

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗДЕЛИЙ ТЕКСТИЛЬНОЙ И ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Научная статья

УДК 677.022 : 519.876.5

EDN JREUIX

<https://doi.org/10.34216/2587-6147-2026-2-72-32-37>

Петр Алексеевич Севостьянов¹

Татьяна Алексеевна Самойлова²

Илья Максимович Бурдин³

^{1,2,3} Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия

¹ petrsev46@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9919-5551>

² tasamo89@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2727-0011>

³ burd20@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0063-6952>

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗДИРАНИЯ СКЛЕЕННОГО МНОГОСЛОЙНОГО ПОЛОТНА

***Аннотация.** Построена компьютерная модель статистической имитации динамики сопротивления раздиранию изделия из двух склеенных слоев. Методом конечных элементов исследована область концентрации напряжения в области склеивания, определен участок начала раздиранния образца. Модель имитации распространения точки раздиранния вглубь образца основана на представлениях о движении гребня волны напряжения, достигающего предела прочности в локальной области разрыва. Учтено, что предел прочности может варьировать на разных участках траектории движения точки разрыва. Сравнение результатов моделирования с данными эксперимента по раздираннию полотна показали хорошее согласие между результатами эксперимента и моделирования.*

***Ключевые слова:** клеевое соединение, раздиранние, концентрация напряжения, динамика раздиранния, имитационное статистическое моделирование, многослойное полотно, точка разрыва*

***Для цитирования:** Севостьянов П. А., Самойлова Т. А., Бурдин И. М. Компьютерное моделирование динамики раздиранния склеенного многослойного полотна // Технологии и качество. 2026. № 2(72). С. 32–37. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2026-2-72-32-37>.*

Original article

Petr A. Sevostyanov¹

Tatiana A. SamoiloVA²

Ilya M. Burdin³

^{1,2,3} Kosygin State University of Russia (Technologies. Design. Art), Moscow, Russia

COMPUTER SIMULATION OF THE DYNAMICS OF TEARING OF GLUED MULTILAYER FABRIC

***Absrtact.** A computer model was developed to statistically simulate the tear resistance dynamics of a product composed of two bonded layers. Using the finite element method, the stress concentration region in the bonding zone was investigated, and the onset of tearing was determined. The model for simulating the propagation of the tear point into the specimen is based on the concept of the movement of a stress wave crest reaching its ultimate strength in the localised tear region. It is taken into account that the ultimate strength may vary at different points along the tear point's trajectory. A comparison of modelling results with experimental data on fabric tearing revealed good agreement between the experimental and modelling results.*

© Севостьянов П. А., Самойлова Т. А., Бурдин И. М., 2026

Keywords: adhesive bond, tearing, stress concentration, tearing dynamics, statistical simulation, multilayer fabric, breaking point

For citation: Sevostyanov P. A., Samoiloва T. A., Burdin I. M. Computer simulation of the dynamics of tearing of glued multilayer fabric. *Technologies & Quality*. 2026. No 2(72). P. 32–37. (In Russ.) [https://doi.org/ 10.34216/2587-6147-2026-2-72-32-37](https://doi.org/10.34216/2587-6147-2026-2-72-32-37).

Полотна из нескольких слоев разнородных материалов, соединенных клеями, находят широкое применение в различных отраслях промышленности и в бытовых изделиях [1, 2]. Основным показателем качества таких многослойных полотен является прочность соединения слоев при сохранении гибкости и упругости. Основным способом проверки клееного материала на прочность является испытание его образцов на раздираание в соответствии с ГОСТ [3–5]. Заметим, что испытанию на раздираание подвергаются не только изделия, полученные соединением нескольких слоев, но и однородные изделия, например тканые полотна [2, 6].

