverse compression of glued cylindrical BNS-samples. At the edges of the samples, it was proposed to form an additional volume of adhesive extending beyond the contact surface to reduce the concentration of dangerous stresses. It was proposed to test multilayer samples for a three-point bending with a simultaneous video recording of the sample deformation process to take into account the characteristics of the damage of layered metal-polymer compounds. The initial moment of damage of the adhesive joint is determined by the occurrence of a relative shift of previously applied reference lines. The criterion was proposed for evaluation of the damage of adhesive joints, based on the consideration of the limit state of a selected microvolume containing the boundary of the connection of materials. Analytical formulas were given for calculating the effective values of the modulus of elasticity and Poisson's ratio of the selected microvolume. The features of the proposed methods were considered using examples of testing metal-polymer adhesive joints of aluminum alloy surfaces using epoxy resins. Based on the results of the tests, diagrams of the ultimate deformation energy density were constructed, which can be used for the design assessment of the resource of the adhesive strength of metal-polymer adhesive joints.

Введение

При создании современной техники наблюдается устойчивая тенденция к увеличению внешних механических, термических и др. нагрузок при необходимости сохранять работоспособность и живучесть в экстремальных условиях эксплуатации, в том числе и при внештатных ситуациях. Наглядно это проявляется в развитии аэрокосмической техники, конструкций и устройств, предназначенных для работы в арктических условиях. Например, температурные напряжения, возникающие вследствие большой разницы температур на солнечной и теневой сторонах конструкций в районах Крайнего Севера и Антарктиды, приводят к циклическим температурным деформациям. При этом могут существенно повреждаться защитные покрытия и клеевые соединения, материал которых подвергается дополнительным нагрузкам из-за различия коэффициентов термического расширения покрытия и металлической основы. Монтажные, а также снеговые и ветровые нагрузки на конструкции приводят к возникновению сложного напряженного состояния в защитных покрытиях и клеевых соединениях, усугубляемого действием отрицательных температур.

Использование металлополимерных соединений является перспективным направлением создания композиционных материалов, сотовых и слоистых силовых конструкций, сочетающих высокую прочность и малый вес. В качестве связующего, обеспечивающего необходимую адгезионную связь, обычно используются термореактивные полимерные адгезивные материалы, которые, как и другие конструкционные материалы, должны обеспечивать прочность соединения, достаточную для его надежной эксплуатации в составе конструкции.

В настоящее время проектирование композиционных материалов обычно осуществляется с использованием систем инженерного анализа ANSYS, ABAQUS, FIDESYS и др., которые предполагают проведение глобальных прочностных расчетов элементов конструкций и их соединений, как правило, находящихся в условиях сложного напряженно-деформированного состояния в процессе эксплуатации. Но во встроенных базах данных этих программных комплексов практически отсутствуют сведения о механических свойствах полимерных адгезивов. В основном в технической документации на адгезивные материалы присутствуют сведения только о пределе прочности на сдвиг (реже на отрыв) и, как правило, при комнатной температуре. В отличие от металлических материалов, для которых обычно известны прочностные свойства в широком диапазоне температур, для материалов адгезивных покрытий подобная информация крайне ограничена. Отсутствие этих данных не позволяет производить полноценные проектные прочностные расчеты для покрытий и клеевых соединений в составе конструкций и механизмов для реальных условий эксплуатации. Таким образом, весьма актуальным является определение возможностей адгезивов сопротивляться разрушению в условиях сложного напряженного состояния и температурного воздействия.

В технической и научной литературе описано большое количество испытаний на прочность адгезионных соединений. По мнению авторов обзора [1], их число превышает 200. В большей степени речь идет об испытаниях, моделирующих условия работы конкретных соединений в заданных условиях. Например, испытания на раздир и сдвиг растяжением соединений с покрытиями и листовых материалов [2], выдергивание волокна из связующего [3] и др. Перенос результатов на другие условия нагружения и на другие соединения, как правило, невозможен. Изучению нарушения целостности соединений, образования и развития разрушающих трещин под действием критических силовых нагрузок, определяемых внешними параметрами (температура, скорость и характер приложения нагрузки), посвящено большое количество исследований в области механики (см. например, обзоры [4–9]). При этом в настоящее время отсутствуют сложившиеся представления о том, по каким критериям следует оценивать прочность адгезионных соединений и какие характеристики напряженного состояния при этом использовать. В инженерных расчётах зачастую применяют силовые критерии, основанные на использовании традиционных теорий прочности твердых тел, а также критерии, специализированные для решения задач адгезионной прочности (см. обзоры [10–12]). При прогнозировании разрушения адгезионных соединений с помощью силовых критериев имеется ряд существенных ограничений, связанных с невозможностью их использования в краевых областях с сингулярностью напряжений, также с их нечувствительностью к толщине слоя адгезива [12]. Кроме того, силовые критерии не учитывают влияние истории изменения напряженно-деформированного состояния на разрушение адгезионного соединения.

Важным шагом в прогнозировании прочности адгезионных соединений явилась разработка моделей когезионной зоны (*CZM – Cohesive Zone Model*), в соответствии с которыми распространению трещины предшествует развитие повреждений материала перед ее вершиной. При этом продвижение трещины происходит при достижении поврежденности критического уровня. Моделям *CZM* посвящен специальный выпуск журнала *Engineering Fracture Mechanics* (2003), а также более поздние обзоры в работах [13; 14]. В качестве определяющего параметра моделей *CZM* обычно используют скорость высвобождения энергии G, рассчитываемую как работу, затраченную на образование единицы свободной поверхности при распространении трещины [14]. Для экспериментального определения G_c и идентификации моделей по диаграммам *traction – separation* проводят различные испытания в условиях отрыва ($G_{c\mathrm{I}}$), сдвига ($G_{c\mathrm{II}}$) и поперечного сдвига ($G_{c\mathrm{III}}$), в том числе регламентируемые стандартом ASTM D5528. Использование моделей *CZM* позволяет решать важные задачи сохранения живучести адгезионного соединения в случае наличия или образования в нем трещин.

При проектировании адгезионного соединения также важно определить уровень допускаемых механических нагрузок, превышение которого может привести к инициированию начальных несплошностей на границе соединения и, как следствие, к возникновению и распространению трещин, а затем и к разрушению соединения при дальнейшем нагружении [15; 16]. В этом смысле эффективным показателем может являться предельная величина работы/энергии, затрачиваемой внешними силами на образование локального нарушения сплошности в наиболее нагруженных и опасных участках соединения. Критерии, основанные на использовании энергии деформации, учитывают все компоненты тензоров напряжений и деформации. Поэтому они в большей степени подходят в качестве критерия начала разрушения, чем стандартные силовые и деформационные критерии. Кроме того, в отличие от скорости высвобождения энергии, работа обладает свойством кумулятивности, что дает принципиальную возможность учитывать влияние истории изменения условий деформирования на разрушение адгезионного соединения. Опыт использования этого параметра ограниченно описан в научно-технической литературе. Так, в статье [17] в качестве критерия разрушения использовали плотность энергии деформации, усредненную по деформируемому объему адгезива. Авторы проводили испытания только для растяжения листовых образцов, соединенных внахлест, поэтому ими не изучалась зависимость предельной плотности энергии деформации при разрушении от характеристик напряженного состояния.

Также следует отметить, что с позиций экспериментальной механики удобнее иметь ограниченное количество видов испытаний и форм образцов, но при этом изменять условия нагружения этих образцов так, чтобы в наиболее широком диапазоне варьировать напряженное состояние. Проведенный анализ известных методов испытаний прочности адгезионных соединений и собственный опыт авторов показывают, что на роль таких видов испытаний могут претендовать растяжение модифицированных образцов Аркана, трехточечный изгиб многослойных образцов, поперечное сжатие склеенных цилиндрических образцов (в англоязычной литературе *Brazil-nut-sandwich*), в дальнейшем *BNS*-образцов.

Цель исследований – анализ особенностей проведения этих испытаний и обработки их результатов, что позволит получать единые зависимости для описания адгезионной прочности в широком диапазоне напряженного состояния.

1. Методики проведения испытаний

1.1. Модифицированные образцы Аркана

Образцы, впоследствии названные модифицированными образцами Аркана, были предложены в работе [18] и затем усовершенствованы авторами исследова-

ний [19]. Они предназначены для определения прочности клеевых соединений при нагружении по схеме «растяжение/сжатие + сдвиг» и представляют собой две перфорированные пластины с несколькими парами отверстий для крепления захватов, кососимметрично расположенных относительно плоскости склейки. Благодаря этим отверстиям можно изменять направление прилагаемой нагрузки. Одной из основных проблем при применении этих образцов является сильная концентрация растягивающих напряжений на краях образца, что вынудило исследователей искать пути решения по снижению опасных напряжений, инициирующих преждевременное возникновение трещин. Наиболее эффективное решение было предложено в работе [20]. Оно заключалось в придании краям образца особой формы в виде острого клюва, что позволило практически обнулить напряжения на опасных краевых участках, но в то же время привело к существенному увеличению трудозатрат и стоимости изготовления образца.

