



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-100-106>
УДК 621.74; 621.792; 621.88

Поступила 22.03.2023
Received 22.03.2023

ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СКЛЕЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ МОДЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКТОВ

М. Л. КАЛИНИЧЕНКО, Б. М. НЕМЕНЕНОК, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: m.kalinichenko@bntu.by
А. Н. ГРИГОРЧИК, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 12

Работа посвящена оценке качества крепления абразивной составляющей к металлической основе методом склеивания на примере диска сцепления. Приведена оценка работоспособности запатентованной методики для испытаний на условный сдвиг склеенных соединений. Предложена методика использования вспененных материалов для создания разовых или единичных модельных комплектов с целью производства недостающих деталей для машиностроения.

Ключевые слова. Модельная оснастка, адгезивы, детали для модельных комплектов, механические испытания на сдвиг и сжатие.

Для цитирования. Калиниченко, М. Л. Оценка механических свойств склеенных элементов для модельных комплектов / М. Л. Калиниченко, Б. М. Немененок, А. Н. Григорчик // *Литье и металлургия*. 2023. № 2. С. 100–106. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-100-106>.

EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF GLUED ELEMENTS FOR MODEL KITS

M. L. KALINICHENKO, B. M. NEMENENOK, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: m.kalinichenko@bntu.by
A. N. GRIGORCHIK, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Science of Belarus, Minsk, Belarus, 12, Academicheskaya str.

The work is devoted to assessing the quality of fastening the abrasive component to the metal base by gluing on the example of a clutch disc. An assessment of the operability of the patented technique for testing for conditional shear of glued joints is given. The paper proposes a method of using foamed materials to create one-time or single model kits for the production of missing parts for mechanical engineering.

Keywords. Model tooling, adhesives, parts for model kits, mechanical shear and compression tests.

For citation. Kalinichenko M. L., Nemenenok B. M., Grigorchik A. N. Evaluation of mechanical properties of glued elements for model kits. *Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 2, pp. 100–106. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-100-106>.

Развитие техники требует использования новых конструкционных материалов, в том числе и неметаллических. В настоящее время возможности процессов получения композиционных материалов значительно расширяются. Применение слоистых композиционных материалов (материалы, структура которых состоит из набора чередующихся армирующих компонентов-слоев, жестко связанных между собой) позволяет повысить надежность и долговечность узлов, деталей, оборудования, а также сокращает расходы на использование дорогостоящих материалов, позволяет снизить массу готовой продукции, расходы на ремонт и техническое обслуживание.

Существуют некоторые необходимые условия формирования композиционных материалов [1–5]:

- 1) композит представляет собой сочетание хотя бы двух разнородных материалов с четкой границей раздела между фазами;
- 2) компоненты композиции образуют ее своим объемным сочетанием;
- 3) компоненты композиции должны обладать свойствами, которых нет ни у одного из ее компонентов в отдельности.

Таким образом, подбирая исходные компоненты объемов, можно управлять итоговыми параметрами композитного материала в целом по ряду значений (прочности, износостойкости, модуля упругости, вязкости и т. д.).

Основная часть

Существует несколько уже давно известных способов формирования композиционных материалов: газофазные, жидкофазные и твердофазные и новый способ создания композитов – аддитивный (рис. 1).

Однако при формировании композиционного материала может возникать проблема из-за несовместимости исходных компонентов (термодинамическая, кинетическая, химическая, механическая и т.д.). Данную проблему можно легко решить при помощи аддитивных технологий, которые могут быть эффективно использованы для создания слоистых композиционных материалов, состоящих из композиции трудносклеяемых традиционными способами материалов, а также при создании многослойных комбинаций на основе пористых и компактных тел.



Рис. 1. Классификация процессов получения композиционных материалов

Для надежной работы модельного комплекта необходим грамотный выбор крепления его отдельных составных элементов. В большинстве случаев для крепления элементов можно ограничиться шпонками, штифтами и болтами, но в случае соединения слоев модельного пластика данная технология не приемлема. Следовательно, в данных случаях актуальным является крепление элементов с помощью технологии склеивания. В зависимости от технологии формовки, типа формовочных материалов и связующих клеи могут испытывать различные силовые и температурные воздействия. Например, для использования в объектах авиаинженерии важна рабочая температура клея (высокая, низкая или с большими перепадами). В медицинской области первоочередным будет экологичность и не токсичность клеевого состава [6]. Для отдельных производителей необходимы клеи, способные работать в среде с повышенной влажностью или вообще в воде.