Толщины слоев материала и клеевого соединения могут варьироваться в зависимости от

назначения изделия. Например, для слоеного обувного материала, клеенного из слоев войлока и полимерного материала, образец имеет длину 20 см при ширине 5 см и общей толщине $\sim 1,5$ см: $h_m = 0,6$ см войлока и $h_p = 0,8$ см полимера. Толщина слоя клея равна примерно $h_c = 0,1$ см. При склеивании клей проникает на некоторую глубину в слой материала. Назовем эти слои слоями адгезии и обозначим их толщины h_{mc} и h_{cp} , которые примерно равны $h_{mc} = h_{cp} = 0,1$ мм. При одном из вариантов крепления образца в зажимах разрывной машины образец с одного края не склеен на глубину примерно 10 см. Это позволяет отогнуть края образца и закрепить их в неподвижном и подвижном зажимах (рис. 1).

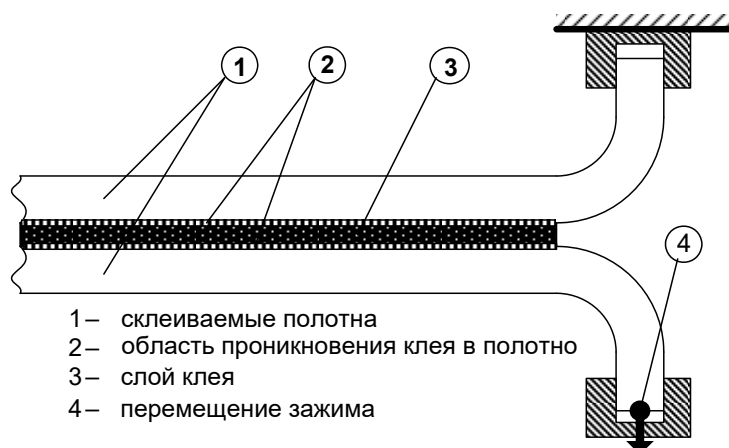


Рис. 1. Схема испытания клееного образца на раздираание

При испытании подвижный зажим перемещается с постоянной скоростью W , удаляясь от неподвижного зажима, и создает механическое напряжение $P(t)$ на границе соединения склеенных слоев образца [7–11]. Напряжение изменяется во времени t , отображая тем самым сопротивление материала раздираанию. При известных оценках модулей упругости E и коэффициентов Пуассона μ для всех пяти слоев: войлока, клея, полимера и двух слоев адгезии, с помощью конечноэлементной модели, имитирующей прикладываемое к образцу нарастающее перемещение зажатого края, были установлены две важных особенности.

Во-первых, максимальное механическое напряжение возникает на стыке двух слоев с наименьшими модулями упругости. Это на-

пряжение примерно на порядок превышает напряжение во всех остальных точках образца. Для рассматриваемого случая наибольшее напряжение сосредоточивается в окрестностях границ «войлок – слой адгезии» и «слой адгезии – клей».

Во-вторых, в каждый момент времени испытания напряжение убывает от точки концентрации напряжения вглубь материала по экспоненциальному закону. Скорость убывания настолько велика, что длина участка распространения напряжения намного меньше длины испытываемого образца.

Рисунки 2 и 3 иллюстрируют оба вывода. На рисунке 2 показаны в увеличенном масштабе границы слоев на краю области склеивания и линии равного уровня для значений первого главного компонента σ_n тензора напряжений

в области концентрации напряжения. На рисунке 3 показано, как по мере перемещения подвижного зажима (время от начала испытаний выражено в долях 0; 0.1; 0.2; ...; 1 от длительности испытаний) нарастает распределение σ_n вдоль отрезка красного цвета, показанного на рисунке 2 и проходящего через область концентрации напряжения. Напряжение экспоненциально быстро уменьшается по мере удаления от точки своего максимума.

Движение точки происходит со скоростью звуковой волны [12] для среды распространения –

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$
 – и прекращается, когда энергия деформации $W \sim 0,5 \frac{(Pb)^2}{E}$, накопленная в результате деформации материала до разрывной нагрузки Pb , не будет израсходована при движении точки разрыва вдоль перколяционной траектории разрыва. Здесь ρ – объемная плотность массы среды. Тем самым определяется глубина развития разрыва от его начала до конца участка траектории.

