

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Отделение энергетики, машиностроения, механики и
процессов управления

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН



7-я Международная научно-техническая конференция

**Живучесть и конструкционное
материаловедение**
ЖивКом – 2024

**Survivability and Structural Materials
Science**
SSMS - 2024

29-31 октября 2024 г.
Москва

**ТРУДЫ
КОНФЕРЕНЦИИ**

7-я Международная научно-техническая конференция «Живучесть и конструкционное материаловедение» (ЖивКоМ – 2024): Сборник трудов конференции (Москва, 29-31 октября 2024) / М: Изд-во ИМАШ РАН, 2024, электронный формат – 479 с.

В сборнике представлены статьи участников 7-й Международной научно-технической конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение» (ЖивКоМ – 2024).

7-я Международная научно-техническая конференция «Живучесть и конструкционное материаловедение» (ЖивКоМ – 2024) прошла с 29 по 31 октября 2024 г. в Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва. На конференции были заслушаны научные доклады и сообщения по следующим восьми научным направлениям:

1. Модели и критерии разрушения материалов и живучести конструкций на различных масштабных уровнях.
2. Вычислительная механика разрушения в проблемах живучести и конструкционного материаловедения.
3. Риск-анализ в системе критериев живучести и безопасности.
4. Динамические процессы разрушения. Диагностика и мониторинг поврежденных машин и конструкций. Экспериментальные методы исследования.
5. Сопротивление длительному статическому и циклическому деформированию и разрушению конструкционных материалов, работающих в экстремальных условиях.
6. Структура, прочностные и технологические свойства материалов со специфическими свойствами (наноматериалы и нанопокртия, материалы с памятью формы, биметаллические материалы и т.п.).
7. Керамические и метало-керамические материалы и покрытия (получение, свойства, применение).
8. Влияние структурного состояния на деформационные, прочностные и трибологические характеристики конструкционных материалов.

*Требования к оформлению статей были размещены на сайте конференции.
Оргкомитет оставил публикации в авторском исполнении.*

Сайт конференции <https://ssms-imash.com>

© ИМАШ РАН, 2024

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЛЕЧИВАНИЯ ТРЕЩИНЫ КАК ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ЕЁ КОНЦЕВОЙ ОБЛАСТИ¹

Перельмутер М.Н. – д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва
perelm@ipmnet.ru

MODELING OF A CRACK HEALING AS A PROCESS OF ITS BRIDGED ZONE FORMATION

Perelmuter M. N. - Dr. of phys-math sci., leading researcher
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow
perelm@ipmnet.ru

Abstract. The bridged zone model for interface cracks is used to evaluate the efficiency of cracks self-healing in materials. The purpose of modeling the crack self-healing process using this model is to calculate the stress intensity factors, which are considered as characteristics of the crack healing efficiency. A kinetic model is used to evaluate bonds regeneration time during the crack bridged zone formation.

Key words: cracks, self-healing, bridged zone, bonds kinetics.

Аннотация. Модель трещины с концевой областью на границе соединения различных материалов используется для оценки эффективности самозалечивания трещин в материалах. Цель моделирования процесса самозалечивания трещины при использовании этой модели состоит в вычислении коэффициентов интенсивности напряжений, которые рассматриваются как характеристики эффективности залечивания трещины. Для оценки времени регенерации связей при формировании концевой области трещины используется кинетическая модель.

Ключевые слова: трещины, самозалечивание, концевая область, кинетика связей

1. Введение

В последние десятилетия ведутся разработка и изучение материалов, обладающих свойством самозалечивания (автономно восстанавливающих начальные свойства при возникновении в них дефектов и трещин) [1, 2]. Экспериментальное изучение процессов самозалечивания материалов является чрезвычайно длительным и трудоемким. Моделирование этих процессов позволяет дополнить экспериментальные исследования и заполнить пробелы в эксперименте. Важным направлением является развитие моделей восстановления связей между поверхностями трещины и оценки времени восстановления работоспособности материала. Можно выделить три основных этапа в процессе самозалечивания дефектов и трещин при восстановлении работоспособности материалов: 1) формирование и рост дефектов/трещин под действием внешней нагрузки и агрессивных сред в ослабленных областях материала и зонах высокой концентрации напряжений; 2) инициирование процесса самозалечивания при внешнем воздействии и/или внедрении в дефект/трещину залечивающего агента; 3) самозалечивание дефекта (восстановление связей между берегами трещины), приводящее к восстановлению (частичному или полному) несущей способности материала или изделия. Экспериментальные исследования выполнены по широкому кругу указанных проблем, но механическо-математические модели и расчетные методики только начинают развиваться [3-5].