На рис. 1, *a*, приведено изображение модифицированного образца Аркана, который был применен нами для проведения испытаний. Он представляет собой составную конструкцию, состоящую из двух металлических половинок (рис. 1, *b*), склеенных между собой при помощи вставок, которые испытываются на адгезионную прочность. На рис. 1, *c* приведены размеры образцов, использованных в работе. Металлические половинки жестко фиксируются в зажимах испытательной машины при помощи пластин, имеющих отверстия (рис. 2). В зависимости от того, какие из 5 пар отверстий будут использованы при закреплении пластины, можно ориентировать направление действия растягивающего усилия от 0 до 90° с шагом 22,5°.



a *b* *c*

Рис. 1. Общий вид модифицированного образца Аркана (*1* – вставка из клеевого соединения, *2* – металлические части образца) (*a*); исходные металлические части образца до склеивания (*b*); модифицированный образец Аркана с указанием размеров в мм (*c*)

Fig. 1. General view of the modified Arkan sample (*1* – insert from adhesive joint, *2* – metal parts of the sample) (*a*); original metal parts sample before joining (*b*); modified Arkan sample with dimensions in mm (*c*)

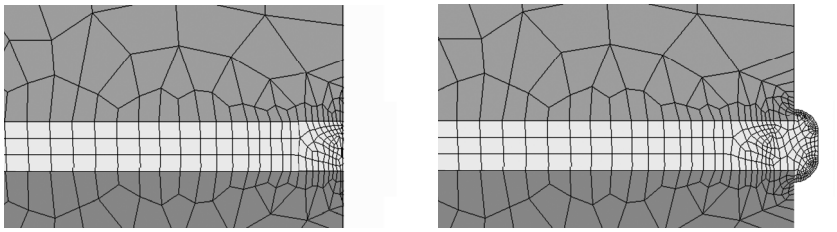


a *b* *c*

Рис. 2. Модифицированные образцы Аркана со вставками из клеевых соединений для определения адгезионной прочности при растяжении со сдвигом (*1* – образец, *2* – пластины с отверстиями, *3* – зажимы испытательной машины). Угол α между осью растяжения и плоскостью соединения: *a* – 0; *b* – 45°; *c* – 90°

Fig. 2 Modified Arkan samples with inserts from adhesive joints for determining the adhesive strength under tension with shear (*1* – sample, *2* – plates with holes, *3* – clamps of the testing machine). Angle α between the axis of tension and the plane of the joint: *a* – 0°; *b* – 45°; *c* – 90°

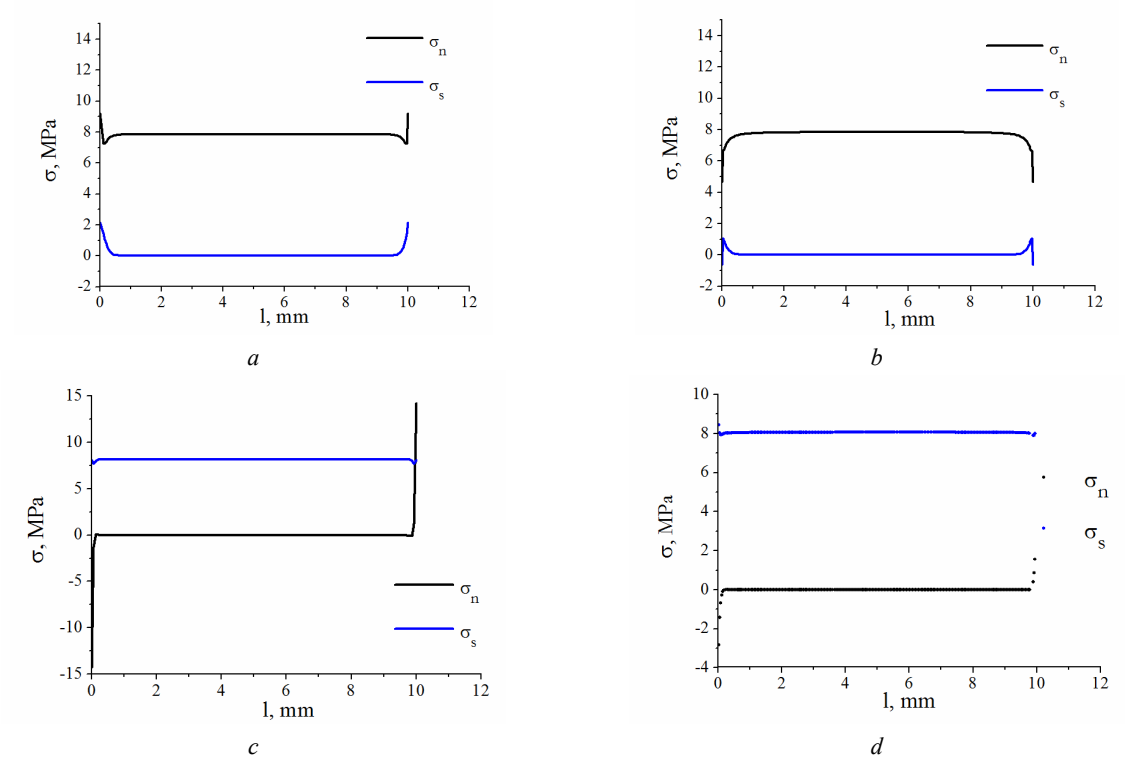
Напряженное состояние вблизи края образца может быть скорректировано путем изменения формы боковой поверхности адгезионного слоя. Для оценки возможности такой корректировки с использованием программного комплекса ANSYS было проведено конечно-элементное моделирование испытаний образцов на отрыв и сдвиг с плоской формой боковой поверхности адгезионного слоя (рис. 3, *a*) и с внешним клеевым буртиком (рис. 3, *b*). Одновременно рассматривали влияние фаски и скругления краев склеиваемых металлических образцов. Задачу решали в упругой постановке в условиях плоского напряженного состояния. При моделировании добивались максимальной равномерности распределения нормальных напряжений по границе соединения либо формирования локальных областей сжимающих напряжений вблизи краев образца. Анализ полученных результатов показал, что наилучшим образом поставленной цели удовлетворяет формирование на краях образца небольшого клеевого грибовидного буртика толщиной, равной толщине клеевого слоя (см. рис. 3, *b*). Так, из представленных на рис. 4 данных следует, что на образце с буртиком при испытаниях на отрыв величина растягивающих напряжений снижается, а не увеличивается; при испытаниях на сдвиг нормальные растягивающие напряжения снижаются более чем в 7 раз, по сравнению с напряжениями на образце с плоской формой боковой поверхности. Это дает основание прогнозировать маловероятное возникновение краевых трещин расслоения. Что касается величины усилия растяжения, то она изменится незначительно в силу малой толщины клеевого буртика.



a *b*

Рис. 3. Конечно-элементные модели склеенной вставки: *a* – с плоскими боковыми поверхностями адгезионного слоя; *b* – с грибовидным буртиком

Fig. 3. Finite element models of a glued insert: *a* – with flat side surfaces of the adhesive layer; *b* – with a mushroom-shaped flange



a *b*

c *d*

Рис. 4. Результаты моделирования напряженного состояния при плоской боковой поверхности клеевого слоя (*a, c*) и при наличии грибовидного буртика (*b, d*) в испытаниях на отрыв (*a, b*) и сдвиг (*c, d*)

Fig. 4. Results of modeling the stress state with a flat side surface of the adhesive layer (*a, c*) and the presence of a mushroom-shaped flange (*b, d*) during tests for peeling (*a, b*) and shear (*c, d*)

Металлические половинки образца изготавливали фрезерованием. Шероховатость на контактных поверхностях после механической и абразивной обработки контролировалась на бесконтактном профилометре-профилографе NT1100 и составила *Ra* 0,4 мкм. Склеивание осуществляли в специальных ограничивающих упорах, обеспечивающих постоянную толщину адгезионного слоя, равную 0,2 мм. Профиль буртика удобно было формировать путем удаления с помощью специального шаблона избытков клея, выдавленного из-под контактной поверхности склеиваемых металлических половинок.

Испытания проводили на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z2.5, снабженной климатической камерой КТХ-20 и позволяющей проводить испытания при температурах от –80 до + 180 °С. Максимальное возможное усилие соответствует 2,5 кН. Запись диаграмм нагружения до разрушения испытываемого соединения осуществляли с использованием датчиков усилия и перемещения, входящих в комплектацию испытательной машины. Погрешность тензометра и датчика силы по сертификатам калибровки не превышала соответственно 0,31 и 0,38 % от измеряемой величины.