В процессе эксплуатации клеевые соединения воспринимают различные виды нагрузки, которые могут относиться к четырем основным типам: сдвиг, равномерный отрыв, внецентровой отрыв, отдир. При этом на практике готовое склеенное изделие будет чаще всего испытывать комбинированный тип нагрузок, т.е. условный сдвиг, смешанный отрыв и т.д. Как правило, все склеенные соединения модельных комплектов испытывают сжимающие либо сдвиговые нагрузки. Следовательно, актуальным является вопрос оценки способности склеенных соединений сопротивлению возникающим нагрузкам. Для определения сдвиговых деформаций были предложены приспособление и методика проведения испытаний [7, 8].

На первоначальном этапе испытываемые материалы заданных размеров и свойств пошагово соединяли в виде многокомпонентного композиционного сэндвича (рис. 2, а). В качестве основания использовали подложки, одновременно являющиеся опорными (несущими) составляющими образца.

В многослойной конструкции наружные слои, как правило, это основные несущие элементы, воспринимающие и равномерно распределяющие нагрузку, поэтому их рекомендуется изготавливать из компактного материала.

Внутри несущей компактной части размещали аналогичные по сечению испытываемые образцы, скрепленные заранее выбранным клеем. Важно, чтобы компактное основание обладало более высокими прочностными характеристиками, чем испытываемая склеенная композиция [9, 10]. Полученный композиционный блок крепили в приспособление с помощью резьбового соединения и фиксировали в разрывной машине. Далее прилагали нагрузку по оси сдвига до полного разрушения образца.

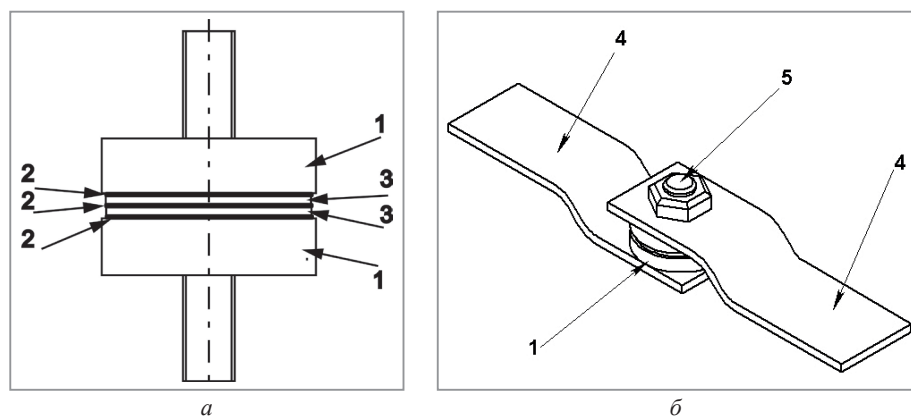


Рис. 2. Образец и приспособление для проведения механических испытаний многомерного композиционного соединения:
а – образец в собранном состоянии; *б* – образец, закрепленный в приспособление;
 1 – опорные подложки испытываемого образца; 2 – слой клея; 3 – набор исследуемых композиционных элементов;
 4 – пластина из высокопрочных материалов; 5 – гайка для крепления пластины к испытываемому образцу

Для оценки качества адгезионного соединения задавали определенную величину шероховатости поверхности и толщину адгезионного слоя.

Параметры испытываемых образцов в «сэндвиче» изменяли в зависимости от поставленной задачи. Толщина наборных образцов *A* (рис. 3) не должна превышать эпюры образцов по высоте для обеспечения удобства крепления их в держателях.

Предложенная методика позволяет рассматривать поведение соединений при приложении нагрузок на сдвиг, а также оценивать многомерные композиционные соединения в целом.

Для проверки универсальности предложенного метода были проведены испытания сложной композиционной сэндвич-системы (рис. 4), состоящей из комбинации: материал на органической связующей/клей/металл (ведомый диск сцепления).

Применяли испытательный стенд Instron 300LX. Данные обрабатывали с помощью программы Bluehill 2 (Великобритания). Испытания проводили в соответствии с Евразийским патентом [7].