В данной работе для анализа указанных выше этапов и решения задач, возникающих при этом, используется модель, основанная на объединении модели концевой области трещины и кинетической термофлуктуационной теории.

¹Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 23-29-00524.

2. Модель трещины со связями в концевой области

Рассмотрим прямолинейную трещину длины 2ℓ , расположенную на границе соединения двух полуплоскостей $|x| \leq \ell, y=0$ (рис. 1) из различных материалов. На удаленной границе области приложены равномерно распределенные нормальные к плоскости трещины напряжения σ_0 . Выделим части трещины длины $d_1 = d_2 = d$ (концевые области трещины, одинаковые при растяжении [6, 7]), примыкающие к её вершинам ($\ell - d \leq |x| \leq \ell, y=0$), в которых берега трещины взаимодействуют. Размер области взаимодействия является, ввиду восстановления связей, функцией времени $d = d(t)$. Полагаем, что в каждый момент времени закон деформирования связей, в общем случае нелинейный, задан.

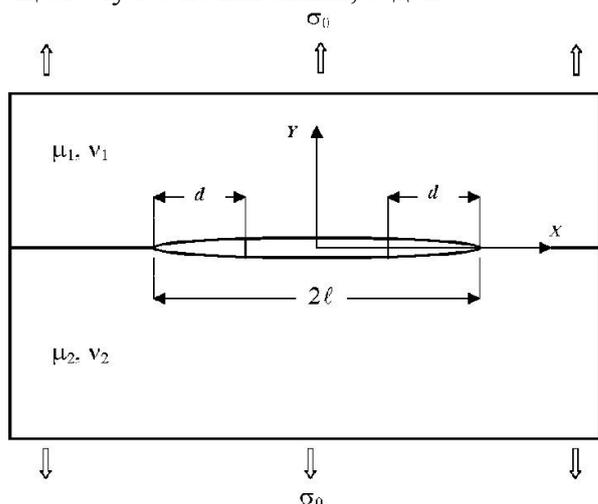


Рис. 1 Трещина со связями на границе соединения материалов

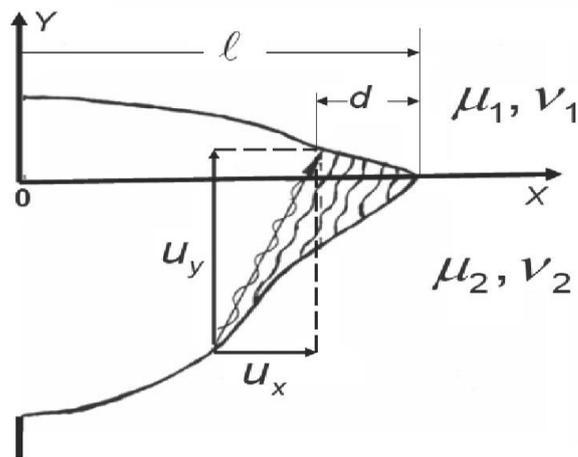


Рис. 2 Связи между поверхностями трещины в концевой области

При действии внешних нормальных нагрузок в связях, соединяющих берега трещины в концевой области, возникают усилия $Q(x, t)$, имеющие нормальную $q_y(x, t)$ и касательную $q_x(x, t)$ составляющие

$$Q(x, t) = q_y(x, t) - iq_x(x, t), \quad i^2 = -1 \quad (1)$$

Ввиду возможного изменения свойств связей во времени усилия $q_{y,x}(x, t)$ являются функцией времени даже при постоянной внешней нагрузке. К берегам трещины приложены нормальные и касательные напряжения, численно равные нормальным и касательным усилиям, соответственно. Уравнение (1) дополняем соотношением, связывающим компоненты раскрытия трещины в концевой области $u_{x,y}$ и усилия в связях $q_{x,y}$ [6, 7]

$$u_y(x, t) - iu_x(x, t) = c(x, t, \sigma) (q_y(x, t) - iq_x(x, t)), \quad c(x, t, \sigma) = \gamma(x, t, \sigma) \frac{H}{E_b} \quad (2)$$

где $\sigma = \sqrt{q_x^2(x, t) + q_y^2(x, t)}$ – модуль вектора усилий в связях; функция $c(x, t, \sigma)$ – эффективная податливость квазилинейных связей, зависящая от положения связи вдоль концевой области, натяжения связи и времени; $\gamma(x, t, \sigma)$ – безразмерная функция, определяющая зависимость податливости связей от координаты, натяжения и времени; H – линейный размер, пропорциональный толщине зоны неоднородности на участке соединения материалов; E_b – эффективный модуль упругости связей.