Как следует из результатов моделирования, выбранная форма боковой поверхности клеевого слоя в значительной степени затрудняет образование и распространение концевых трещин на границе соединения. Фактически напряженное состояние является однородным на более чем 95 % протяженности границы соединения. Поэтому для его оценки в момент разрушения могут быть использованы средние значения нормальных σ_n и сдвиговых σ_s напряжений:

$$\sigma_n = \frac{P}{S}\cos(\alpha), \quad \sigma_s = \frac{P}{S}\sin(\alpha), \qquad (1)$$

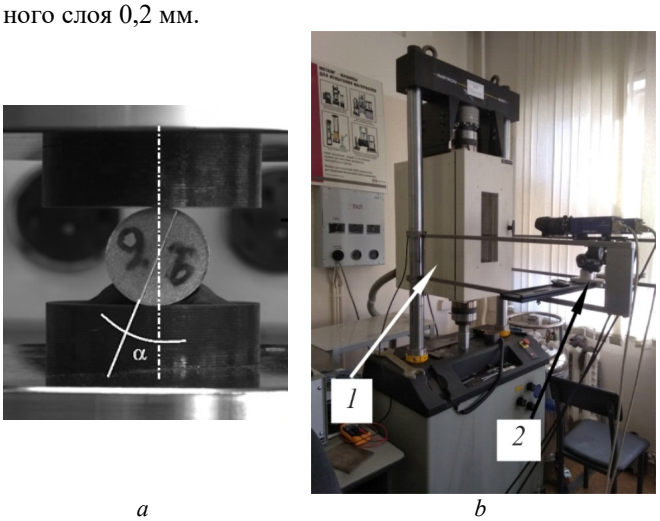
где P – предельное усилие растяжения, фиксируемое силоизмерительным датчиком испытательной машины в момент разрушения клеевого соединения; S – площадь поверхности склеивания.

Несмотря на то, что первоначально модифицированные образцы Аркана предназначались для реализации схем нагружения «растяжение + сдвиг» и «сжатие + сдвиг», тем не менее при реализации последней дополнительно возникают изгибающие моменты, обусловленные наличием шарнирных соединений при фиксировании образца. Эти моменты неопределенным образом искажают напряженное состояние в испытываемом адгезионном соединении, поэтому нами модифицированные образцы Аркана использовались только для реализации схемы нагружения «растяжение + сдвиг».

1.2. *BNS*-образцы

Испытания на поперечное сжатие сплошных дисков, предложенные Carneiro (1947) и Akazawa (1953), широко используются для оценки предела прочности бетонов и керамик [21–23]. Они также адаптированы и применяются для изучения влияния направления нагрузки на распространение трещин от краев концентратора напряжений в виде радиальной щели в центре образцов [24]. Помимо относительно простой экспериментальной процедуры удобство использования данного метода испытаний заключается в том, что любая комбинация типов нагрузки (сжатие + сдвиг) может быть достигнута с помощью соответствующего выбора угла наклона относительно направления нагружения и длины щелевого концентратора [25–27]. В работах [28; 29] *BNS*-образцы были использованы для изучения влияния напряженного состояния на прочность границы соединения металлического композита, полученного сваркой взрывом, и металлополимерного соединения.

Использованные нами *BNS*-образцы представляли собой две половинки цилиндра диаметром 20 мм, соединенные с помощью адгезива (рис. 5, *a*). Перед формированием адгезионного соединения контактные поверхности обрабатывались фрезерованием и абразивом для достижения шероховатости *Ra* 0,4 мкм. Склеивание осуществлялось в специальных ограничивающих упорах, обеспечивающих постоянную толщину адгезионного слоя 0,2 мм.



a *b*

Рис. 5. *BNS*-образец перед испытаниями (для фиксации требуемого угла α наклона границы соединения образец поддерживается пластилиновыми упорами) (*a*) и испытательная машина *Instron* 8801 с навешенным оборудованием (*1* – климатическая камера, *2* – оптическая система трехмерного анализа деформаций Strain-Master) (*b*)

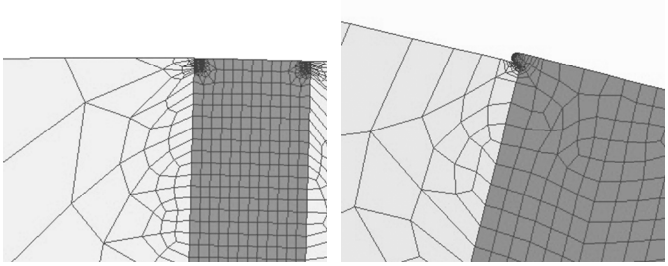
Fig. 5. BNS-specimen before testing (the specimen is supported by plasticine stops to fix the angle α) (*a*) and the Instron 8801 testing machine with attached equipment (*1* – climatic chamber, *2* – optical system for three-dimensional deformation analysis Strain-Master) (*b*)

Так как испытания по схеме «сжатие + сдвиг» требуют усилий больших, чем это допускается испытательной машиной Zwick/Roell Z2.5, то испытания BNS-образцов проводили на универсальной испытательной машине Instron 8801 с максимальным усилием нагруже-

ния 100 кН в климатической камере, входящей в комплект поставки испытательной машины (рис. 5, *b*). Охлаждение в камере осуществляли пропусканием паров жидкого азота, а нагрев – с помощью электрических тепловыделяющих элементов. Регулирование температуры с точностью ± 2 °С производили автоматически с помощью штатного программного обеспечения машины на основании данных измерений хромель-алюмелевых термопар. Погрешность датчика измерения усилия испытательной машины составляет ± 0,005 % от максимального усилия (5 Н), или принимается равной ±0,5 % от показаний датчика (выбирается большее значение); ход исполнительного органа равен 100 мм; точность измерения перемещения равняется ± 0,5 % от хода исполнительного органа (0,5 мм) При проведении испытаний придерживались рекомендаций [30] по ограничению скорости нагружения *BNS*-образцов величиной 0,0075 м/с. Нагружение проводили до момента разрушения адгезионного соединения, при этом видеосъемку и измерение перемещений осуществляли с помощью оптической системы трехмерного анализа деформаций Strain-Master. Усилие деформирования при испытаниях регистрировали с использованием штатных тензодатчиков испытательной машины. При установке образцов между плоскими бойками испытательной машины угол α между направлением сжатия и плоскостью клеевого соединения варьировали в диапазоне от 0 до 20°. Эксперименты проводили при температуре –50 °С, поскольку в таких условиях клеевая полимерная прослойка ведет себя как упругий материал. Это дает возможность осуществлять конечно-элементное моделирование поведения материала при нагружении без учета вязкой составляющей. Определение вязкостных свойств рассматриваемых в работе материалов, это отдельная большая задача, и в рамках данной статьи не рассматривается.

При использовании *BNS*-образцов также необходимо было уделить внимание наличию концентраторов напряжения на границе между покрытием и металлической основой в краевой области образцов по аналогии с модифицированными образцами Аркана. Для этого в программном комплексе ANSYS было проведено конечно-элементное моделирование испытаний образцов с плоскими поверхностями адгезионного слоя (рис. 6, *a*) и с небольшим вытеканием клеевой прослойки за пределы образца (рис. 6, *b*). По результатам моделирования установлено, что форма боковой поверхности адгезионного слоя *BNS*-образцов не оказывает существенного влияния на величину и распределение напряжений в краевой области. Кроме того, в данной области в основном преобладают сжимающие напряжения, которые не будут инициировать разрушение.

Полученные данные по значениям нормальных и касательных напряжений в зависимости от угла наклона α позволяют сделать вывод, что *BNS*-образцов, также как и для модифицированных образцов Аркана, напряженное состояние остаётся однородным на более чем 95 % протяженности границы соединения. Поэтому для его оценки в момент разрушения могут быть использованы средние значения нормальных σ_n и сдвиговых σ_s напряжений, рассчитываемые по формуле (1).



a *b*

Рис. 6. Конечно-элементные модели вставки: *a* – с плоскими боковыми поверхностями адгезионного слоя; *b* – с буртиком за счет вытекания клеевой прослойки за пределы образца

Fig. 6. Finite element models of a glued insert: *a* – with flat side surfaces of the adhesive layer; *b* – with a flange due to the adhesive layer flowing beyond the sample

1.3. Трехточечный изгиб многослойных образцов

Для оценки адгезионной прочности слоистых материалов наиболее часто используются испытания на сдвиг растяжением внахлестку (ГОСТ 14759-69, ISO 4587-79, ASTM Standard D1002-10), на четырехточечный изгиб образца с надрезанным наружным слоем [1], на изгиб со сдвигом (ГОСТ Р 57732-2017), на трехточечный изгиб (ГОСТ 25.604-82, ГОСТ Р 56810-2015, ASTM Standard D790-e2). При трехточечном изгибе реализуется неоднородное напряженное состояние, из-за чего ряд авторов не рекомендует использовать данную схему нагружения для оценки интегральных прочностных свойств материалов [31; 32]. Однако, с другой стороны, наблюдая за процессом разрушения в точках образца с разным напряженным состоянием, можно сократить количество проводимых экспериментов и получить больше экспериментальных данных, используя современные методы визуализации процесса испытаний и анализа экспериментальных данных.

Для трехточечного изгиба используются слоистые образцы, состоящие из пластин металла, соединенных прослойками адгезива (рис. 7). Чтобы сформировать одинаковую толщину адгезивных слоев, по краям пластин устанавливаются межслойные ограничительные прокладки. Количество слоев может быть различным, но чем толще собранный образец, тем больше реализуемый диапазон изменения характеристик напряженно-деформированного состояния.

Испытуемый образец устанавливается на боковые опоры (рис. 8, *a*) в рабочем пространстве испытательной машины. Нагружение осуществляется перемещением нижней траверсы машины с расположенными на ней боковыми опорами. Верхний захват с центральной опо-

рой остается неподвижным. Прогиб образца в процессе испытаний измеряется с помощью специального датчика, расположенного под образцом (рис. 8. *a*).