Испытания клеевого слоя проводили по двум поверхностям. Скорость нагружения принимали 5 мм/мин, полное время приложения нагрузки составляло около 150 с для каждого образца. Время сопротивления образца № 1 нагрузке составило 130 с, образца № 2 – 145 с. График деформационных испытаний диска ведомого приведен на рис. 5.

Образец № 1 выдержал максимальную нагрузку 9,54 кН. Фото разрушенного образца № 1 представлено на рис. 6. Напряжение при максимальной нагрузке, исходя из площади разрушенной поверхности, составило 1,77 МПа.

Образец № 2 показал максимальную нагрузку, соответствующую 5,81 кН. Напряжение при максимальной нагрузке, исходя из площади разрушенной поверхности, составило 2,003 МПа.

В обоих случаях преобладал смешанный отрыв, так как на испытываемых подложках наблюдался когезионный отрыв по клею (следы клея остались на двух половинках образцов) и в некоторых случаях следы фрикционного материала наблюдались на одной из сторон.

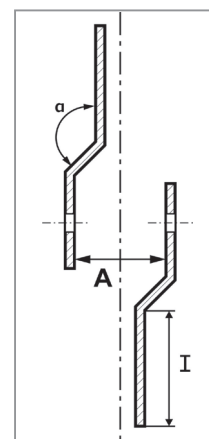


Рис. 3. Принципиальная схема приспособления для проведения испытаний на условный сдвиг

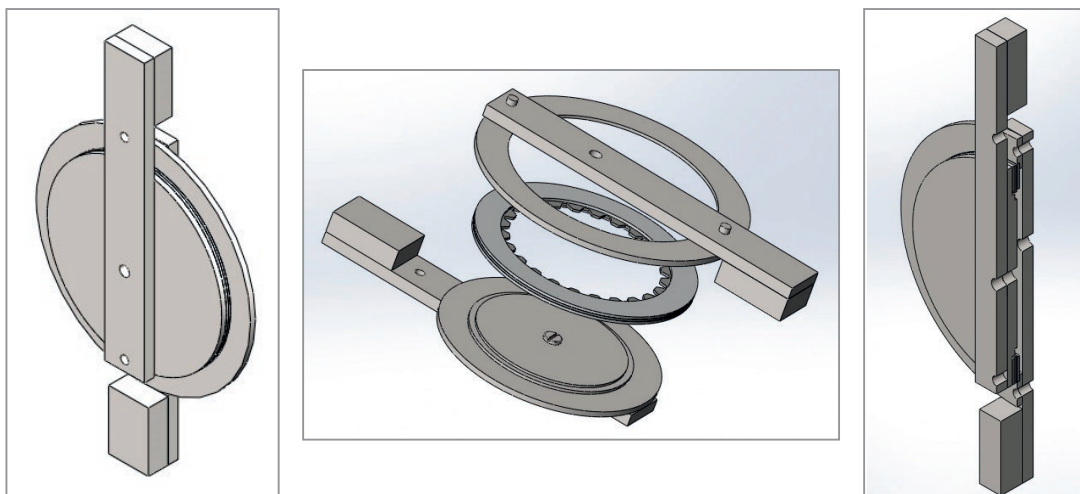


Рис. 4. Принципиальная схема приспособления для испытаний на сдвиг ведомого диска сцепления