Изменение эффективных податливостей связей во времени обусловлено восстановлением связей при формировании концевой области трещины. Усилия в связях $q_{y,x}(x, t)$ подлежат

определению из решения задачи при заданной внешней нагрузке σ_0 и известном законе деформирования связей. Используя выражения для производных раскрытия трещины при произвольных нагрузках $Q(x, t)$ на ее поверхностях, выражения для производных раскрытия трещины при действии внешних напряжений σ_0 , нормальных к плоскости трещины, можно получить (см. детали в [6, 7]) систему сингулярных интегро-дифференциальных уравнений (СИДУ) для определения усилий в связях $q_{y,x}(s, t)$ для прямолинейной трещины, расположенной на границе соединения полуплоскостей из различных материалов. Полагая, что усилия в связях изменяются с течением времени квазистатическим образом, определяем коэффициенты интенсивности напряжений K_I, K_{II} для трещины на границе соединения материалов как для статической задачи

$$K_I + iK_{II} = (K_I^{ext} + K_I^{int}) + i(K_{II}^{ext} + K_{II}^{int}), \quad (3)$$

где $K_{I,II}^{ext}$ и $K_{I,II}^{int}$ коэффициенты интенсивности напряжений от действия внешних напряжений и от действия напряжений, приложенных к берегам трещины в концевой области.

Используя выражения для напряжений на продолжении прямолинейной трещины на границе соединения полуплоскостей из различных материалов получим [6]

$$K_I + iK_{II} = \sigma_0 \sqrt{\pi \ell} \left[(1 + 2i\beta) - \frac{ch(\pi\beta)}{\pi} \int_{-1}^{+1} \left(\frac{1+\xi}{1-\xi} \right)^{0.5+i\beta} (q_y(s, t) + iq_x(s, t)) ds \right] \quad (4)$$

где $\beta = \ln \alpha / 2\pi$, $\alpha = (\mu_2 k_1 + \mu_1) / (\mu_1 k_2 + \mu_2)$ и $k_{1,2} = 3 - 4\nu_{1,2}$ (плоская деформация) или $k_{1,2} = (3 - \nu_{1,2}) / (1 + \nu_{1,2})$ (плоское напряженное состояние), $\nu_{1,2}$ и $\mu_{1,2}$ - коэффициенты Пуассона и модули сдвига материалов подобластей 1 ($Y > 0$) и 2 ($Y < 0$), (рис. 1).

Модуль коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) и определяется как

$$K_B = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2} \quad (5)$$

Для моделирования залечивания криволинейных трещин в телах конечных размеров используется метод граничных элементов (МГЭ) [8]. Составная конструкция моделируется набором однородных подобластей. Такой подход позволяет рассматривать криволинейные трещины с концевой областью на границе соединения различных материалов. Для связей в концевой области трещины используются соотношения, аналогичные (2) [8]

$$q_i(s) = \kappa_i(s, t, \sigma) \Delta u_i(s, t), \quad \Delta u_i(s, t) = u_i^k - u_i^n, \quad \kappa_i(s, t, \sigma) = \varphi_i(s, t, \sigma) \frac{E_b}{H} \quad (6)$$

Здесь $i = 1, 2$ соответствует касательному и нормальному направлениям в точке s границы соединения подобластей, $\kappa_i(s, t, \sigma)$ - жесткость связей между поверхностями трещины подобластями, $\varphi_i(s, t, \sigma)$ - безразмерная функция, зависящая от положения точки s на участке соединения материалов и натяжения связей. При использовании МГЭ коэффициенты интенсивности напряжений определяются по перемещениям на элементах, примыкающих к вершине трещины [8], а модуль КИН определяется выражением (5).

