

УДК 678+62-4+66-966.5

***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ОДИНАРНОГО КЛЕЕВОГО
СОЕДИНЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ ВНАХЛЕСТ С ОБРАЗЦАМИ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА***

Бороздина Е.А.

Студент 3 курса, Аэрокосмического факультет,

Кафедра “Механика композиционных материалов и конструкций”,

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

Пермь, Россия

Аннотация: определение прочности одинарного клеевого соединения образцов из полимерных композиционных материалов внахлест с образцами из титанового сплава. В ходе исследования была рассмотрено определение прочности, основные этапы подготовки образцов к склейке, методы неразрушающего контроля и проведено испытание на сдвиг одинарного клеевого соединения внахлест. В результате чего были выявлены наилучшие способы подготовки образцов перед склейкой, благодаря которым была получена высокая прочность клеевого соединения. С помощью данной технологии можно производить ремонт изделий из полимерных композитов, создавать необходимые конструкции для аэрокосмической промышленности, машиностроительной промышленности и не только.

Ключевые слова: клеевое соединение, прочность, полимерные композиционные материалы, методы неразрушающего контроля, испытание на сдвиг клеевого соединения.

***DETERMINATION OF THE STRENGTH OF A SINGLE ADHESIVE JOINT
OF SAMPLES MADE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS
OVERLAPPING WITH SAMPLES MADE OF TITANIUM ALLOY***

Borozdina E.A.

3th year student, Aerospace Faculty,

Department of “Mechanics of Composite Materials and Structures”,

Perm National Research Polytechnic University,

Perm, Russia

Abstract: determination of the strength of a single adhesive joint of samples made of polymer composite materials overlapping with samples made of titanium alloy. In the course of the study, the determination of strength, the main stages of preparing samples for gluing, methods of non-destructive testing were considered and a shear test of a single adhesive overlap joint was carried out. As a result, the best methods of preparing samples before gluing were identified, thanks to which a high strength of the adhesive joint was obtained. With the help of this technology, it is possible to repair products made of polymer composites, create the necessary structures for the aerospace industry, the machine-building industry and not only.

Keywords: adhesive joint, strength, polymer composite materials, non-destructive testing methods, shear testing of adhesive joint.

Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) – многокомпонентные материалы, имеющие в составе полимерную матрицу и армирующий наполнитель, такой как: порошки, волокна. Из ПКМ изготавливают большой спектр изделий начиная от бытовых, таких как теннисные ракетки и удочки, до изделий, используемых в машиностроении, авиации и космонавтике (корпуса самолетов, ракет, автомобилей, лопасти вентиляторов, лопасти винтов вертолетов и т.д.).

В настоящее время ПКМ все шире используется в разных изделиях и конструкциях, заменяя металл. Так как изделия из ПКМ обладают высокой

прочностью, малым весом, низкой плотностью, устойчивостью к воздействию внешних факторов, таких как: морская вода, органические растворители, щелочи, кислоты и т.д. Также они обладают высокой вибростойкостью, нечувствительностью к магнитному полю, радиопрозрачностью, благодаря чему их широко используют в авиа- и ракетостроении. Однако, они не могут эксплуатироваться при очень высоких температурах, так как современные полимерные связующие сохраняют свои свойства до 400°C.

Иногда, для изготовления определенных конструкций или ремонта, производят склейку ПКМ с различными материалами. Использование таких гибридных конструкций связано со многими преимуществами клеевого соединения по сравнению с другими методами соединения, такими как гибкость в процессе сборки, снижение веса и не только. При этом клеевые соединения могут быть разных видов (одинарные и двойные внахлест, косые швы, одинарные L-образные и T-образные швы и т.д.), поэтому необходимо проводить испытания на прочность таких соединений, используя различные виды клеев и разные виды склейки.

В данной работе будут определены прочностные характеристики клеевого соединения образцов из ПКМ с образцами из титанового сплава, так как это необходимо для производства рабочих лопаток вентиляторов (РЛВ) в авиационных двигателях.

Раньше в качестве основного материала для изготовления РЛВ использовали титановые сплавы, но из-за значительного удельного веса, повышенной усталостной прочности, большой жесткости в направлении армирования стали стремиться использовать композиты [2].

Однако не всегда возможно полностью заменить металлические детали на композитные. Ведь если полностью заменить металлы композитами, можно столкнуться с большими техническими и технологическими проблемами, поэтому разработка стыковочных элементов композитных и металлических частей изделия очень актуальна в настоящее время.

