

**КИНЕТИКА РАЗРУШЕНИЯ  
АДГЕЗИОННОГО КОНТАКТА ОТ  
ВРЕМЕНИ НАГРУЖЕНИЯ**

**Юсупов Зарифджон Нематджонович**, к.физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой электроники ГОУ «ХГУ имени акад.Б. Гафурова» (Таджикистан, Худжанд)

**КИНЕТИКАИ ВАЙРОНШАВИИ  
АЛОҚАҲОИ АДГЕЗИОНӢ АЗ ВАҚТИ  
БОРГУЗОРӢ**

**Юсупов Зарифҷон Нематҷонович**, н.и.физ.-мат., дотсент, мудири кафедраи электроникаи факултети физикаю техникаи МДТ «ДДХ ба номи акад.Б. Гафуров» (Тоҷикистон, Хуҷанд)

**KINETICS OF DESTRUCTION OF  
ADHESIVE CONTACT AS A  
FUNCTION OF LOADING TIME**

**Yusupov Zarifjon Nematjonich**, Candidate Of Physical-Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Electronics, Faculty of Physics and Technology, SEI "KhSU named after acad. B.Gafurov",  
**E-mail:** zarif\_1972@mail.ru

**Ключевые слова:** адгезионные контакты (АК), композиционные материалы (КМ), внешние факторы, температура, влажность, радиация, прочность, разрушение, адгезив, трещина, термоцикл, образцы, свойства

В статье впервые систематически исследовались длительная прочность и разрушение адгезионных контактов в условиях действия внешних факторов на микроскопическом уровне, что позволяет выявить наиболее общие закономерности разрушения адгезионных соединений в композиционных материалах. Результаты подобных исследований, в конечном итоге, дают возможность прогнозировать не только долговечность реальной конструкции с учётом действия внешних факторов, но и прогнозировать свойства проектируемого композиционного материала или элемента конструкции.

**Калидвожаҳо:** алоқаҳои адгезионӣ, масолеҳҳои таркибӣ, омилҳои беруна, ҳарорат, намӣ, радиатсия, мустаҳкамӣ, вайроншавӣ, адгезив, тараққишҳо, сикли ҳарорат, намунаҳо, ҳосият. Дар мақола бори аввал таҳқиқи мунтазами мустаҳкамии дарозумрӣ ва вайроншавии АА дар зерӣ таъсири омилҳои беруна дар сатҳи микроскопӣ имкон медиҳад, ки қонунҳои умумии вайроншавии пайвандҳои адгезионӣ дар маводи композитӣ омӯхта муайян карда шудааст. Натиҷаҳои ингуна тадқиқотҳо дар ниҳояти қор имкон медиҳанд, ки на танҳо мустаҳкамии сохтори воқеӣ бо дарназардошти таъсири омилҳои беруна пешгӯӣ карда шавад, балки пешгӯӣ ва муайян кардани ҳосиятҳои маводҳои таркибӣ ё элементҳои конструксионӣ пешбинӣ карда шавад.

**Keywords:** adhesive contacts (AC), composite materials (CM), external factors, temperature, humidity, radiation, strength, destruction, adhesive, crack, thermal cycle, samples, properties

The article was the first to systematically study the long-term strength and destruction of AC under the influence of external factors at the microscopic level, which makes it possible to identify the most general patterns of destruction of adhesive joints in composite materials. The results of such studies ultimately make it possible to predict not only the durability of a real structure taking into account the action of external factors, but also to predict the properties of the designed composite material or structural element.

Адгезионные контакты (АК) находят широкое применение в различных отраслях современного наукоёмкого производства, таких как машино- и судостроение, электроника, приборостроение, авиакосмическая техника, а также в производстве мебели, кожевенно-обувной промышленности, производстве товаров повседневного спроса и т.д. Технологичность организации АК, возможность в широких пределах регулировать их физические и функциональные свойства делает их привлекательными, а порой единственно возможным способом соединения элементов различных конструкций. АК являются структурными элементами современных композиционных материалов (КМ). Очевидно, работоспособность и долговечность механизмов, где «работают» АК и композиты [1, с.112], во многом зависят от прочности и долговечности АК. Последние зависят не только от природы адгезионных пар и адгезивов, но и от интенсивности воздействия внешних факторов (механической нагрузки, температуры, влажности, радиации и пр.). Несмотря на достаточно большое количество

публикаций по данной тематике, влияние указанных факторов на прочность и долговечность АК, как правило, определяют опытным путём. Поэтому исследование влияния внешних факторов на прочность и процесс разрушения АК является актуальной задачей современной науки и технологии [2, с.145-156].