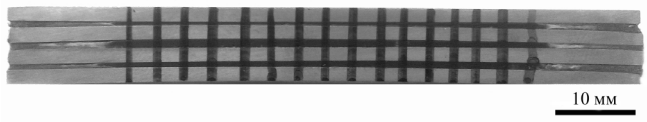
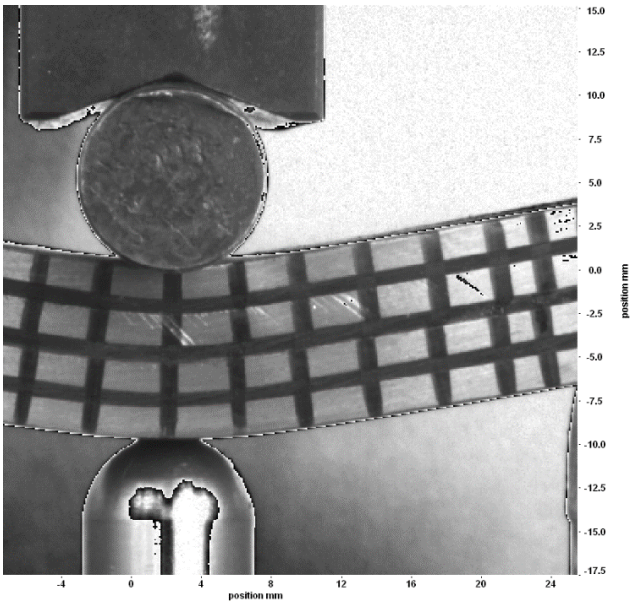


Рис. 7. Многослойный образец для испытаний на трехточечный изгиб с нанесенными реперными линиями для фиксации межслоевого сдвига

Fig. 7. Multilayer specimen for three-point bending tests with reference lines applied to record interlayer shear



a



b

Рис. 8. Изгиб образца в процессе испытания (*a*), межслоевой сдвиг среднего слоя адгезива (*b*)

Fig. 8. Bending of the testing sample (*a*), interlayer shear at the middle layer of adhesion (*b*)

На боковую поверхность образцов наносятся реперные линии (фломастером или типографской краской), которые позволяют зафиксировать момент сдвига слоев адгезива относительно металлических пластин в процессе испытаний. Для этого проводится видеосъемка деформирования образца с помощью оптической системы трехмерного анализа деформаций Strain-Master. Момент локального адгезионного разрушения по механизму сдвига связывается с началом визуально различимого относительного смещения реперных линий на границах слоев, который определяется по результатам анализа последовательности кадров видеосъемки после проведения испытаний. На рис. 8, *b*, в качестве примера представлен один из кадров видеосъёмки, на котором показано смещение реперных линий на границе среднего слоя адгезива и металлической пластины.

Для определения значений характеристик напряженно-деформированного состояния в местах наблюдаемого адгезионного разрушения и их изменения в процессе трехточечного изгиба было осуществлено моделирование испытаний с использованием программного комплекса ANSYS. В силу симметрии процесса деформации моделировали 1/2 схемы испытания (рис. 9). Модель соединения представляла собой металлические пластины *1*, склеенные между собой адгезивными прослойками *2*. В первом приближении полагали, что возникновение сдвига по механизму адгезионного разрушения в каждом слое образца происходит независимого от других слоев. Такое допущение позволило использовать опцию *bonded* для соединения слоев модели без возможности относительного смещения в контактных плоскостях. Для конечно-элементной дискретизации модели использовали 8-узловые конечные элементы типа *SOLID* 185. Для осуществления контакта опор *3*, *4* и образца задавали контактные пары типа *Surface-to-Surface* со стандартным скольжением в контактной плоскости.

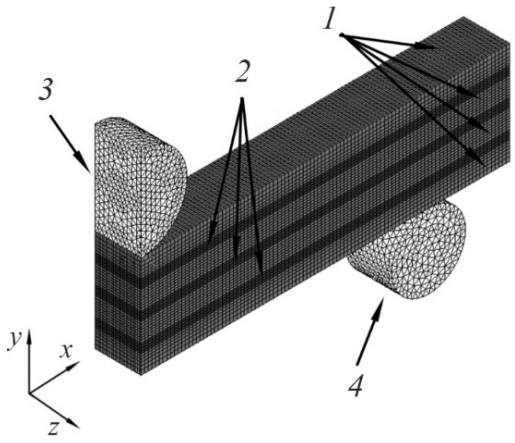


Рис. 9. Конечно-элементная модель при испытании на трехточечный изгиб: *1* – металлическая пластина; *2* – адгезив; *3* – центральная опора; *4* – боковая опора

Fig. 9. Finite element model for three-point bending test: *1* – metal plate; *2* – adhesive; *3* – central support; *4* – lateral support

Результаты моделирования позволяют получить значения компонент тензоров напряжений и деформаций во всех узлах конечно-элементной сетки на каждом расчетном шаге нагружения. Это дает возможность восстановить историю изменения напряженно-деформированного состояния от начала испытания до моментов наблюдения начальных относительных сдвигов реперных линий, классифицированных как локальное адгезионное разрушение по механизму сдвига. Сопоставляя результаты видеосъемки и моделирования, можно установить группу узлов конечно-элементной сетки, координаты которых в актуальной конфигурации соответствуют местоположению начальных относительных сдвигов реперных полос, а также номера расчетных шагов, ближайших к моменту видеофиксации сдвигов. Значения характеристик напряженно-деформированного состояния в этих узлах используются при составлении критерия, определяющего условие локального разрушения адгезионного соединения.

В целом неоднородность напряженно-деформированного состояния, провоцируемая трехточечным изгибом, позволяет по результатам моделирования одного испытания получить диапазон характеристик локальных напряжений и деформаций на каждом расчетном шаге нагружения в разных точках на всех границах слоев соединения. Это означает, что фактически при одном испытании мы имеем разные условия, которые могут провоцировать адгезионное разрушение исследуемого многослойного материала по механизму сдвига. Ниже, в качестве примера, будут приведены распределения нормальных и касательных напряжений на одной из межслойных границ. Величина этих напряжений и их соотношение показывают наиболее опасные участки с точки зрения сохранения локальной адгезионной прочности.

2. Обработка результатов экспериментов и обсуждение

2.1. Критерий разрушения адгезионного соединения

В качестве критерия, определяющего условие локального разрушения адгезионного соединения, будем использовать достижение величины плотности энергии деформации предельного значения W^* в некотором условном выделенном микрообъеме, включающем границу соединения. Условный выделенный микрообъем, изображенный на рис. 10, состоит из двух частей. Часть толщиной h_1 принадлежит адгезиву, а часть толщиной h_2 – субстрату. Микрообъем в данный момент времени находится в равновесии, и на его противоположных гранях действуют равные напряжения σ_{ij} в локальной системе координат (x', y', z'). Ось z' направлена по нормали к границе соединения, а оси x', y' лежат в ее плоскости.

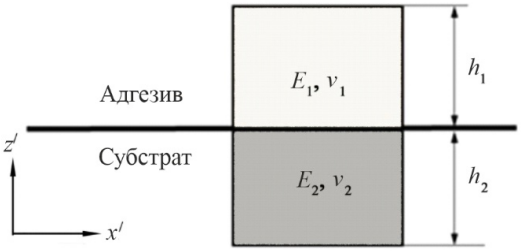


Рис. 10. Условный выделенный микрообъем на границе соединения

Fig. 10. Selected microvolume at the boundary

Напряжения σ_{ij} и соответствующие им деформации ε_{ij} определяются из решения задачи механики по нахождению напряженно-деформированного состояния соединенных твердых тел под действием внешней нагрузки. В нашем случае будем считать, что условный выделенный микрообъем находится в условиях плоского напряженного состояния под действием нормального и сдвигового напряжений, определяемых по формулам (1). При проведении испытаний ниже температуры стеклования, можно считать, что разрушение адгезионного слоя происходит в области упругих деформаций.

Предельную плотность энергии деформации условного выделенного микрообъема W^* и ее компонент при разрушении соединения определяли по формулам

$$W^* = W_n^* + W_s^*,\ W_n^* = \frac{1}{2\overline{E}}\left(\sigma_{x'}^2 - \overline{\nu}\,\sigma_{x'}^2\sigma_{z'}^2 + \sigma_{z'}^2\right),$$

$$W_s^* = \frac{\sigma_s^2}{2\overline{G}},\ \overline{G} = \frac{\overline{E}}{2(1+\overline{\nu})}, \qquad (2)$$

где W_n^*, W_s^* – нормальная и сдвиговая компоненты плотности энергии деформации; $\overline{E}$, $\overline{\mathrm{G}}$, $\overline{\nu}$ – эффективные значения нормального модуля упругости, модуля сдвига и коэффициента Пуассона.

Эффективные значения характеристик упругих свойств могут быть рассчитаны с использованием известных формул для однонаправленных композитов:

$$\frac{h}{\overline{E}} = \frac{h_1}{E_1} + \frac{h_2}{E_2},\ \overline{\nu} = \frac{\nu_1 h_1 E_2 + \nu_2 h_2 E_1}{h_1 E_2 + h_2 E_1},\ \frac{h}{\overline{G}} = \frac{h_1}{G_1} + \frac{h_2}{G_2}, \qquad (3)$$

где E_1, ν_1, G_1 и E_2, ν_2, G_2 – значения нормального модуля упругости, коэффициента Пуассона и модуля сдвига материалов адгезива и субстрата, соответственно.