Склеивание конструкционными клеями относится к основным видам неразъемного соединения при изготовлении элементов конструкций летательных аппаратов, так как обеспечивает легкость конструкции, является наиболее простым и дешевым технологическим способом соединения.

Целью данной работы является определение наилучшего способа подготовки образцов из ПКМ и сплава титана, для обеспечения высокой прочности одинарного клеевого соединения внахлест, путем проведения испытаний на Zwick Z100.

Основная часть

Во многом прочность клеевого соединения зависит от качества контактирующих поверхностей. Одними из основных параметров склейки металла и композита является подбор клеевого состава, а также определение наилучшего способа подготовки поверхностей металла и композита перед склейкой. Данные параметры являются ключевыми, в связи с чем необходимо исследовать склейку металла и композита с разными клеями и с разными способами подготовки поверхности.

Определение прочности

Пределом прочности на сдвиг τ является максимальное растягивающее усилие F [Н] при котором происходит разрушение клеевого соединения, отнесенное к площади склеивания S [м²] и вычисляется по формуле (1):

$$\tau = \frac{F}{S} \text{ [Па]} \quad (1)$$

Среднее арифметическое значение предела прочности при сдвиге τ вычисляется по формуле (2):

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n} \quad (2)$$

где τ_i – значение предела прочности при сдвиге для каждого образца, [Па];

n – число образцов для испытаний.

Испытания на сдвиг при растяжении является наиболее распространенным, как в России, так и за рубежом, это связано с простотой их проведения.

Прочность клеевого соединения, при воздействии нагрузок и климатических факторов, определяется испытаниями образцов. Определение прочности клеевого соединения на сдвиг проводится на основе Российского стандарта ГОСТ Р 57066-2016 «Метод определения прочности при сдвиге клеевого соединения внахлест» [1]. Данный стандарт определяет порядок определения прочности при сдвиге клеевого соединения внахлест, связывающего между собой пластины из ПКМ или пластину из ПКМ с пластиной из металла. Материалы для изготовления образцов: препрег углепластика марки ВКУ-60/ВТкУ-2.200 и титановый сплав ВТ6. Для выполнения клеевого соединения применяются клеи горячего отверждения, такие как ВК-36, ВК-102А, ВК-36А.

Метод испытания заключается в определении величины разрушающей нагрузки. Чтобы определить предел прочности при сдвиге соединения внахлестку, необходимо создать сдвигающее действие на клеевое соединение между склеиваемыми пластинами образца. Разрушение образца возможно из-за снижения адгезионной прочности или снижения когезионной прочности. При этом разрушение деталей обычно происходит из-за снижения адгезионной прочности, поэтому для повышения адгезионной прочности клеевого соединения необходимо обеспечить минимальную толщину клеевого слоя, но при этом достаточную для склейки. Так как при минимальной толщине клеевого соединения сила взаимного поверхностного сцепления между клеем и склеиваемой поверхностью достигает максимальной величины и превышает внутренние силы сцепления частиц склеиваемых материалов. Далее обозначим определения адгезионной и когезионной прочности.

Адгезионная прочность – это прочность клеевого соединения, которая определяется силами сцепления клея с соединяемым им материалом, необходимая для разрушения адгезионного соединения. На рис. 1 представлена схема адгезионного взаимодействия в теле.

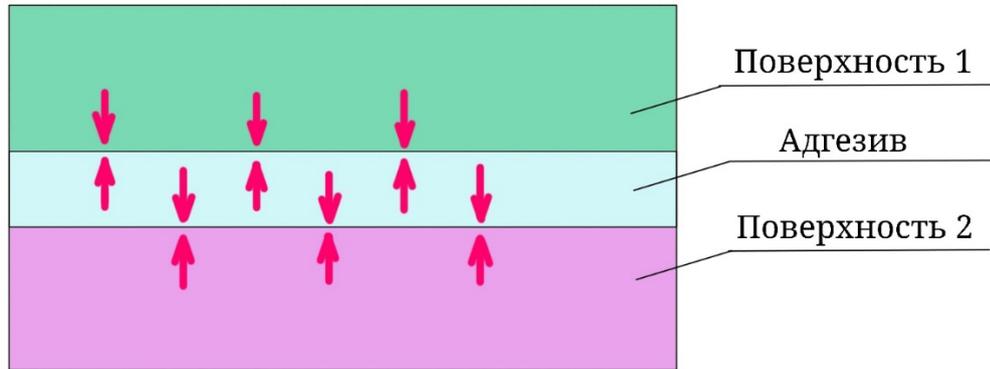


Рис. 1 – Схема адгезионного взаимодействия в теле

Авторская разработка

Когезионная прочность — это прочность клеевого соединения, которая определяется силами сцепления молекул клея между собой, необходимая для разрушения клеевого слоя. На рис. 2 представлена схема когезионного взаимодействия в теле.