Систематическое исследование длительной прочности и разрушения АК в условиях действия внешних факторов на микроскопическом уровне позволяет выявить наиболее общие закономерности разрушения адгезионных соединений в композиционных материалах. Результаты подобных исследований, в конечном итоге, дают возможность прогнозировать не только долговечность реальной конструкции с учётом действия внешних факторов, но и прогнозировать свойства проектируемого композиционного материала или элемента конструкции.

Анализ литературы [3, с.665-671; 6, с.98-100] по проблеме прочности композитов и АК показывает, что до настоящего времени вопросам влияния внешних факторов на прочность и разрушение АК уделялось недостаточно внимания. Имеющиеся в литературе разрозненные данные по прочности и разрушению АК в различных внешних условиях не позволяют делать общие выводы относительно микромеханики разрушения таких объектов. В связи с этим, в настоящей работе была поставлена задача систематического исследования влияния внешних факторов на прочность и процесс разрушения адгезионного контакта на примере слоистого композита из натуральной кожи.

С этой целью для установления закономерностей влияния термоциклов на кинетику разрушения [4, с.1004-1010] адгезионного контакта (АК) «кожа-адгезив-кожа» нами методом прямой видеосъёмки в режиме *in situ* изучалась зависимость скорости роста трещины в АК от количества термоциклов.

Вид и размеры образца для испытания на расслаивание показаны на рис.1. Часть образцов испытывалась без предварительного термоциклирования, а другая часть подвергалась предварительному термоциклированию в режиме  $20^{\circ}\text{C} \Rightarrow 50^{\circ}\text{C}$  (выдержка 10мин)  $\Rightarrow 20^{\circ}\text{C}$  (выдержка 10мин). Испытания на прочность при расслаивании проводились при комнатной температуре в условиях активного нагружения ( $\dot{\epsilon}=\text{const}$ ). На рис. 2. приведены примеры видеок кадров по расслаиванию адгезионного контакта, снятые в режиме реального времени эксперимента [5, с.3-7].

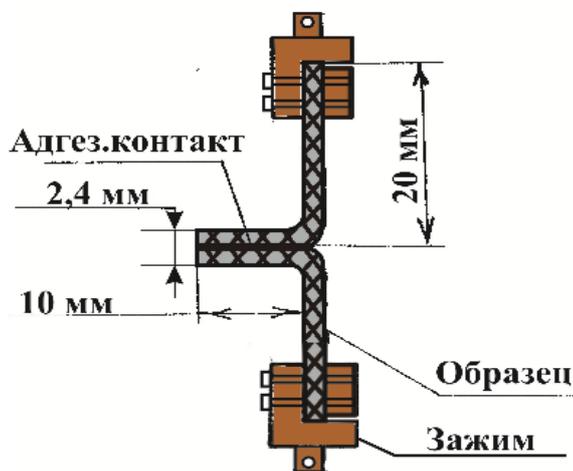


Рисунок 1. Схема испытаний образцов АК «кожа-адгезив-кожа» на расслаивание



Рисунок №2. Примеры видеок кадров, снятые в режиме реального времени эксперимента

После 5, 10, 15, 20, 30 циклов образцы подвергались испытанию на расслаивание и, одновременно, с помощью видеокамеры марки Panasonic-M9000 NV-R50 снимался процесс разрушения адгезионного контакта. При этом скорость съёмки составляла 50 кадров/с.