Непосредственно формулы (3) применить для расчетов не представляется возможным, так как значения толщин слоев h_1 и h_2 условного выделенного микрообъема являются введенной физически неопределенной математической абстракцией. Физический смысл может иметь их соотношение, которое характеризует вовлеченность обоих материалов в процесс адгезионного взаимодействия. Предположим, в первом приближении, что данное соотношение обратно пропорционально значениям нормальных модулей упругости адгезива и субстрата, т.е.:

$$h_1 = h_2 \frac{E_2}{E_1}, \quad (4)$$

Тогда после несложных преобразований (4) получим формулы для расчета эффективных значений $\overline{E}$, $\overline{G}$ и $\overline{\nu}$ для условного выделенного микрообъема, не содержащие h_1 и h_2:

$$\overline{E} = \frac{E_1 + E_2}{\frac{E_1}{E_2} + \frac{E_2}{E_1}}, \ \overline{\nu} = \frac{\nu_1 E_2^2 + \nu_2 E_1^2}{E_1^2 + E_2^2}, \ \overline{G} = \frac{G_1 + G_2}{\frac{G_1}{G_2} + \frac{G_2}{G_1}}. \quad (5)$$

Для количественной оценки влияния напряженного состояния на прочность адгезионного соединения целесообразно использовать зависимость W^* от фазового угла β, который рассчитывается по следующей формуле:

$$\beta = \operatorname{arctg}\left(\frac{\sigma_n}{\sigma_s}\right), \quad (6)$$

так как при этом график $W^*(\beta)$ не будет иметь разрыва в отличие от функции $W^*(\alpha)$.

Зависимость $W^*(\beta)$ отражает влияние нормальных напряжений на разрушение адгезионных соединений по механизму расслоения: при $\beta > 0$ на границу соединения действуют внешние растягивающие нормальные напряжения, провоцирующие расслоение; при $\beta < 0$ – действуют сжимающие нормальные напряжения, которые затрудняют расслоение; $\beta = 0$ соответствуют напряженному состоянию простого сдвига, когда действие нормальных напряжений отсутствует.

2.2. Примеры использования методик

Адгезионное соединение АМг5/ЭД-20/АМг5. В данном соединении роль субстрата выполняли образцы из алюминий-магниевого сплава АМг5, а в качестве адгезива использовалась эпоксидная смола ЭД-20. Для проведения испытаний были изготовлены вставки к модифицированным образцам Аркана и *BNS*-образцы по методике, описанной выше. При формировании адгезионного соединения эпоксидная смола отверждалась с использованием диэтилентриамина (ДЭТА) в соотношении 10:1 при комнатной температуре. Испытания проводили при температуре –50 °С со скоростью нагружения 1 мм/мин. Диаграммы нагружения для образцов Аркана при разных углах α показаны на рис. 11. Площадь адгезионного контакта S у образцов Аркана составляла 150 мм^2, у *BNS*-образцов – 400 мм^2. Усредненные по результатам испытаний 3–5 образцов экспериментальные данные приведены в таблице.

Необходимые для расчета контактных напряжений значения модулей нормальной упругости для материала субстрата и адгезива определяли на приборе динамического механического анализа GABO NETZSCH DMA EPLEXOR 100N при температуре –50 °С в испытаниях на сжатие цилиндрических образцов с частотой 1 Гц.

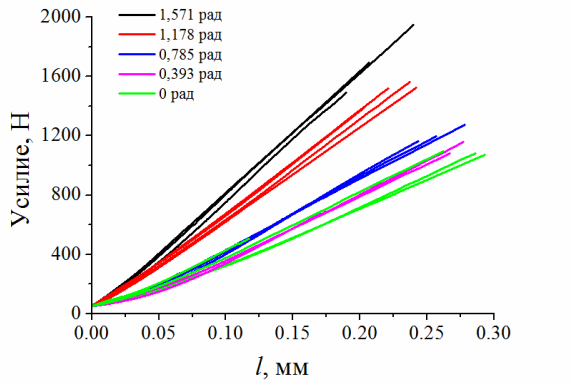


Рис. 11. Диаграмма нагружения для образцов Аркана при разных углах α

Fig. 11. Load diagram for Arcana samples at different angles α

Экспериментальные и расчетные данные для построения диаграмм предельной плотности энергии деформации адгезионного соединения АМг5/ЭД-20/АМг5

Experimental and calculated data for diagrams of the ultimate deformation energy density of the adhesive joint AMg5/ED-20/AMg5

α, градус	P, кН	β, рад.	σ_n, МПа	σ_s, МПа	W_n^*, Дж/м^2	W_s^*, Дж/м^2	W^*, Дж/м^2
90	1,68	1,571	11,2	0	12,44	0	12,44
67,5	1,51	1,178	9,32	3,86	8,66	4,02	12,68
45	1,06	0,785	4,98	4,98	2,47	6,70	9,17
22,5	1,11	0,393	2,83	6,84	0,80	12,62	13,42
0	1,26	0	0	8,37	0	18,93	18,93
-6,9	7500	-0,121	-18,62	2,25	34,53	1,36	35,89
-11,5	9820	-0,200	-24,06	4,88	57,70	6,42	64,12
-15	13500	-0,262	-32,51	8,71	105,32	20,48	125,80
-20,5	18900	-0,356	-51,60	19,19	265,34	99,41	364,75

Примечание: значения угла α для испытаний BNS-образцов взяты со знаком минус.

В этих условиях эпоксидный адгезив находится в остеклованном состоянии и слабо проявляет вязкостные свойства, поэтому определённое в экспериментах значение модуля накопления E' практически равно значению нормального модуля упругости $E_1 = E' = 4{,}72$ ГПа. Значения коэффициента Пуассона $\nu_1 = 0{,}35$ для эпоксидного адгезива и $\nu_2 = 0{,}33$ для алюминиевого сплава были приняты из справочных данных [33; 34]. Путем подстановки указанных выше значений упругих констант в формулы (5) были рассчитаны эффективные значения характеристик упругих свойств: $\overline{E} = 5{,}02$ ГПа, $\overline{G} = 1{,}86$ ГПа, $\overline{\nu} = 0{,}35$. По результатам экспериментов были определены значения компонент предельной плотности энергии деформации W_n^* и W_s^*, а также значения W^*, которые приведены в таблица. Диаграмма предельной плотности энергии деформации $W^*(\beta)$ показана на рис. 12.

Следует отметить, что использование фазового угла β является более удобным для наглядной оценки

влияния напряженного состояния на предельную плотность энергии деформации адгезионного соединения, чем применяемый рядом авторов [35–37] фазовый угол ψ, рассчитываемый по формуле:

$$\psi = \operatorname{arctg}\left(\frac{\sigma_s}{\sigma_n}\right). \qquad (7)$$

Это связано с тем, что график $W^*(\psi)$ имеет разрыв при $\psi \to 0$ в области $\psi < 0$.

Графическая зависимость $W^*(\beta)$, как это видно из рис. 12, представляет собой гладкую функцию, которая может быть аналитически описана уравнением:

$$\log W^*(\beta) = c_1 \exp(-c_2\beta) + c_3, \qquad (8)$$

где c_1, c_2, c_3 – эмпирические коэффициенты, значения которых для данного адгезионного соединения равны 0,319, 4,194 и 1,045 соответственно.

Зависимость $W^*(\beta)$ можно использовать в качестве критерия локального разрушения по механизму расслоения в адгезионных соединениях конструкций и в металлополимерных композитах. В этом случае степень использования ресурса прочности соединения Ψ и его остаточный ресурс Ψ_{res} могут быть количественно оценены по следующим формулам:

$$\psi = \frac{W}{W^*(\beta)}, \quad \psi_{ост} = 1 - \frac{W}{W^*(\beta)}, \qquad (9)$$

где W – локальная плотность энергии деформации в наиболее напряженном (опасном) месте клеевого соединения в рассматриваемый момент времени.

Параметры Ψ и Ψ_{res} удобно использовать при осуществлении проектных и поверочных расчетов адгезионных соединений.