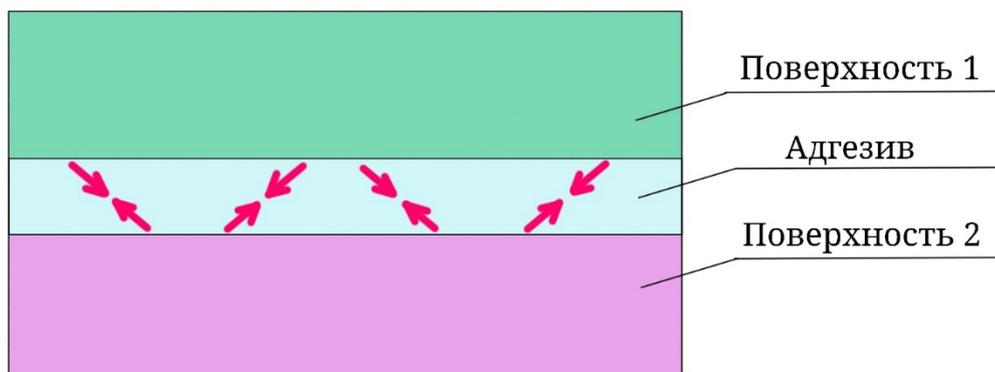


Рис. 2 – Схема когезионного взаимодействия в теле

Авторская разработка

Необходимо учесть, что для определения прочности при сдвиге клеевого соединения внахлест нужно испытать не менее пяти образцов.

Подготовка образцов

Очень важной частью при склеивании образцов является подготовка поверхности. Так как от качества обработки будет зависеть прочность соединения.

Подготовка поверхности под склеивание – это любой механический, химический или электрохимический процесс, который изменяет поверхность детали или изделия, делая ее более активной при контакте с клеем. Прочность и надежность склеивания в значительной мере зависит от адгезии между клеем и соединяемыми поверхностями [9].

Повысить адгезионную прочность можно путем придания поверхности шероховатости, так как увеличивается фактическая площадь соединения и уменьшается скорость распространения усталостных трещин, а также большей диссипацией в процессе деформации фрагмента клеевого материала, находящегося непосредственно в микронеровностях.

Для того, чтобы клеевое соединение было наиболее прочным, после механической обработки необходимо очистить поверхность от пыли жесткой кистью и обдуть сжатым воздухом. Затем нужно обезжирить поверхность нефрасом и ацетоном, а поверхность металла окисью магния) [6].

Этапы подготовки образцов перед испытанием на прочность клеевого соединения:

- Механическая обработка (пескоструйная обработка, абразивная обработка) [3];
- Фосфатирование поверхность металла (предание шероховатости химическим путем);
- Очистка (жесткая кисть и сжатый воздух);
- Обезжиривание (нефрас и ацетон, окись магния для металла);
- Нанесение полиимидной пленки (для предотвращения затеков клея);
- Нанесение клеевой пленки;

- Сборка образцов в оснастке;
- Отверждение клеевого соединения (в электрической печи при температурах от 170 до 180 и скоростью от $1,5^{\circ}\pm 0,3$ °С/мин);
- Охлаждение;
- Контроль образцов (геометрические параметры, акустические методы неразрушающего контроля);

Неразрушающие методы контроля

К наиболее распространенным видом неразрушающего контроля клеевых соединений из ПКМ относится акустический, в него входит ультразвуковой, теневой, эхо метод и другие.

Все они основаны на распространении акустических волн внутрь конструкции для определения дефектов и неровностей. В качестве оборудования используются УЗ-преобразователи, дефектоскопы и толщиномеры [4].