Обработка видеоматериала в режиме «стоп кадр» на экране монитора позволяет построить зависимость длины трещины  $l_{тр}$  адгезионного контакта от времени активного нагружения. Примеры таких графиков для исходных и термоциклированных образцов приведены на рис.3. Нетрудно видеть, что рост трещины в адгезионном контакте во всех рассматриваемых случаях представляет собой многостадийный процесс. Активный рост длины трещины, как правило, прерывается почти полной её остановкой. Время многократных «остановок» роста трещины в среднем остается постоянным и в данном режиме нагружения составляет примерно 0,8-0,9 секунд. Путем обработки зависимости  $l_{тр} = f(t)$  дифференциальным методом построили зависимость скорости трещины в адгезионном контакте от времени её роста.

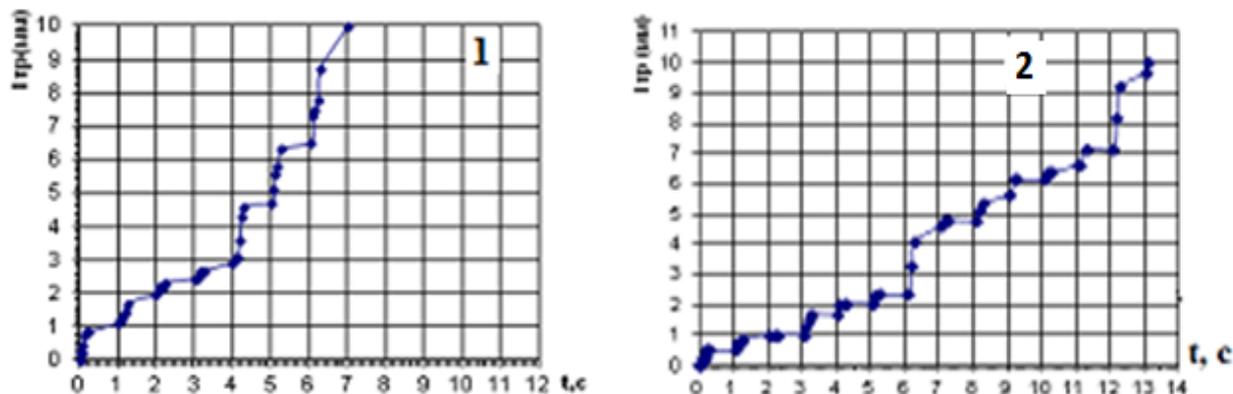


Рисунок №3. Зависимость длины адгезионной трещины от времени нагружения: 1-исходный образец; 2- после N=20 термоциклов.

Сравнение скорости роста трещины в образцах разной предыстории показывает, что, в целом, по мере увеличения количества термоциклов, происходит изменение структуры адгезионного контакта, и это влияет на скорость роста трещины [7, с.37-42].

Многостадийность процесса роста трещины в адгезионном контакте хорошо прослеживается на примерах графиков, приведенных на рис. 4.

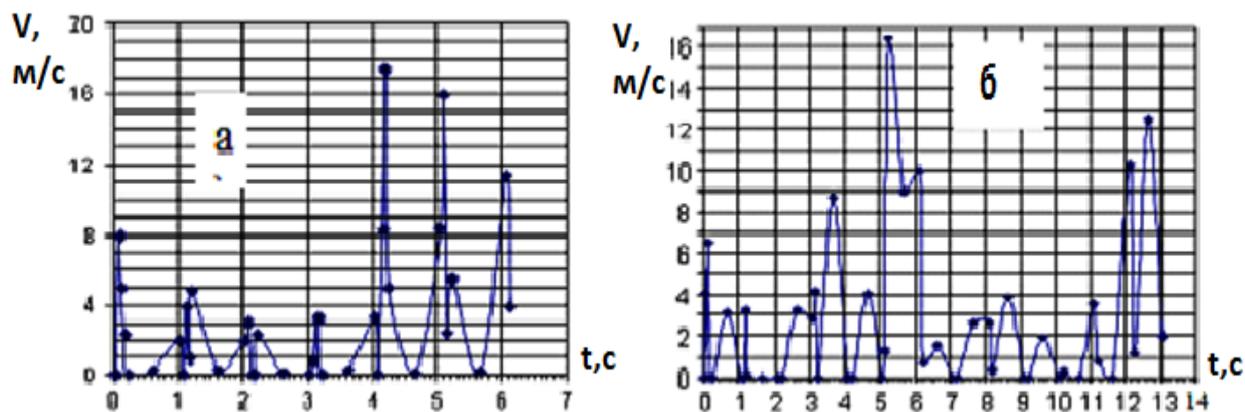


Рисунок № 4. Изменение скорости роста адгезионной трещины от времени её роста: а - исходный образец; б-после N -20 циклов.