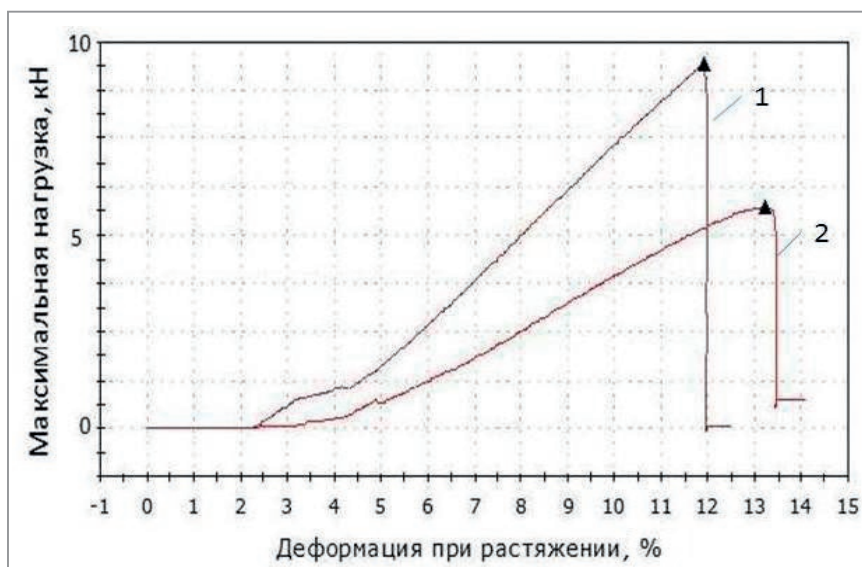


Рис.5. График деформационных испытаний диска ведомого



Рис. 6. Фото образца после проведения испытания

Испытания показали полную состоятельность предложенной методики. Расхождения в данных по испытаниям составили $\pm 10\%$, что обусловлено качеством проклейки фрикционной части к металлической матрице.

Для изучения сжимающих нагрузок были выбраны пористые материалы на основе алюминия, которые могут использоваться в качестве наполнителя для полых частей модельных комплектов, так как

отличаются заметно меньшей массой при сопоставимой прочности. Выбор пористой составляющей в качестве объекта изучения обусловлен сложной зависимостью взаимодействия пор и адгезионных составов, определяющихся жидкотекучестью клеев, размером и процентным содержанием поверхностных пор. Для изучения механизмов разрушения таких сложных комбинаций были изготовлены образцы на основе высокопористых материалов алюминия (рис. 7), соединенные между собой клеевыми составами на акриловой основе DP 8805NS, DP 8005NS и универсальным цианакрилатным суперклеем «Секунда 505». Испытания проводили на том же оборудовании.

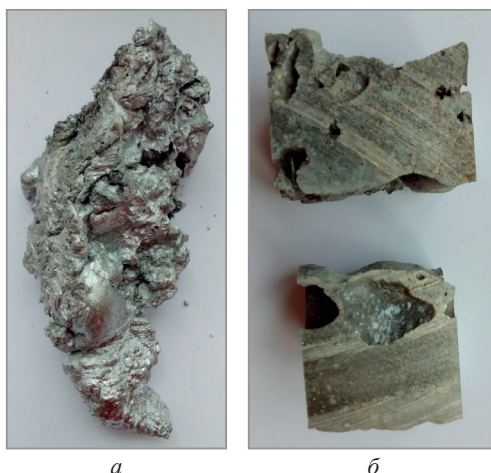


Рис. 7. Образцы вспененных материалов: *а* – не обработанный; *б* – механически обработанный

После приложения нагрузки в вертикальной плоскости было выявлено, что при использовании всех типов выбранных клеев не наблюдалось разрушение в зоне соединения (рис. 8), что показывает эффективность адгезионных составов. Например, при соединении образцов клеем DP 8805NS (рис. 8, *а*) не происходит разрушение клеевого шва, но видна деформация по вспененному материалу в месте приложения нагрузки, а именно сверху. При соединении образцов клеем DP 8005NS (рис. 8, *б*) наглядно видно смещение склеенных частей от оси без разрушения клеевого слоя. На образцах, склеенных универсальным цианакрилатным супер клеем «Секунда 505» (рис. 8, *в*), несмотря на его повышенную хрупкость, также не наблюдается разрушение клеевого шва, к тому же практически отсутствует смещение по оси.



Рис. 8. Образцы склеенных вспененных материалов после испытаний на сжатие:

а – образец, склеенный клеем DP 8805NS; *б* – образец, склеенный клеем DP 8005NS; *в* – образец, склеенный клеем «Секунда 505»

Графики деформации образцов при сжимающих нагрузках представлены на рис. 9. Из рисунка видно, что воспринимаемая образцами нагрузка до момента начала разрушения соответствует порядка 60–70 кН. Разброс полученных данных может быть объясним неравномерной пористостью склеенных вспененных материалов. Однако необходимо отметить близкие прочностные характеристики у испытанных образцов, которые колеблются в пределах 8–14%, что является вполне допустимым пределом для материала с различной степенью пористости. Это может зависеть как от прочностных характеристик исходного материала, так и от площади контакта склеенных образцов друг с другом.