Здесь ρ – объемная плотность массы среды. Тем самым определяется глубина развития разрыва от его начала до конца участка траектории.

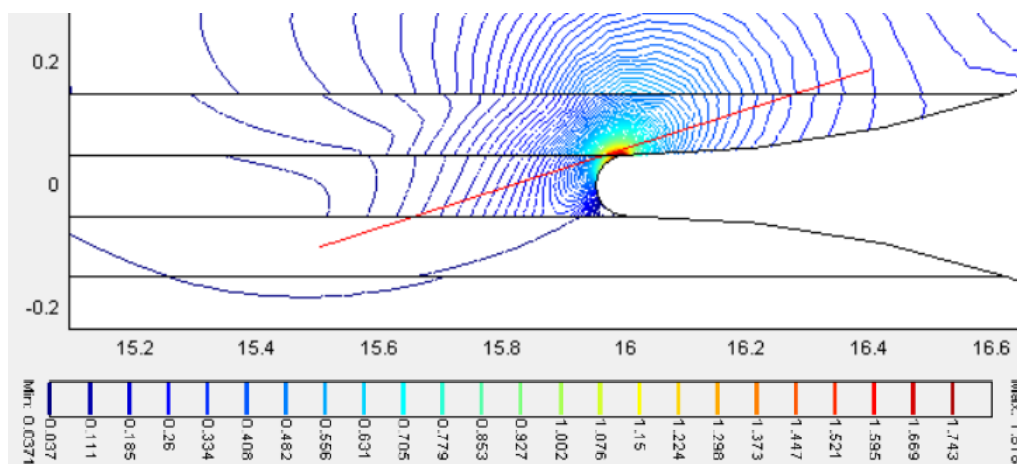


Рис. 2. Область концентрации напряжений на краю склеенных слоев*

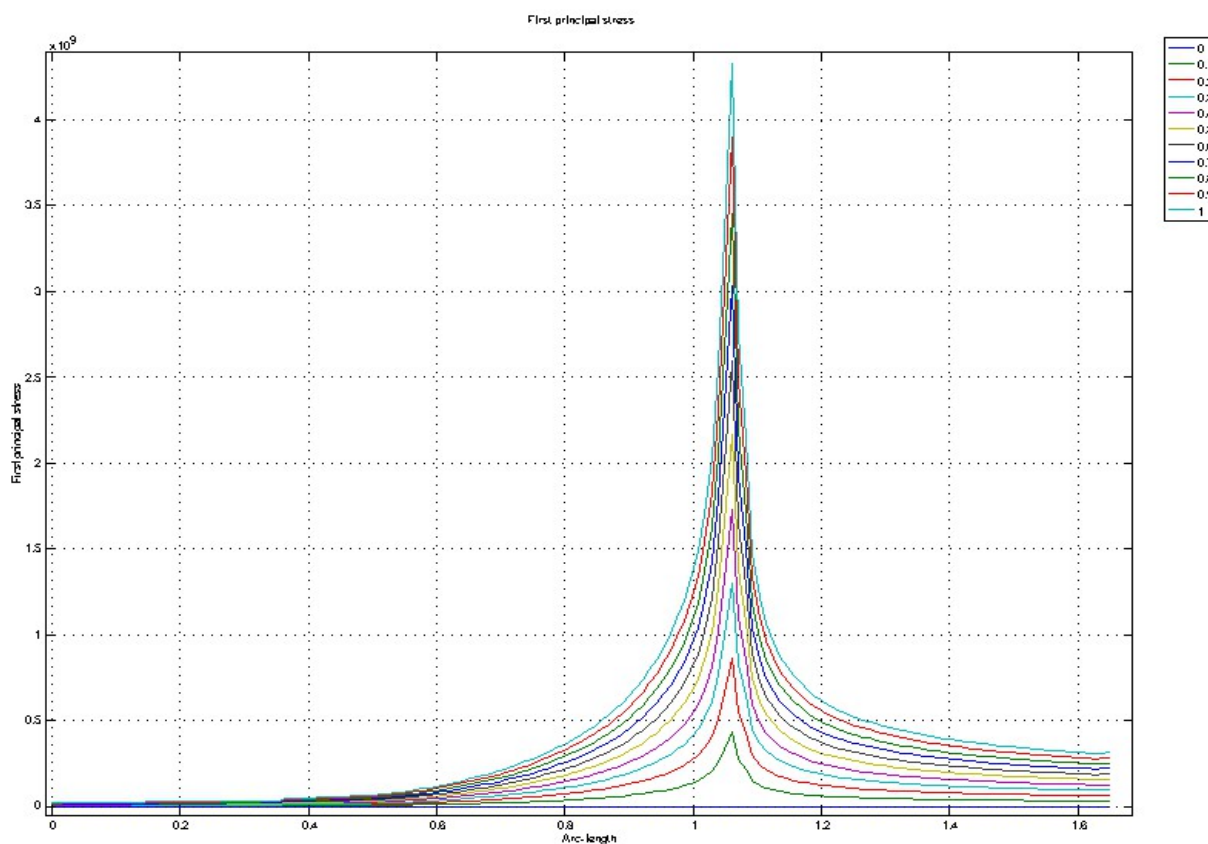


Рис. 3. Распределение 1-го главного компонента тензора напряжений в окрестности точки концентрации для разных моментов времени испытания*

* Полноцветная версия представлена на сайте журнала. URL: <https://tik.kosgos.ru>.

Затем процесс возобновляется: в окрестности будущей новой точки разрыва накапливается энергия деформации, при достижении напряжения предельного значения Pb происходит разрыв материала в текущей области и начинается новый участок перколяционной траектории, продолжающий линию разрыва материала. Процесс продолжается, пока точка разрыва не достигнет противоположного края образца или остановки движения зажима.

Величина Pb в силу неоднородности материала слоя может варьировать относительно среднего значения для материала слоя. Зависимость Pb от координаты вдоль линии раздираания обозначим $Pb(x)$. Наибольшее напряжение распространяется вдоль линии разрыва, но из-за вариаций Pb разрыв происходит не сразу, а только когда напряжение достигнет значения Pb в точке x .

Отметим, что если различия в механических свойствах слоев значительны, точка разрыва продвигается вглубь материала в пределах одного и того же слоя, в котором образуется начальное нарушение целостности материала – начальная точка разрыва. При отсутствии значимых различий в средних значениях предельной нагрузки Pb у разных слоев склеенного материала и при достаточно больших – более 12 % – коэффициентах вариации значений предельной нагрузки траектория разрыва может переходить в соседний слой материала.