Видно, что пики активности в росте скорости трещины непременно чередуются зонами «затишья» и такое чередование повторяется многократно во время жизни образца.

Однако влияние такого изменения на скорость роста трещины неоднозначно. Статистика таких результатов показывает, что в более чем половине образцов с ростом числа термоциклов происходит увеличение времени деформации. Так, если для исходных образцов время для активного деформирования составляет в среднем 5-6 секунд, то для термоциклированных N=20 образцов время деформирования увеличивается до 12-13с (рис.3, №2). И это происходит при одинаковом режиме активного нагружения. Обращает на себя внимание и следующее обстоятельство. С увеличением числа термоциклов происходит изменение активности скорости роста трещины. Так, в образцах, прошедших термоциклирование, по сравнению с исходными образцами, последние этапы жизни образца проходят с менее активными пиками скорости роста трещины. Если для исходных образцов (рис.4. а) на последнем этапе происходит более активный рост, то для термоциклированных образцов (рис.4.б) этот этап проходит относительно спокойно.

По мере увеличения количества термоциклов в некоторых случаях обнаруживается «сокращение» времени жизни активного нагружения. Подобные случаи наблюдались примерно в 20% экспериментов. При этом высота ступеньки роста длины (соответственно скорости роста) трещины возрастает, как правило, скачками, а общее количество скачков существенно сокращается по мере роста высоты ступеньки. Примеры таких результатов приведены на рис.5.

Таким образом, анализ результатов прямого слежения за ростом трещины адгезионного контакта для образцов «кожа-кожа» разной предыстории показывает, что с ростом числа термоциклов происходит существенное изменение кинетики разрушения на границе раздела. Показана многостадийность процесса разрушения адгезионного контакта.