При теневом методе используются два преобразователя, которые являются излучателем и приемником и устанавливаются с двух сторон конструкции. Такой метод наиболее точный, но нужно иметь двухсторонний доступ к контролируемой детали, что иногда невозможно и необходимо, чтобы преобразователи были соосны (для этого используют специальные скобы или системы ориентации), что значительно повышает стоимость проведения контроля [7].

В эхо-методе используется один преобразователь, служащий и излучателем, и приемником, благодаря чему снижается стоимость. Дефекты определяются путем отражения от них акустической волны. Благодаря данному методу можно определять толщину, длину, сплошность материала, а также, нет необходимости совмещать оси, как в теневом методе, что значительно ускоряет процесс контроля [7].

Испытание на сдвиг

Объектом исследований прочности клеевого соединения являются образцы, на которых проводятся тестовые испытания (рис.3). Цель испытаний образцов с разными способами исполнения клеевого соединения - определение способов подготовки поверхностей металла и композита, которые обеспечат надежное клеевое соединение.

Метод испытания заключается в определении величины разрушающей нагрузки. Предел прочности при сдвиге соединения внахлестку определяется путем создания сдвигающего действия на клеевое соединение между склеиваемыми пластинами образца. Образец для испытаний на сдвиг клеевого соединения представлен на рис.3.

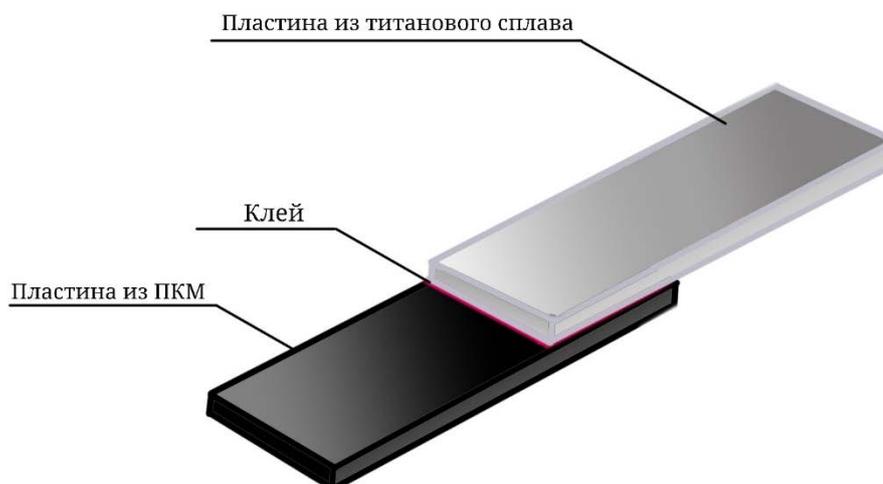


Рис. 3 – Образец для испытаний на сдвиг клеевого соединения

Авторская разработка

В данном испытании мы будем использовать образцы с разными видами обработки перед склеиванием, чтобы оценить какой вид подготовки нужно использовать, чтоб получить наибольшую прочность соединения. Всего будет 4 вида образцов:

1. Пескоструйная обработка пластины из ПКМ и пескоструйная обработка пластины из титанового сплава, в дальнейшем будут обозначаться 1.1-1.3;

2. Обработка шлифовальной шкуркой пластины из ПКМ и пескоструйная обработка пластины из титанового сплава, в дальнейшем будут обозначаться 2.1-2.3;

3. Пескоструйная обработка пластин из ПКМ и пескоструйная обработка с последующим фосфатированием платин из титанового сплава, в дальнейшем будут обозначаться 3.1-3.3;

4. Обработка шлифовальной шкуркой пластин из ПКМ и пескоструйная обработка с последующим фосфатированием платин из титанового сплава, в дальнейшем будут обозначаться 4.1-4.3.

В общем случае клеевые слои демонстрируют максимальную прочность при нагружении усилием сдвига. Стандартный метод испытаний для оценки прочности клеевых соединений при сдвиге описан в ASTM D1002. Поверхность образцов подлежащих склеиванию, подвергают обработке в соответствии с рекомендациями. Далее клей наносят на тот участок образца, на котором должна быть нахлестка. Пастообразные клеи наносят сразу на два образца перед их склеиванием, а пленочные только на один. Фиксация образцов может осуществляться при помощи зажимов по краям зоны соединения или с помощью вакуумного мешка. Далее проводят отверждение при необходимых условиях для данного клея [5].