Исходя из описанного механизма раздираания клееного материала и динамики распространения точки разрыва вглубь материала была построена компьютерная имитационная модель процесса разрыва. Модель позволила получить зависимость силы сопротивления от момента времени t испытания, что позволит сравнить результаты модельных исследований и натуральных испытаний образцов.

Распространение точки разрыва вглубь слоя можно рассматривать как волну в материальной среде, которую в простейшем случае описывает одномерное волновое уравнение [12] со скоростью перемещения волнового фронта v . Предполагается, что материал упругий и подчиняется закону Гука $P = E\varepsilon$ в пределах от нулевых значений ε и P до напряжения разрыва Pb и соответствующей ему деформации разрыва $\varepsilon_b = Pb/E$. В силу пропорциональности напряжения и деформации такое же волновое уравнение действует и для напряжения внутри слоя в диапазоне значений от нуля до величины разрывного напряжения. Оно описывает распространение волны напряжения вглубь слоя. Поскольку про-

тивоположный край образца не закреплен, отраженная волна отсутствует.

Особенностью задачи является перемещение границы, на которой возникает волна, – точки разрыва. При скорости W проникновения точки разрыва в слой материала координата границы равна $x = Wt$. Координата x отсчитывается от точки начала разрыва вглубь материала. В момент разрыва в точке x напряжение равно напряжению разрыва $Pb(x, t)$.

Скорость распространения напряжения вглубь материала v намного больше скорости W продвижения точки разрыва вдоль линии разрыва, что позволяет рассматривать процесс раздираания образца на разрывной машине как квазистатический.