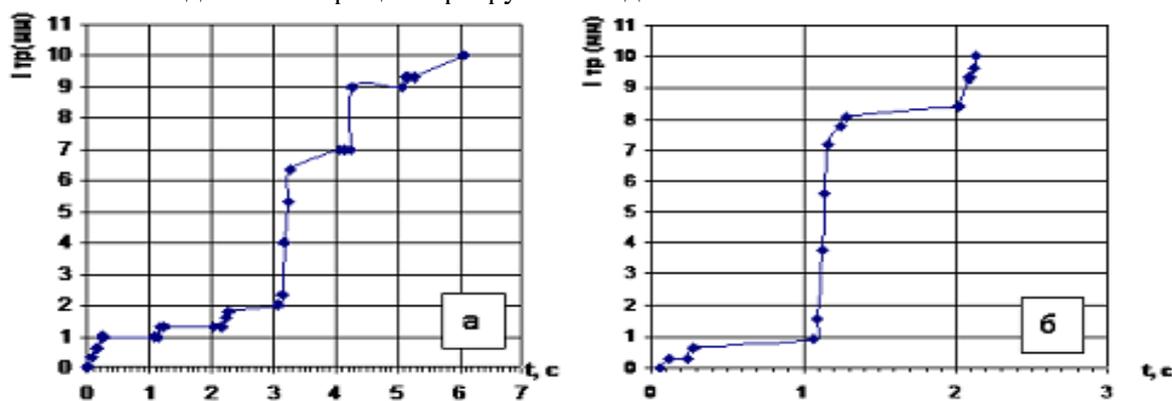


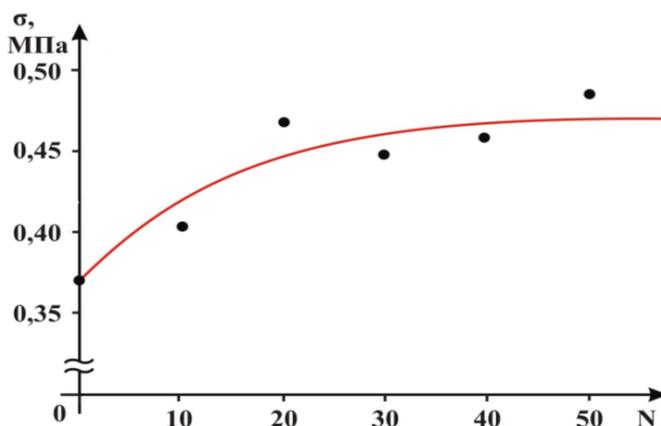
Рисунок № 5. Изменение соотношений числа ступенек и высоты скачка роста трещины.

Многостадийность в росте трещины можно объяснить релаксационными процессами на границе раздела, а именно в слое адгезива. Ширина ступеньки роста трещины, по-видимому, соответствует времени релаксационных процессов, завершение которых приводит к скачкообразному росту трещины. Увеличение времени деформирования по мере роста

количества термоциклов свидетельствует об увеличении степени повреждаемости на границе раздела.

Рост поврежденности на границе раздела, как можно видеть из эксперимента, в определенной мере увеличивает вязкость разрушения контакта. А это является достаточно мощным фактором диссипации энергии. Микроповреждения, которые образуются в результате действия термоциклов на границе раздела (из-за разности физико-механических свойств кожи и адгезива), очевидно, способствуют диссипации дополнительной энергии-снижению скорости роста магистральной трещины в зоне контакта. При благоприятных условиях это приводит к повышению адгезионной прочности.

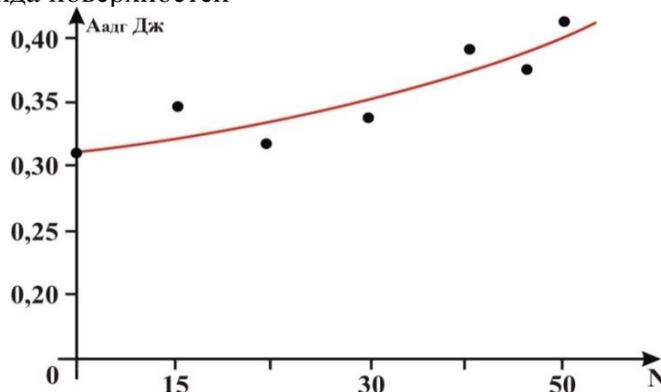
Чтобы судить, как меняется прочность по мере роста количества термоциклов, приведём оценочные значения прочности АК в условиях расслаивания. Отметим, что напряженные состояния, определяющие развитие процесса разрушения в условиях *раздира* и *расслаивания* коренным образом отличаются друг от друга, поэтому нельзя сравнивать прочности в этих условиях по абсолютным значениям. Оценочные значения прочности АК были определены путём деления разрывной нагрузки на начальную площадь контакта. Эти результаты приведены на рис. 6. Можно видеть, что с ростом числа термоциклов прочность на расслаивание возрастает нелинейно. Так, если прочность исходных образцов составляет примерно 0,36 МПа, то после N=50 термоциклов значение прочности возрастает до 0,46 МПа, что составляет примерно 40 процентов.