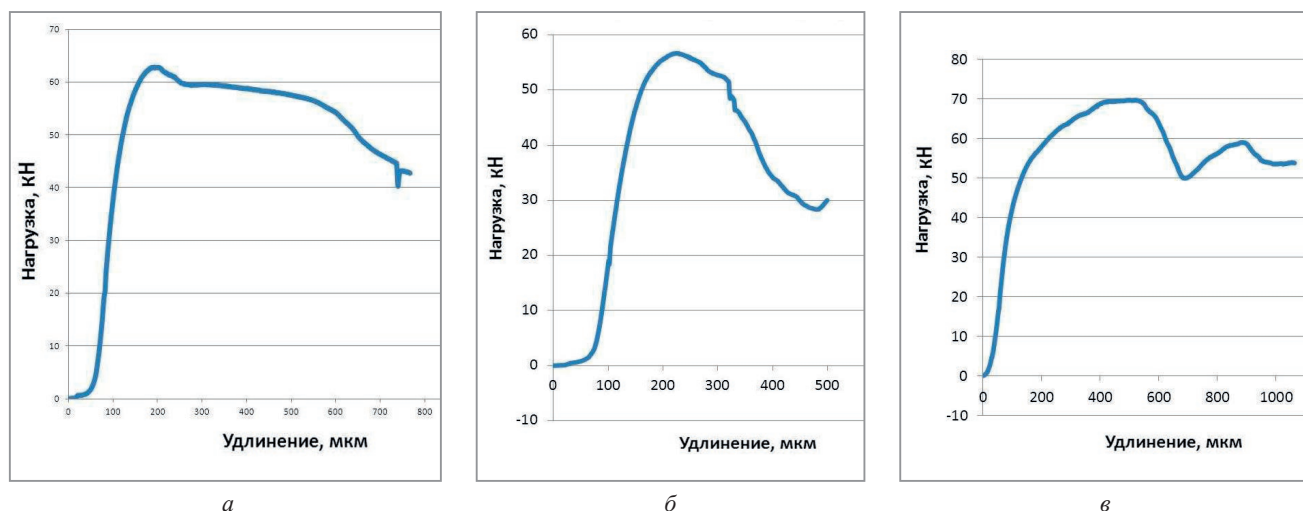


Рис. 9. Диаграмма изменения геометрических размеров образцов от приложенной нагрузки:
 а – образец, склеенный клеем DP 8805NS; б – образец, склеенный клеем DP 8005NS;
 в – образец, склеенный клеем «Секунда 505»

Кроме того, необходимо отметить подъем прочности на последних этапах сжатия. Это наблюдается практически во всех пористых материалах и соответствует разрушению первичных поверхностных пор, а также вступлению в «работу» следующего слоя. Данный эффект показывает цикличность действия вспененного материала и добавленных вставок из адгезионных составов.

Выводы

По результатам выполненных исследований показана эффективность проведенных испытаний на условный сдвиг, описанных в Евразийском патенте [7]. Данная методика эффективна для оценки свойств клеевого шва как простых образцов, так и для изделий сложной конфигурации промышленного назначения (на примере ведомого диска сцепления). Показано, что данный тип разрушающих испытаний позволяет оценить качество технологии склеивания на предприятии, основываясь на площади склеивания изделия, определяемой после разрушения испытываемых образцов.

Подтверждено, что современные адгезионные составы способны соединять трудноскрепляемые материалы, например высокопористые. Установлено, что при соблюдении технологии склеивания при сжимающих нагрузках возможно не только сохранение целостности клеевого шва склеенного образца, но и получение свойств таких образцов, соответствующих цельному материалу.

Выявлена зависимость деформационных процессов вспененного материала от физико-механических свойств адгезионного состава. Разработана методика визуальной оценки клеевого шва до и после приложения сжимающих нагрузок.