В этом случае ищем решение уравнения в виде произведения $\sigma(x, t) = \sigma(x) \cdot \varphi(t)$, где $\varphi(t)$ – безразмерная функция времени. Волновое уравнение приводит к обыкновенному дифференциальному уравнению для функции $\sigma(x)$:

$$\frac{d^2\sigma(x)}{dx^2} + \frac{a}{v^2}\sigma(x) = P(x, t),$$

здесь $a > 0$ – некоторая константа;

$P(x, t)$ – внешнее воздействие на материал в точке разрыва x для момента времени t , вызванное перемещением подвижного зажима.

Перейдем к дискретным переменным, чтобы реализовать модель развития деформации в виде компьютерной программы. При этом учтем взаимосвязь между квантованными переменными координаты и времени $x = Wt \rightarrow \Delta x = W \cdot \Delta t$.

В алгоритм решения введем условие, что при достижении величиной напряжения $P(x)$ предельного для этого участка материала значения Pb функция напряжения претерпевает скачок к более низкому значению, которое и является начальным условием для следующего этапа распространения деформации и разрыва вглубь материала.

Компьютерная модель была реализована в Matlab. На рисунке 4 показан пример динамики изменения сопротивления материала. Верхний график получен в результате моделирования, нижний график – результат, зарегистрированный при «натурном» испытании образца полотна на разрывной машине. Сравнение графиков показывает, что построенная модель адекватно передает динамику процесса раздираания образца, хотя имеются различия в частоте следования пиков в вариациях силы сопротивления раздираанию $P(t)$.