**Рисунок №6. Зависимость прочности АК на расслаивание от количества термоциклов.**

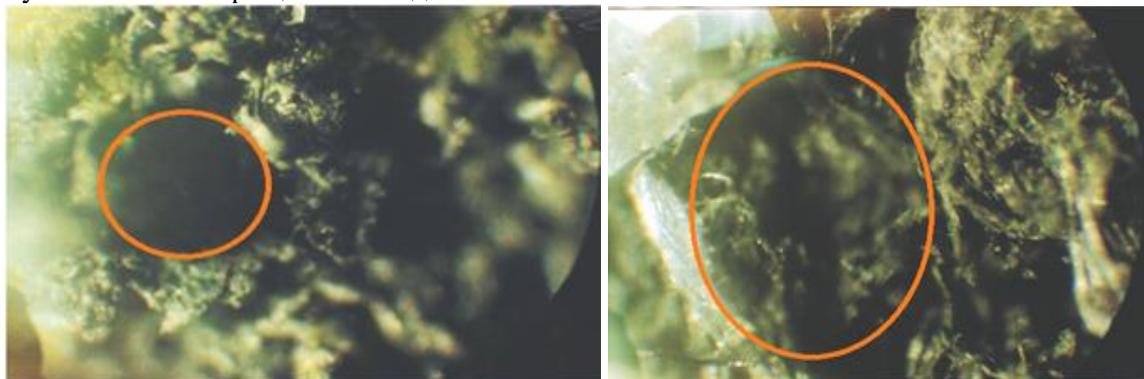
На основании результатов по циклической зависимости адгезионной прочности были оценены значения работы адгезии контакта в зависимости от количества термоциклов. При этом для оценки работы адгезии использовали среднее значение силы, необходимой для страгивания контактной трещины. Такая зависимость приведена на рис.7. Как можно видеть, по мере роста числа термоциклов наблюдается нелинейный рост работы адгезии. Так, если работа адгезии контакта «кожа-кожа» для исходного образца составляет примерно 0,31 Дж, то для образцов, подвергнутых действию 50 термоциклов, она составила в среднем 0,42 Дж, что на 30 процентов больше, чем у исходных.

Фактографический анализ поверхности разрушения исходных и термоциклированных образцов позволяет выделить некоторые особенности разрушения контакта «кожа-адгезив-кожа». Так, сравнение вида поверхностей



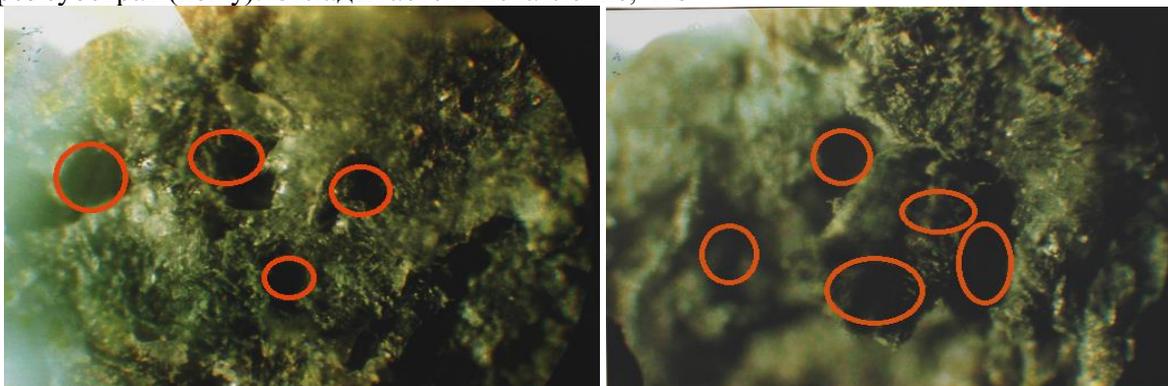
**Рисунок №7. Влияние количества термоциклов на величину работы адгезии «кожа-адгезив-кожа».**

Разрушения образцов показывает, что на поверхности разрушения контакта у исходного образца (рис.8.) имеется достаточное количество «впадин» и «выступов». Впадины чередуются с выступами и часто трещина «заходит»



*Рисунок №8. Поверхности разрушения исходного образца адгезионного контакта «кожа-адгезив-кожа».*

внутри субстрата. Поверхности разрушения термоциклированных образцов (рис.9) относительно гладки, и практически отсутствуют признаки прохождения трещины через субстрат (кожу). Складывается впечатление, что



*Рисунок №9. Вид поверхности разрушения образца «кожа-адгезив-кожа» после N-20 термоциклов.*