После полного затвердевания клея, образец закрепляют в универсальной испытательной машине Zwick Z100 при комнатной температуре (+23°C), со скоростью нагружения 2 мм/мин. При установке образца в испытательную машину расстояние между захватами должно быть (75±1) мм, при этом каждая пластина образца для испытаний должна удерживаться в захватах глубиной не менее 25 мм. После установки образца проводится его нагружение с заданной скоростью путем перемещения активного захвата. Нагружение образца производят до момента разрушения (рис. 4).

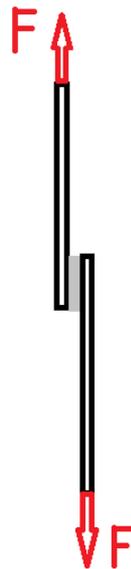


Рис. 4 – Схема нагружения образца в испытательной машине.

Авторская разработка

После разрушения образца производится фиксация наибольшей нагрузки, достигнутой при испытании, и обработка результатов.

Для анализа прочности адгезионного соединения были проведены тестовые испытания образцов на сдвиг. Для каждого комбинированного способа подготовки поверхностей пластин из титанового сплава и ПКМ была испытана группа образцов в количестве из трех штук. В процессе испытаний регистрировалось усилие нагружения и перемещение захватов испытательной машины.

Результаты испытаний представлены в таблице 1, где l и b : длина и ширина образца в месте клеевого соединения соответственно, S – площадь поперечного сечения, F – разрушающая нагрузка, σ – напряжение сдвига клеевого соединения.

Таблица 1 – результаты испытаний образцов с разными способами подготовки поверхностей.

Обозначение	l , mm	b , mm	S , mm ²	F max kN	σ , МПа
1.1	24,79	25,17	624	11,31	18,1
1.2	25,31	25,03	633,5	12,21	19,3
1.3	24,76	25,32	626,9	12,21	19,5

2.1	25,24	25,39	640,8	9,99	15,6
2.2	25,05	25,25	632,5	11,07	17,5
2.3	24,96	25,43	634,7	11,36	17,9
3.1	25,16	25,32	637,05	10,96	17,2
3.2	25,02	25,29	632,76	11,97	18,91
3.3	25,04	25,42	636,52	11,16	17,54
4.1	24,96	25,67	640,72	11,94	18,64
4.2	25,14	25,24	634,53	12,19	19,22
4.3	24,68	25,32	624,9	12,44	19,9

Детально можно рассмотреть диаграммы деформирования серий образцов (рис.5 – рис.8).

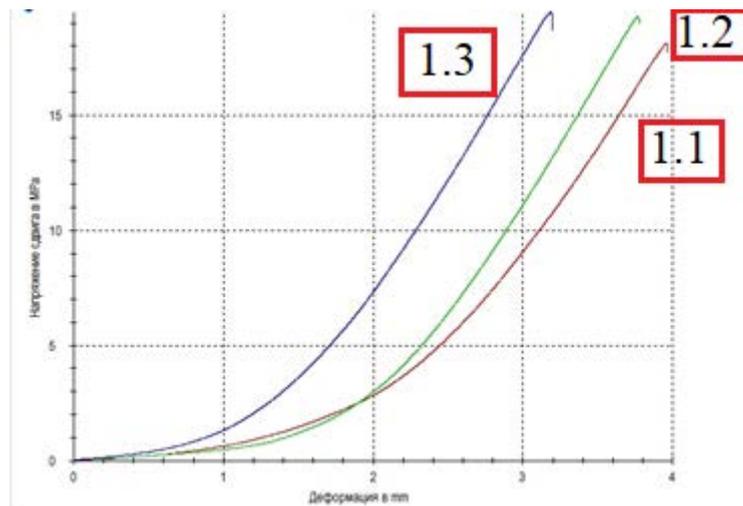


Рис. 5 – Диаграмма деформирования образцов с пескоструйной обработкой поверхностей пластин из ПКМ и титанового сплава после проведения испытаний