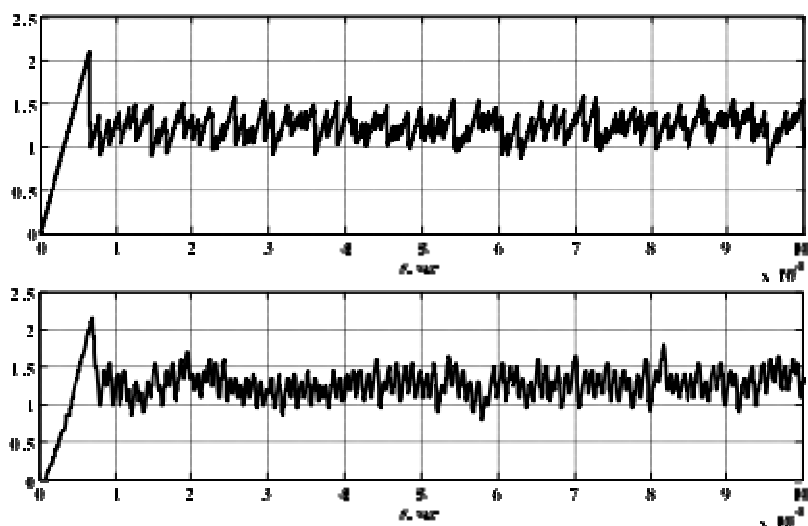


Рис. 4. Динамика разрыва вдоль слоя клееного материала

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Орешко Е. И., Ерасов В. С., Подживотов Н. Ю. Выбор схемы расположения высокомодульных слоев в многослойной гибридной пластине для ее наибольшего сопротивления потере устойчивости // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № S4. С. 109–117.
2. Исследование технологического процесса выработки двухслойной ткани, обладающей максимальной прочностью на раздирание / С. С. Юхин, М. В. Назарова, С. Ю. Бойко, Т. Л. Фефелова // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2019. № 4(382). С. 84–88.
3. ГОСТ Р ИСО 2411–2014. Материалы текстильные. Ткани с резиновым или пластмассовым покрытием. Метод определения адгезии покрытия. М. : Стандартиформ, 2025. 11 с.
4. ГОСТ ISO 2411–2025. Материалы с резиновым или пластмассовым покрытием. Определение адгезии покрытия (ISO 2411:2025). М. : Российский институт стандартизации, 2025. 12 с.
5. ГОСТ 32316.1–2012. Метод определения сопротивления раздиру клеевого соединения. М. : Стандартиформ, 2019. 12 с.
6. Севостьянов П. А. Компьютерные модели статистической механики волокнистых материалов : монография. М. : РГУ им. А. Н. Косыгина, 2023. 250 с.
7. Ерасов В. С., Орешко Е. И. Силовой, деформационный и энергетический критерии разрушения // *Труды ВИАМ*. 2017. № 10(58). С. 97–111.
8. Пестриков В. М., Морозов Е. М. Механика разрушения твердых тел. СПб. : Профессия, 2002. 320 с.
9. Матвиенко Ю. Г. Модели и критерии механики разрушения. М. : Физматлит, 2006. 328 с.
10. Маркочев В. М., Алымов М. И. О теории хрупкого разрушения Я. Френкеля и А. Гриффитса // *Чебышевский сборник*. 2017. Т. 18, вып. 3. С. 377–389.
11. Тарасевич Ю. Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы. 2-е изд. М. : Либроком, 2011. 112 с.
12. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. 5-е изд., стер. М. : Наука, 1977. 735 с.

REFERENCES

1. Oreshko E. I., Yerasov V. S., Podzhivotov N. Yu. Selection of the arrangement scheme of high-modulus layers in a multilayer hybrid plate for its greatest resistance to loss of stability. *Aviacionnye materialy I tekhnologii* [Aviation materials and technologies]. 2014;S4:109–117. (In Russ.)
2. Yukhin S. S., Nazarova M. V., Boyko S. Yu., Fefelova T. L. Study of the technological process of producing two-layer fabric with maximum tear strength. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Series Textile Industry Technology]. 2019;4(382):84–88. (In Russ.)
3. *GOST R ISO 2411–2014. Materialy tekstil'nye. Tkani s rezinovym ili plastmassovym pokrytiem. Metod opredeleniya adgezii pokrytiya* [State Standard R ISO 2411–2014. Textile materials. Fabrics with rubber or plastic coating. Method for determination of coating adhesion]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p. (In Russ.)

4. *GOST ISO 2411–2025. Materialy s rezinovym ili plastmassovym pokrytiem. Opredelenie adgezii pokrytiya* [State Standard ISO 2411:2025. Rubber- or plastic-coated materials. Determination of coating adhesion]. Moscow, Rossijskij institut standartizacii Publ., 2025. (In Russ.)
5. *GOST 32316.1–2012. Metod opredeleniya soprotivleniya razdiru kleevogo soedineniya* [State Standard 32316.1–2012. Method for determining the tear resistance of adhesive joints]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 12 p. (In Russ.)
6. Sevostyanov P. A. Computer models of statistical mechanics of fibrous materials. Moscow, Ross. St. Univ. named after A. N. Kosygin Publ., 2023. 250 p. (In Russ.)
7. Yerasov V. S., Oreshko E. I. Force, deformation and energy criteria of destruction. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM]. 2017;10(58):97–111. (In Russ.)
8. Pestrikov V. M., Morozov E. M. Fracture mechanics of solids. Saint Petersburg, Professiya Publ., 2002. 320 p. (In Russ.)
9. Matvienko Yu. G. Models and criteria of fracture mechanics. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 328 p. (In Russ.)
10. Markochev V. M., Alymov M. I. On the theory of brittle fracture by J. Frenkel and A. Griffiths. *Chebyshevskij sbornik* [Chebyshev collection]. 2017;18,3:377-389. (In Russ.)
11. Tarasevich Yu. Yu. Percolation: theory, applications, algorithms. Moscow, Librocom Publ., 2011. 112 p. (In Russ.)
12. Tikhonov A. N., Samarskij A. A. Equations of mathematical physics. Moscow, Nauka Publ., 1977. 735 p. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 15.02.2026
Принята к публикации 27.04.2026

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

П. А. Севостьянов, доктор технических наук, профессор
Т. А. Самойлова, кандидат технических наук, доцент
И. М. Бурдин, аспирант