магистральная трещина, когда перерезает границу раздела термоциклированных образцов, для себя выбирает наиболее поврежденную область. Однако это дается не просто. При прохождении через поврежденную область, сталкиваясь с микрповреждениями, устье магистральной трещины затупляется, происходит резкое падение скорости её роста. Происходят, по сути, микроостановки до тех пор, пока в результате релаксационных процессов не подготавливается следующий шаг. Поэтому, несмотря на то, что трещина проходит через поврежденную область, происходят многократные остановки и строгания, как это можно видеть по результатам рис.5. В результате возрастает время, затрачиваемое на разрушение образца, и, как следствие, работа (вязкость) разрушения возрастает.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что микроскопические повреждения в определенных условиях могут способствовать торможению магистральной трещины и задержке катастрофического разрушения, что выражается через повышение вязкости разрушения и прочности АК.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Лексовский, А.М. В сб.: Кинетика деформирования и разрушения композиционных материалов /А.М. Лексовский //Под ред. А.М. Лексовского, ФТИ АН СССР. Л.: 1984.-С.112.
2. Владимиров, В.И. Дефекты, деформация и разрушение в композитных материалах на мезоскопическом уровне /В.И. Владимиров, М.Ю. Гуткин, А.Е. Романов // В кн.: Физика и механика разрушения композиционных материалов. Л.: ФТИ, 1986.- С.145-156.

3. Тихонов, А.А. Температурно-временная зависимость адгезионной прочности для системы полимер - полимер/А.А.Тихонов, А.А. Тагер, Е.С. Степанов // Механика полимеров, 1968.- №4.-С.665-671.
4. Лексовский, А.М. Влияние освобождаемой энергии упругой деформации разрываемых волокон и энергоёмкости системы на развитие разрушения КМ /А.М. Лексовский, А. Абдуманонов//Механика композитных материалов, 1984.-№ 4.-6.- С.1004-1010.
5. Абдуманонов, А. Влияние влажности и термоциклов на прочность адгезионного контакта / А. Абдуманонов, З.Н. Юсупов//Учёные записки ХГУ, 2003.-№6. -С.3-7.
6. Юдин, В.Е. Влияние диссипативных характеристик связующего на кинетику разрушения ВКМ / В.Е. Юдин, А.М. Лексовский, Г.Х. Нарзуллаев //В кн.: Механизмы повреждаемости и прочность гетерогенных материалов. Л.: ФТИ, 1985.-С.98-100.
7. Абдуманонов, А. Температурно-временная зависимость прочности адгезионного контакта кожа-кожа / А. Абдуманонов, З.Н. Юсупов // Учёные записки ХГУ, 2004.-№7-8. -С.37-42.

**REFERENCES:**

1. Leksovsky, A.M. In the collection: Kinetics of deformation and fracture of composite materials / A.M. Leksovsky//Ed. by A.M. Leksovsky, Physical-Technical Institute of the USSR Academy of Sciences. L.: 1984.-P.112.
2. Vladimirov, V.I. Defects, deformation and fracture in composite materials at the mesoscopic level / V.I. Vladimirov, M.Yu. Gutkin, A.E. Romanov//In the book: Physics and Mechanics of fracture of composite materials. L.: Physical-Technical Institute, 1986.- P.145-156.
3. Tikhonov, A.A. Temperature-time dependence of adhesion strength for the polymer-polymer system / A.A. Tikhonov, A.A. Tager, E.S. Stepanov//Mechanics of polymers, 1968.-№4.-P.665-671.
4. Leksovsky, A.M. Influence of the released energy of elastic deformation of ruptured fibres and the energy capacity of the system on the development of CM failure / A.M. Leksovsky, A. Abdumanonov//Mechanics of composite materials, 1984.-№ 4. 6. -P.1004-1010.
5. Abdumanonov, A. Influence of humidity and thermal cycles on the strength of adhesive contact / A. Abdumanonov, Z.N. Yusupov//Scientific notes of KhSU, 2003.-№ 6. -P.3-7.
6. Yudin, V.E. Influence of dissipative characteristics of the binder on the kinetics of VCM failure / V.E. Yudin, A.M. Leksovsky, G.Kh. Narzullaev//In the book: Damage mechanisms and strength of heterogeneous materials. L.: FTI, 1985.-P.98-100.
7. Abdumanonov, A. Temperature-time dependence of the strength of the adhesive contact skin-to-skin/A.Abdumanonov,Z.N.Yusupov//Scientific notes of KhSU, 2004.-№7-8. -P.37-42.