Авторская разработка

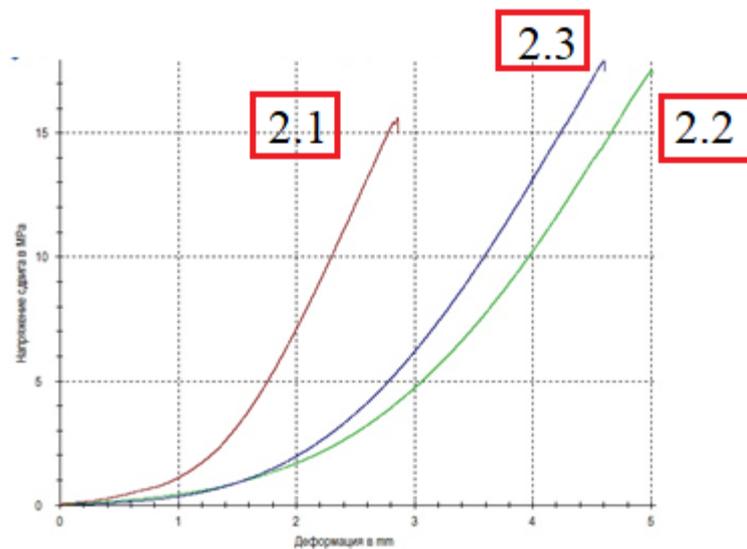


Рис. 6 – Диаграмма деформирования образцов с обработкой поверхностей пластин из ПКМ шлифованием и пескоструйной обработкой поверхностей пластин из титанового сплава после проведения испытаний

Авторская разработка

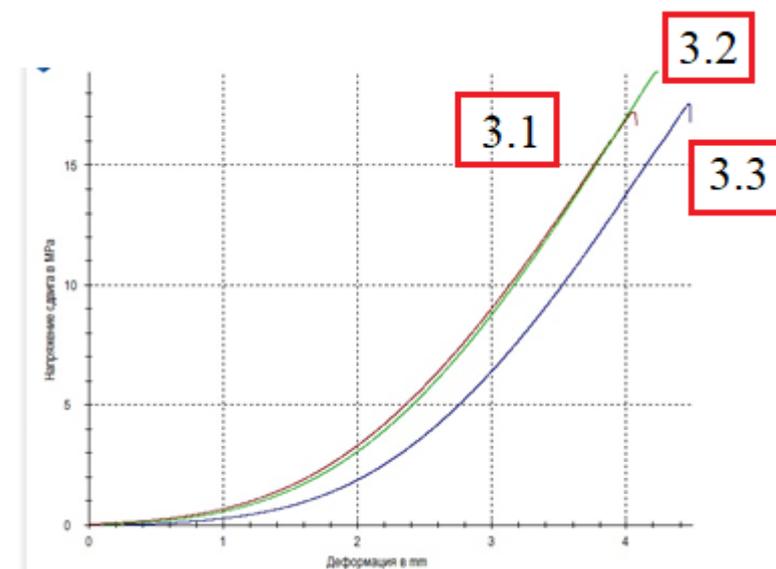


Рис. 7 – Диаграмма деформирования образцов образцы с обработкой поверхностей пластин из ПКМ шлифованием и пескоструйной обработкой с последующим фосфатированием поверхностей пластин из титанового сплава после проведения испытаний

Авторская разработка

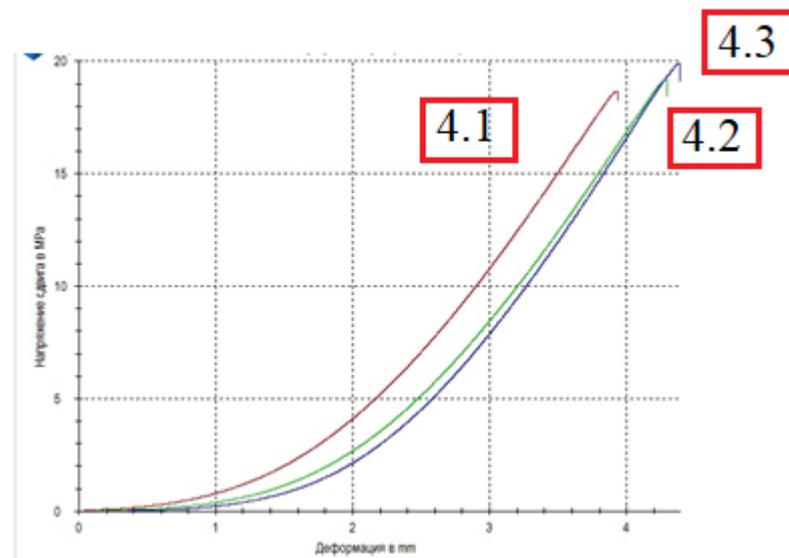


Рис.8 – Диаграмма деформирования образцов с пескоструйной обработкой поверхностей пластин из ПКМ и пескоструйной обработкой с последующим фосфатированием поверхностей пластин из титанового сплава после проведения испытаний

Авторская разработка

При проведении испытаний, на образцах серий 2 и 3 были видны множественные вырывы волокон пластин из ПКМ, что может свидетельствовать о нарушении прочности композиционного материала во время шлифования. На образцах серий 1 и 4, где образцы из ПКМ подвергались пескоструйной обработке вырывы волокон также присутствовали, однако их количество было намного меньше чем на пластинах, обработанных шлифованием.