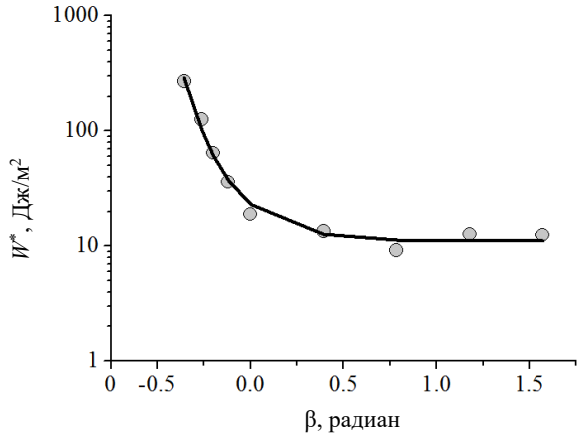


Рис. 12. Диаграмма предельной плотности энергии деформации адгезионного соединения АМг5/ЭД-20/АМг5. Точки на рисунке соответствуют данным, приведенным в таблице, линия – аппроксимирующей зависимости (8)

Fig. 12. Diagram of the ultimate density of deformation energy of the adhesive joint AMg5/ED-20/AMg5. The points in the figure correspond to the data given in Table, the line corresponds to the approximating dependence (8)

Адгезионное соединение АМг6-НВП/ЭД-20/АМг6-НВП. Слоистые образцы, состоящие из четырех пластин алюминиевого сплава АМг-6-НВП, соединенных прослойками адгезива, подвергали испытаниям на трехточечный изгиб (рис. 7, 8). Размеры пластин составляли 80×10×2 мм (длина × ширина × толщина). Сплав АМг6-НВП представляет собой сплав АМг6 с химическим составом по ГОСТ 4784-97, который для увеличения прочности подвергается холодной пластической деформации прокаткой. В качестве адгезива использована эпоксидная смола ЭД-20, отвержденная полиэтиленполиамином (ПЭПА). Массовое соотношение смола/отвердитель составляло 10:1. Отверждение смолы осуществляли при температуре 25 °С. Толщина слоев адгезива в среднем составляла 1 мм. Испытания на трехточечный изгиб проводили при комнатной температуре на универсальной серво-гидравлической испытательной машине Instron-8801 со скоростью перемещения плунжера 1 мм/мин. Расстояние между осями боковых опор составляло 60 мм. Диаметр средней цилиндрической и боковых опор равнялся 10 и 8 мм соответственно.

В процессе испытаний по результатам видеосъемки были зафиксированы местоположения возникновения сдвигов реперных линий и соответствующие им величины прогибов. Сопоставление этой информации с результатами моделирования позволило провести анализ напряженно-деформированного состояния в местах разрушения адгезионного соединения и рассчитать для этих точек значения предельной энергии деформации. Необходимые для расчета эффективные значения упругих характеристик материалов адгезива и алюминиевого сплава были заимствованы из статьи [38]: $\overline{E}$ =4,77 ГПа, $\overline{G}$ =1,76 ГПа, $\overline{\nu}$ =0,35.

Установлено, что возникающие в результате изгиба нормальные σ_n и касательные σ_s напряжения на границах соединения слоев формируют сложное неоднородное напряженное состояние и определяют локальные условия нарушения или сохранения целостности адгезионного контакта. В качестве примера на рис. 13 приведено распределение σ_n и σ_s на границе между 2-м слоем адгезива и пластиной, где по результатам видеосъемки были зафиксированы первые сдвиги при величине прогиба образца 0,31 мм. Отрицательные значения σ_n наблюдаются на участках локального сжатия в зонах влияния центральной и боковой опор при $x < 6$ мм, $22 < x < 33$ мм. Эти участки следует рассматривать как области с неразрушенной адгезионной связью. На участке с положительными нормальными напряжениями разрушение адгезионного контакта наиболее вероятно.

Диаграмма предельной плотности энергии деформации, построенная по результатам обработки экспериментальных данных и численного моделирования, представлена на рис. 14. При наличии растягивающих напряжений нормальных к плоскости адгезионного соединения ($\beta > 0$) величина $W_t^*(\beta)$ мала, что свидетель-

ствует о низкой адгезионной прочности сдвигу. В то же время в условиях действия сжимающих нормальных напряжений ($\beta < 0$) величина предельной плотности энергии деформации интенсивно возрастает.

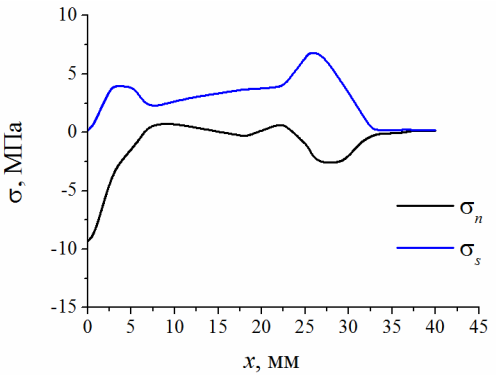


Рис. 13. Распределение нормальных σ_n и касательных σ_s напряжений на границе между 2-м слоем адгезива и пластиной, считая от нижней поверхности образца при величине прогиба образца 0,31 мм

Fig. 13. Distribution of normal σ_n and tangential σ_s stresses at the boundary between the second adhesive layer and the plate, measured from the lower surface of the sample with a sample deflection of 0.31 mm

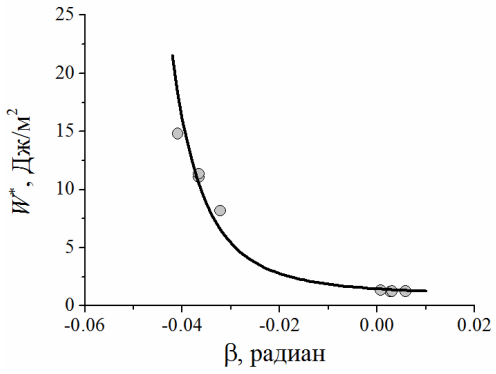


Рис. 14. Диаграмма предельной плотности энергии деформации адгезионного соединения «АМг6-НВП/ЭД-20/ АМг6-НВП»

Fig. 14. Diagram of the ultimate deformation energy density of the adhesive joint "AMg6-NVP/ED-20"

Точки на диаграмме соответствуют моментам локального адгезионного разрушения и связываются с началом визуально различимых межслойных сдвигов, определенных по результатам анализа последовательности кадров видеосъемки после проведения испытаний. Положения локальных межслойных сдвигов соответствуют разным значениям фазового угла β вследствие неоднородности напряженного состояния. Это дало возможность построить участок диаграммы вблизи $\beta = 0$ по результатам испытаний одного образца. Диаграмма на рис. 14 аппроксимирована уравнением (8) с эмпирическими коэффициентами $c_1 = 0{,}164$; $c_2 = -49{,}87$; $c_3 = 0$.

Заключение

1. Предложен комплекс испытаний для определения прочности металлополимерных адгезионных соединений в широком диапазоне изменения напряженного состояния. Показано, что для реализации схемы нагружения «растяжение +сдвиг» целесообразно использовать модифицированные образцы Аркана, а для схемы «сжатие + сдвиг» – BNS-образцы. Особенности разрушения слоистых металлополимерных соединений при разном напряженном состоянии могут быть изучены в испытаниях многослойных образцов на трехточечный изгиб.

2. Описан новый способ снижения концентрации напряжений на краях адгезионного слоя, который заключается в формировании выступающего за пределы контактной поверхности дополнительного объема адгезива в виде грибовидного буртика или небольшого наплыва.

3. Результаты исследований влияния напряженного состояния на прочность адгезионного соединения представлены в виде зависимостей предельной плотности энергии деформации от величины фазового угла в пространстве нормальных и касательных напряжений на поверхности адгезионного соединения.

4. В качестве критерия разрушения адгезионного соединения предложено считать достижение предельного значения плотности энергии деформации в условном микрообъеме, выделенном на границе адгезионного соединения. Предложены формулы для расчета эффективных упругих свойств выделенного микрообъема.

5. Особенности использования предложенных методик испытаний и обработки их результатов проиллюстрированы на примерах исследований адгезионных соединений «АМг5/ЭД-20/АМг5» и многослойных образцов «АМг6-НВП/ЭД-20/АМг6-НВП».

Библиографический список

1. Volinsky, A.A. Interfacial toughness measurements for thin films on substrates / A.A. Volinsky, N.R. Moody, W.W. Gerberich // Acta Materialia. – 2002. – Vol. 50. – P. 441–466. DOI: 10.1016/S1359-6454(01)00354-8

2. ГОСТ ISO 4674-1-2021. Материалы с резиновым или пластмассовым покрытием. Определение сопротивления раздиру. Часть 1. Методы испытания на раздир с постоянной скоростью. – М., 2001.

3. Chandran, S.M. Microbond fibre bundle pullout technique to evaluate the interfacial adhesion of polyethylene and polypropylene self reinforced composites / S. Chandran, K. Padmanabhan, // Applied Adhesion Science. – 2019. – Vol. 7(5) (2019). – P. 1–22. DOI:10.1186/s40563-019-0121-z

4. Handbook of Damage Mechanics. Nano to Macro Scale for Materials and Structures / ed. by George Z. Voyiadjis. – New York: Springer, 2022. – 1386 p. DOI: 10.1007/978-3-030-60242-0

5. Бондарчук, Д.А. Анализ параметров трещиностойкости на свободной границе в слоистых композитах / Д.А. Бондарчук, Б.Н. Федулов, А.Н. Федоренко, Е.В. Ломакин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. –2020. – № 4. – С. 49–59. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.05

6. Старостин, И.А. Современное состояние проблемы оценки адгезионного взаимодействия с применением термодинамических характеристик / И.А. Старостин, Н.В. Улитин, О.В. Стоянов // Клеи. Герметики. Технологии. – 2022. – № 1. – С. 8–14. DOI:10.31044/1813-7008-2022-0-1-8-14

7. Silva, L.F.M. Design of Adhesive Joints Under Humid Conditions / L.F.M. Silva, C. Sato // Advanced Structured Materials. – 2013. – Vol. 25. – P. 182. DOI: 10.1007/978-3-642-37614-6

8. Hybrid Adhesive Joints // Advanced Structured Materials / edit. L.F.M. da Silva, A. Pirondi, A. Öchsner. – Germany: Springer, 2011. – 317 p.