Установлено, что образцы склеенных вспененных материалов могут вести себя двояко: сходными с цельнолитыми материалами (рис. 9, б) и подобно классическим вспененным материалам, поглощающими нагрузки (рис. 9, в). Однако при создании модельных комплектов демпфирующие свойства материалов являются нежелательными, поскольку нарушается необходимая точность получаемого изделия. Следовательно, для решения поставленной задачи представляют интерес вспененные материалы определенной группы (рис. 9, б), которые при сохранении преимуществ, свойственных пористым телам (легкость, дешевизна и т. д.), могут вести себя наравне с цельнолитыми материалами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковтунов, А. И. Слоистые композиционные материалы / А. И. Ковтунов, С. В. Мямин, Т. В. Семистенова. Тольяти: Изд-во ТГУ, 2017. 75 с.
2. Материаловедение: учеб. для техн. вузов / Б. Н. Арзамасов [и др.]. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 648 с.
3. Композиционные материалы: справ. / В. В. Васильев [и др.]. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.
4. Карпов, Я. С. Композиционные материалы: компоненты, структура, переработка в изделия / Я. С. Карпов, О. В. Ивановская. Харьков: Национальный аэрокосмический ун-т, 2001. 153 с.
5. Батаев, А. А. Композиционные материалы: строение, получение, применение: учеб. пособ. / А. А. Батаев, В. А. Батаев. М.: Университетская книга; Логос, 2002. 400 с.
6. Вильнав, Ж. Ж. Клеевые соединения / Ж. Ж. Вильнав. М.: Техносфера, 2007. 385 с.

7. Метод и приспособление для испытаний на сдвиг многомерных соединений из композиций любых материалов, обладающих определяемым коэффициентом жесткости: пат. ЕАПО 036595 / М. Л. Калиниченко, В. А. Калиниченко, В. А. Кукареко, А. Е. Зелезей. Опубл. 25.10.2017.
8. **Калиниченко, М. Л.** Технология склеивания: теория, практика, материалы / М. Л. Калиниченко, Л. П. Долгий, В. А. Калиниченко. Минск: БНТУ, 2021. 187 с.
9. ГОСТ 14760 69. Клеи. Метод определения прочности при отрыве. М.: Изд-во стандартов, 1986. 6 с.
10. **Петрова, А. П.** Методы испытания клеевых соединений / А. П. Петрова // Все материалы: энцикл. справ. 2013. № 12. С. 25–30.

REFERENCES

1. **Kovtunov A. I., Mjamin S. V., Semistenova T. V.** *Sloistye kompozicionnye materialy* [Layered Composite Materials]. Tol'jatti, Izd-vo TGU Publ., 2017, 75 p.
2. **Arzamasov B. N.** *Materialovedenie* [Materials Science]. Moscow, Izd-vo MGTU imeni N. Je. Bauman Publ., 2001, 648 p.
3. **Vasil'ev V. V. i dr.** *Kompozicionnye materialy* [Composite materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990, 512 p.
4. **Karpov Ja. S., Ivanovskaja O. V.** *Kompozicionnye materialy: komponenty, struktura, pererabotka v izdelija* [Composite materials: components, structure, processing into products]. Har'kov, Nacional'nyj ajerokosmicheskij un-t Publ., 2001, 153 p.
5. **Bataev A. A., Bataev V. A.** *Kompozicionnye materialy: stroenie, poluchenie, primenenie* [Composite materials: structure, production, application]. Moscow, Universitetskaja kniga; Logos Publ., 2002, 400 p.
6. **Vil'nav Zh. Zh.** *Kleevye soedinenija* [Adhesive connections]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2007, 385 p.
7. **Kalinichenko M. L., Kalinichenko V. A., Kukareko V. A., Zelezj A. E.** *Metod i prisposoblenie dlja ispytanij na sdvig mnogomernyh soedinenij iz kompozicij ljubyh materialov, obladajushhih opredeljaemym koefefficientom zhestkosti* [Method and fixture for shear testing of multidimensional joints from compositions of any materials with a determinable stiffness coefficient]. Patent EAPO 036595, 2017.
8. **Kalinichenko M. L., Dolgij L. P., Kalinichenko V. A.** *Tehnologija skleivanija: teorija, praktika, materialy* [Bonding technology: theory, practice, materials]. Minsk, BNTU Publ., 2021, 187 p.
9. ГОСТ 14760 69. 1970. Клеи. Метод определения прочности при отрыве [Adhesives. Method for determining the strength at separation]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1986, 6 p.
10. **Petrova A. P.** Методы испытания клеевых соединений [Methods for testing adhesive joints]. *Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocnik = All materials. Encyclopedic reference*, 2013, no. 12, pp. 25 30.