По результатам испытаний было вычислено среднее напряжение сдвига клевого соединения для каждой группы образцов, представленное в таблице 2.

Таблица 2 – напряжение сдвига клевого соединения образцов

Параметр сравнения	1.1-1.3	2.1-2.3	3.1-3.3	4.1-4.3
Напряжение сдвига клевого соединения, МПа	18,9	16,9	17,8	19,3

Анализируя напряжение сдвига клеевого соединения каждой группы образцов, было выявлено, что наилучшие результаты получены при пескоструйной обработке поверхностей пластин из ПКМ и титанового плава, где напряжение сдвига составляет 18,9 МПа и при пескоструйной обработке пластин из ПКМ и титанового сплава с последующим фосфатированием, где напряжение сдвига составляет 19,3 МПа.

По результатам испытания групп образцов с разными способами обработки пластин на сдвиг клеевого соединения можно сделать вывод, что с точки зрения прочности клеевого соединения наилучшими способами подготовки являются пескоструйная обработка поверхностей пластин из титанового сплава и из ПКМ, а также пескоструйная обработка пластин из ПКМ и пескоструйная обработка с последующим фосфатированием пластин из титанового сплава.

Заключение

Были проведены испытания на сдвиг для определения прочности клеевого соединения. В ходе испытания, наивысший результат по прочности был получен при пескоструйной обработке пластин из ПКМ и титанового сплава с последующим фосфатированием. Однако данный способ будет более затратный, так как будут использоваться дополнительно фосфатирующие составы, которые к тому же нужно правильно утилизировать.

Исходя из этого, можно прийти к выводу, что наилучшим способом подготовки поверхностей является пескоструйная обработка поверхности пластин из титанового сплава и из ПКМ.

Данный выбор наилучшего способа обусловлен малым временем подготовки поверхностей, отсутствием специально утилизируемых отходов и высокими значениями прочности клеевого соединения.

Публикация подготовлена в рамках образовательной программы ПНИПУ по учебной дисциплине [8].

Библиографический список

1. ГОСТ Р 57066-2016 Композиты полимерные. Метод определения прочности при сдвиге клеевого соединения внахлест: дата введения 01.03.2017. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 11 с.
2. Каримбаев Т., Луппов А., Афанасьев Д. Рабочие лопатки вентилятора из углепластика для перспективных двигателей // Двигатель. 2012.
3. Козулько Н.В. Механизация абразивной обработки деталей из полимерных композитных материалов под операцию склеивания // Advanced Engineering Research. 2018. №2.
4. Мурашов, В.В. Неразрушающий контроль клеевых соединений / В.В. Мурашов // Клеи. Герметики. Технологии. – Москва : ВИАМ, 2008. – С. 19.
5. Поциус, А.В. Клеи, адгезия, технология склеивания / А.В. Поциус. – под ред. д-ра техн. наук, проф. Г.В. Комарова. – Санкт-Петербург : Профессия, 2007. – 376 с.
6. Савельев А.В., Кустов А.Е., Чернов О.И. Технологии промышленной очистки: техн. Пособие/ Научно-техническая компания «Солтек». – М., 2014. – 75 с.
7. Система неразрушающего контроля. Виды (методы) и технология неразрушающего контроля. Термины и определения: Справочное пособие. Серия 28. Выпуск 4 / Колл.авт. - М.: Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2003.
8. Строительная механика, динамика и устойчивость композитных конструкций: учебное пособие/ Чекалкин А. А., Палкин Д. Д.; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. -Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2021. - 230 с.
9. Тулинов А. Б., Шубенков А. В. Влияние модифицирования поверхности на адгезионную прочность соединений металлов с композиционными материалами // Сервис в России и за рубежом. 2014. №1 (48).

Оригинальность 86%