9. Banks-Sills, L. Interface Fracture and Delaminations in Composite Materials / L. Banks-Sills. – Cham: Springer, 2018. – 120 p. DOI:10.1007/978-3-319-60327-8

10. Analytical models of adhesively bonded joints – Part I: Literature survey / L.F.M. Silva, P. Neves, R. Adams, J. Spelt // International Journal of Adhesion & Adhesives. – 2009. – Vol. 29. – P. 319–330. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2008.06.005

11. Barberon, E. Determination of Material Properties for ANSYS Progressive Damage Analysis of Laminated Composites / E. Barberon, M. Shahbazi // Composite Structures. – 2017. – Vol. 176. – P. 768–779. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.05.074

12. Chaht, F.L. Using a Hashin Criteria to predict the Damage of composite notched plate under traction and torsion behavior / F.L. Chaht, M. Mokhtari, H. Benzaama. // Frattura ed Integrità Strutturale. – 2019 – Vol. 50. – P. 331–341. DOI:10.3221/IGF-ESIS.50.28

13. Gleich, D.M. Analysis and evaluation of bondline thickness effects on failure load in adhesively bonded structures / D.M. Gleich, M.J. L. Van tooren, A. Beukers // Journal of Adhesion Science and Technology. – 2001. – Vol. 15 (9). – P. 1091–1101. DOI:10.1163/156856101317035503

14. Schwalbe, K.H. Guidelines for Applying Cohesive Models to the Damage Behaviour of Engineering Materials and Structures / K.H. Schwalbe, I. Scheider, A. Cornec. – Berlin: Springer, Heidelberg, 2013. – 89 p. DOI: 10.1007/978-3-642-29494-5

15. Долгих, Д.А. Исследование закономерностей накопления повреждений и развития расслоения в полимерных композиционных материалах на основе двухуровневых моделей разрушения / Д.А. Долгих, М.А. Ташкинов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2020. – № 4. – С. 74–85. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.07

16. A review on failure theories and simulation models for adhesive joints / K.I. Tserpes, A. Barroso, P.A. Carraro, V.C. Beber, I.S. Floros, W. Gamon, M. Kozłowski, F. Santandrea, M. Shahverdi, D. Skejic, C. Bedon, V. Rajcic // The Journal of Adhesion. – 2021. – Vol. 98 (12). – P. 1–62. DOI: 10.1080/00218464.2021.1941903

17. Chen, Z. Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion / Z. Chen, R.D. Adams, Lucas F.M. da Silva // Engineering Fracture Mechanics. – 2011. – Vol. 78(6). – P. 990–1007. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2010.12.004

18. Arcan, L. SEM fractography of pure and mixed Mode interlaminar fracture in Graphite/Epoxy composites / L. Arcan, M. Arcan, L. Daniel // ASTM International. – 1987. – P. 41–67. DOI: 10.1520/STP25614S

19. Development of an improved adhesive test method for composite assembly design / J.Y. Cognard, P. Davies, B. Gineste, L. Sohier // Compos. Sci. Technol. – 2005. – Vol. 65(3). – P. 59–68. DOI: 10.1016/j.compscitech.2004.09.008

20. A stress concentration-free bonded arcan tensile compression shear test specimen for the evaluation of adhesive mechanical response / R. Créac'hcadec, L. Sohier, C. Cellard, B. Gineste // International Journal of Adhesion & Adhesives. – 2015. – Vol. 61. – P. 81–92. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2015.05.003

21. Effect of liquid nitrogen cooling on mechanical characteristics and fracture morphology of layer coal under Brazilian splitting test / P. Hou, Y. Xue, F. Gao, F. Dou, S. Su, C. Cai, C. Zhu // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 2022. – Vol. 151(19). – P. 105026. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.105026

22. Povolny, S.J. Numerical Brazilian disk testing of multiscale porous Ultra-High Temperature Ceramics / S.J. Povolny, G.D. Seidel, C. Tallon // Int. J. Solids Struct. – 2002. – Vol. 234–235(6). – P. 111262. DOI:10.1016/j.ijsolstr.2021.111262

23. Wang, C. Modified Generalized Maximum Tangential Stress Criterion for Simulation of Crack Propagation and Its Application in Discontinuous Deformation / C. Wang, S. Wang // Analysis. Eng. Fract. Mech. – 2022. – Vol. 259. – P. 108159. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2021.108159

24. Aliha, M.R.M.: Brittle fracture evaluation of a fine grain cement mortar in combined tensile-shear deformation / M.R.M. Aliha, M.R. Ayatollahi // Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct. – 2009. – Vol. 32(12). – P. 987–994. DOI: 10.1111/j.1460-2695.2009.01402.x

25. Chang, X. Cracking behaviours of layered specimen with an interface crack in Brazilian tests / X. Chang, T. Guo, S. Zhang // Eng. Fract. Mech. – 2020. – Vol. 228. – P. 106904. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2020.106904

26. Aminzadeh, A. On Brazilian disk test for mixed-mode I/II fracture toughness experiments of anisotropic rocks / A. Aminzadeh, A. Fahimifar, M. Nejati // Theor. Appl. Fract. Mech. – 2019. – Vol. 102. – P. 222–238. DOI: 10.1016/j.tafmec.2019.04.010

27. Smirnov, S.V. Modeling of delamination in multilayer metals produced by explosive welding under plastic deformation / S.V. Smirnov, I.A. Veretennikova, D.I. Vichuzhanin // Comput. Contin. Mech. – 2014. – Vol. 7(4). – P. 398–411. DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.4.38

28. Smirnov, S.V. The Effect of the Stress State, Testing Temperature, and Hardener Composition on the Strength of an AlMg5/Epoxy Metal Polymer Joint / S.V. Smirnov, D.A. Konovalov, D.I. Vichuzhanin, I.A. Veretennikova, A.V. Pestov, V.A. Osipova // Materials. – 2022. – Vol. 15 (20). – P. 7326. DOI: 10.3390/ma15207326

29. Zhang, X.P. Acoustic emission characteristics of the rock-like material containing a single flaw under different compressive loading rates / X.P. Zhang, Q. Zhang, S. Wu // Comput. Geotech. – 2017. – Vol. 83. – P. 83–97. DOI: 10.1016/j.compgeo.2016.11.003

30. Wu, S. Numerical analysis of the flattened Brazilian test: Failure process, recommended geometric parameters and loading conditions / S. Wu, J. Ma, Y. Cheng, M. Xu, X. Huang // Engineering Fracture Mechanics. – 2018. – Vol. 204. – P. 288–305. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2018.09.024

31. Тамуж, В.П. Разрушение конструкций из композитных материалов / В.Д. Протасов. – Рига: Зинатне, 1986. – 264 с.

32. Тарнопольский, Ю.М. Методы статических испытаний армированных пластиков / Ю.М. Тарнопольский, Т.Я. Кинцис. – М.: Химия, 1981. – 272 с.

33. Неупругие свойства композиционных материалов. Механика: новое в зарубежной науке / под ред. К. Гераковича, пер. с англ. Н.П. Жмудя, под ред. Ю.М. Тарнопольского. – М.: Мир, 1978. – 295 с.

34. Промышленные деформируемые, спеченные и литейные алюминиевые сплавы / ред. Ф.И. Квасов, И.Н. Фридляндер. – М: Металлургия, 1972. – 551 с.

35. Liechti, K.M. Asymmetric Shielding in Interfacial Fracture Under In-Plane Shear / K.M. Liechti, Y.S. Cha // J. Appl. Mech. – 1992. – Vol. 59. – P. 295–304. DOI: 10.1115/1.2899520

36. Wang, J.-S. Experimental determination of interfacial toughness curves using brazil-nut-sandwiches / J.-S. Wang, Z. Suo // Acta Metall. Mater. – 1990. – Vol. 38 (7). – P. 1279–1290. DOI: 10.1016/0956-7151(90)90200-Z

37. Thouless, M.D. Measurement and analysis of the fracture properties of adhesive joints / M.D. Thouless, Q.D. Yang // Adhesion Science and Engineering. – 2002. – Vol. 2. – P. 235–271. DOI: 10.1016/B978-0-444-51140-9.50034-2

38. Determination of the adhesive strength of a laminated glue material under three-point bending / S.V. Smirnov, I.A. Veretennikova, D.I. Vichuzhanin, A.V. Pestov // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2019. – Iss. 6. – P. 26–36. DOI: 10.17804/2410-9908.2019.6.026-036

References

1. Volinsky A.A., Moody N.R., Gerberich W.W. Interfacial toughness measurements for thin films on substrates. *Acta Materialia*, 2002, vol. 50, pp. 441-466. DOI: 10.1016/S1359-6454(01)00354-8

2. GOST ISO 4674-1-2021. Materialy s rezinovym ili plastmassovym pokrytiem. Opredelenie soprotivleniia razdiru. Chast' 1. Metody ispytaniia na razdir s postoiannoi skorost'iu [ISO 4674-1-2021 Rubber- or plastics-coated fabrics. Determination of tear resistance. Part 1. Constant rate of tear methods], Moscow, 2001.

3. Chandran, S.M., Padmanabhan K. Microbond fibre bundle pullout technique to evaluate the interfacial adhesion of polyethylene and polypropylene self reinforced composites. *Applied Adhesion Science*, 2019, Vol. 7(5) (2019), pp. 1-22. DOI: 10.1186/s40563-019-0121-z

4. Handbook of Damage Mechanics. Nano to Macro Scale for Materials and Structures. Ed. by George Z. Voyiadjis. New York: Springer, 2022, 1386 p. DOI: 10.1007/978-3-030-60242-0

5. Bondarchuk D.A., Fedulov B.N., Fedorenko A.N., Lomakin E.V. Analiz parametrov treshchinostoikosti na svobodnoi granitse v sloistykh kompozitakh [Analysis of crack resistance parameters at the free boundary in layered composites]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2020, no. 4, pp. 49-59. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.05

6. Starostin I.A., Ulitin N.V., Stoianov O.V. Sovremennoe sostoianie problemy otsenki adgezionnogo vzaimodeistviia s primeneniem termodinamicheskikh kharakteristik [Current state of the problem of assessing adhesive interaction using thermodynamic characteristics]. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2022, no. 1, pp. 8-14. DOI:10.31044/1813-7008-2022-0-1-8-14

7. Silva L.F.M., Sato C. Design of Adhesive Joints Under Humid Conditions. *Advanced Structured Materials*, 2013, vol. 25, 182 p. DOI: 10.1007/978-3-642-37614-6

8. Hybrid Adhesive Joints. *Advanced Structured Materials.* Edit. L.F.M. da Silva, A. Pirondi, A. Öchsner. Germany: Springer, 2011, 317 p.

9. Banks-Sills L. Interface Fracture and Delaminations in Composite Materials. Cham: Springer, 2018, 120 p. DOI: 10.1007/978-3-319-60327-8

10. Silva L.F.M., Neves P., Adams R., Spelt J. Analytical models of adhesively bonded joints – Part I: Literature survey. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2009, vol. 29, pp. 319-330. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2008.06.005

11. Barberon E., Shahbazi M. Determination of Material Properties for ANSYS Progressive Damage Analysis of Laminated Composites. *Composite Structures*, 2017, vol. 176, pp. 768-779. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.05.074

12. Chaht F.L., Mokhtari M., Benzaama H. Using a Hashin Criteria to predict the Damage of composite notched plate under traction and torsion behavior. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2019, vol. 50, pp. 331-341. DOI:10.3221/IGF-ESIS.50.28

13. Gleich D.M., Van tooren M.J. L., Beukers A. Analysis and evaluation of bondline thickness effects on failure load in adhesively bonded structures. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2001, vol. 15 (9), pp. 1091-1101. DOI: 10.1163/156856101317035503

14. Schwalbe K.H., Scheider I., Cornec A. Guidelines for Applying Cohesive Models to the Damage Behaviour of Engineering Materials and Structures. Berlin: Springer, Heidelberg, 2013, 89 p. DOI: 10.1007/978-3-642-29494-5

15. Dolgikh D.A., Tashkinov M.A. Issledovanie zakonomernostei nakopleniia povrezhdenii i razvitiia rassloeniia v polimernykh kompozitsionnykh materialakh na osnove dvukhurovnevykh modelei razrusheniia [Study of patterns of damage accumulation and development of delamination in polymer composite materials based on two-level models of destruction]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2020, no. 4, pp. 74-85. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.07

16. Tserpes K.I., Barroso A., Carraro P.A., Beber V.C., Floros I.S., Gamon W., Kozłowski M., Santandrea F., Shahverdi M., Skejic D., Bedon C., Rajcic V. A review on failure theories and simulation models for adhesive joints. *The Journal of Adhesion*, 2021, vol. 98 (12), pp. 1-62. DOI: 10.1080/00218464.2021.1941903

17. Chen Z., Adams R.D., Lucas F.M. da Silva. Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011, vol. 78(6), pp. 990-1007. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2010.12.004

18. Arcan L., Arcan M., Daniel L. SEM fractography of pure and mixed Mode interlaminar fracture in Graphite/Epoxy composites. *ASTM International*, 1987, pp. 41-67. DOI: 10.1520/STP25614S

19. Cognard J.Y., Davies P., Gineste B., Sohier L. Development of an improved adhesive test method for composite assembly design. *Compos. Sci. Technol*., 2005, vol. 65(3), pp. 59-68. DOI: 10.1016/j.compscitech.2004.09.008

20. Créac'hcadec R., Sohier L., Cellard C., Gineste B. A stress concentration-free bonded arcan tensile compression shear test specimen for the evaluation of adhesive mechanical response. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2015, vol. 61, pp. 81-92. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2015.05.003

21. Hou P., Xue Y., Gao F., Dou F., Su S., Cai C., Zhu C. Effect of liquid nitrogen cooling on mechanical characteristics and fracture morphology of layer coal under Brazilian splitting test. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci*., 2022, vol. 151(19), 105026 p. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.105026

22. Povolny S.J., Seidel G.D., Tallon C. Numerical Brazilian disk testing of multiscale porous Ultra-High Temperature Ceramics. *Int. J. Solids Struct*., 2002, vol. 234-235(6), 111262 p. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2021.111262

23. Wang C., Wang S. Modified Generalized Maximum Tangential Stress Criterion for Simulation of Crack Propagation and Its Application in Discontinuous Deformation. *Analysis. Eng. Fract. Mech*., 2022, vol. 259, 108159 p. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2021.108159

24. Aliha M.R.M., Ayatollahi M.R. Brittle fracture evaluation of a fine grain cement mortar in combined tensile-shear deformation. *Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct*., 2009, vol. 32(12), pp. 987-994. DOI: 10.1111/j.1460-2695.2009.01402.x

25. Chang X., Guo T., Zhang S. Cracking behaviours of layered specimen with an interface crack in Brazilian tests. *Eng. Fract. Mech*., 2020, vol. 228, 106904 p. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2020.106904

26. Aminzadeh A., Fahimifar A., Nejati M. On Brazilian disk test for mixed-mode I/II fracture toughness experiments of anisotropic rocks. *Theor. Appl. Fract. Mech*., 2019, vol. 102, pp. 222-238. DOI: 10.1016/j.tafmec.2019.04.010

27. Smirnov S.V., Veretennikova I.A., Vichuzhanin D.I. Modeling of delamination in multilayer metals produced by explosive welding under plastic deformation. *Comput. Contin. Mech*., 2014, vol. 7(4), pp. 398-411. DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.4.38

28. Smirnov S.V., Konovalov D.A., Vichuzhanin D.I., Veretennikova I.A., Pestov A.V., Osipova V.A. The Effect of the Stress State, Testing Temperature, and Hardener Composition on the Strength of an AlMg5/Epoxy Metal Polymer Joint. *Materials*, 2022, vol. 15(20), 7326 p. DOI: 10.3390/ma15207326

29. Zhang X.P., Zhang Q., Wu S. Acoustic emission characteristics of the rock-like material containing a single flaw under different compressive loading rates. *Comput. Geotech*., 2017, vol. 83, pp. 83-97. DOI: 10.1016/j.compgeo.2016.11.003

30. Wu S., Ma J., Cheng Y., Xu M., Huang X. Numerical analysis of the flattened Brazilian test: Failure process, recommended geometric parameters and loading conditions. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, vol. 204, pp. 288-305. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2018.09.024

31. Tamuzh V.P. Razrushenie konstruktsii iz kompozitnykh materialov [Destruction of structures made of composite materials]. Riga: Zinatne, 1986, 264 p.

32. Tarnopol'skii Iu.M., Kintsis T.Ia. Metody staticheskikh ispytanii armirovannykh plastikov [Methods of static testing of reinforced plastics]. Moscow: Khimiia, 1981, 272 p.

33. Neuprugie svoistva kompozitsionnykh materialov. Mekhanika: novoe v zarubezhnoi nauke [Inelastic properties of composite materials. Mechanics: new in foreign science]. Eds K. Gerakovicha, Iu.M. Tarnopol'skogo. Moscow: Mir, 1978, 295 p.

34. Promyshlennye deformiruemye, spechennye i liteinye aliuminievye splavy [Industrial wrought, sintered and cast aluminum alloys]. Eds. F.I. Kvasov, I.N. Fridliander. Moscow: Metallurgiia, 1972, 551 p.

35. Liechti K.M., Cha Y.S. Asymmetric Shielding in Interfacial Fracture Under In-Plane Shear. J. *Appl. Mech*., 1992, vol. 59, pp. 295-304. DOI: 10.1115/1.2899520

36. Wang J.-S., Suo Z. Experimental determination of interfacial toughness curves using brazil-nut-sandwiches. *Acta Metall. Mater*., 1990, vol. 38 (7), pp. 1279-1290. DOI: 10.1016/0956-7151(90)90200-Z

37. Thouless M.D., Yang Q.D. Measurement and analysis of the fracture properties of adhesive joints. *Adhesion Science and Engineering*, 2002, vol. 2, pp. 235-271. DOI: 10.1016/B978-0-444-51140-9.50034-2

38. Smirnov S.V., Veretennikova I.A., Vichuzhanin D.I., Pestov A.V. Determination of the adhesive strength of a laminated glue material under three-point bending. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2019, iss. 6, pp. 26-36. DOI: 10.17804/2410-9908.2019.6.026-036

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-29-00528).
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Вклад авторов равноценен.

Funding. The study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (project No. 24-29-00528).
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
The contribution of the authors is equivalent.