3. Кинетика формирования концевой области трещины

Рассмотрим процесс восстановления связей между поверхностями трещины. Полагаем, что а) поверхности трещины свободны от связей полностью или частично; б) между поверхностями трещины, расположенной на границе различных материалов, соединенных слоем адгезива с функцией самовосстановления [9], активизируется процесс самозалечивания, где $d(t)$ - размер зоны восстановленных адгезионных связей между берегами трещины, $u_{x,y}(x, t)$ - компоненты раскрытия трещины на краю концевой области, см. рис. 2.

Моделирование процесса восстановления связей между берегами трещины (формирования концевой области) при полимеризации основано на следующих допущениях: 1) в начальный момент времени в трещину на границе соединения материалов попадает «залечивающая» жидкость – полимер; 2) степень заполнения трещины полимером определяет размер концевой области трещины, формируемой в процессе самозалечивания ($d \leq \ell$); 3) в трещине начинается процесс полимеризации, приводящий к образованию связей между поверхностями трещины; 4) плотность связей между поверхностями трещины является возрастающей функцией времени; 5) возрастание плотности связей между поверхностями трещины сопровождается увеличением жёсткости связей. При моделировании процесса восстановления связей будем полагать, что возрастание плотности связей $n_h(x, t)$ между поверхностями трещины определяется кинетическим уравнением первого порядка [10]:

$$\frac{dn_h(x, t)}{dt} = \frac{n_0 - n_h(x, t)}{\tau_h(x, \sigma)} \quad (7)$$

где n_0 - максимальная плотность связей между берегами трещины, $\tau_h(x, \sigma)$ - характеристическое время восстановления связи, определяемое как

$$\tau_h(x, \sigma) = \psi(x, \sigma) A(T), \quad \psi(x, \sigma) = \chi \frac{\sqrt{u_x^2(x, t) + u_y^2(x, t)}}{H}, \quad A(T) = \tau_0 \exp\left(\frac{U_h}{RT}\right) \quad (8)$$

где $\tau_0 = \alpha h / kT$, h - постоянная Планка, k - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура, α - безразмерный коэффициент, зависящий от типа материала (полимер, металл, керамика), U_h - энергия активации восстановления связей, R - универсальная газовая постоянная. Безразмерная функция $\psi(x, \sigma)$ в (8) определяет зависимость времени восстановления связей от расстояния до вершины трещины и внешней нагрузки, χ - экспериментально определяемый параметр. Решение уравнения (7) (при начальном условии $n(x, 0) = 0$) даёт зависимость плотности связей, формирующихся между берегами трещины

$$n_h(x, t) = n_0 Z(x, t, \sigma), \quad Z(x, t, \sigma) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_h(x, \sigma)}\right) \quad (9)$$

Увеличение плотности связей со временем приводит к возрастанию жёсткости связей в концевой области трещины. Обозначим жёсткость одной молекулярной связи $k_s(x)$. Тогда эффективная жёсткость связей на единицу площади концевой области трещины

$$k(x, t, \sigma) = k_s(x) n(x, t) = k_b Z(x, t, \sigma), \quad (10)$$

где $k_b(x) = k_s(x) n_0$ - максимальная жёсткость связей между берегами трещины в концевой области.

4. Результаты расчетов

Ниже приведены результаты численного моделирования самозалечивания трещин в композиционных материалах, полученные методом СИДУ.

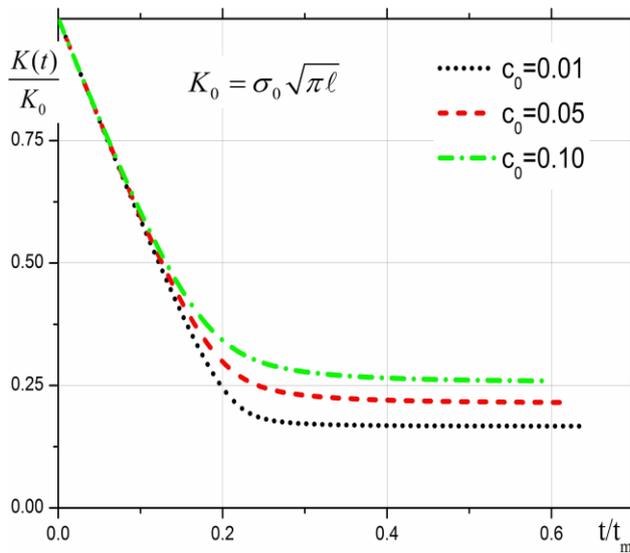


Рис. 3 Зависимость модуля КИН от времени при формировании связей, $d = \ell$

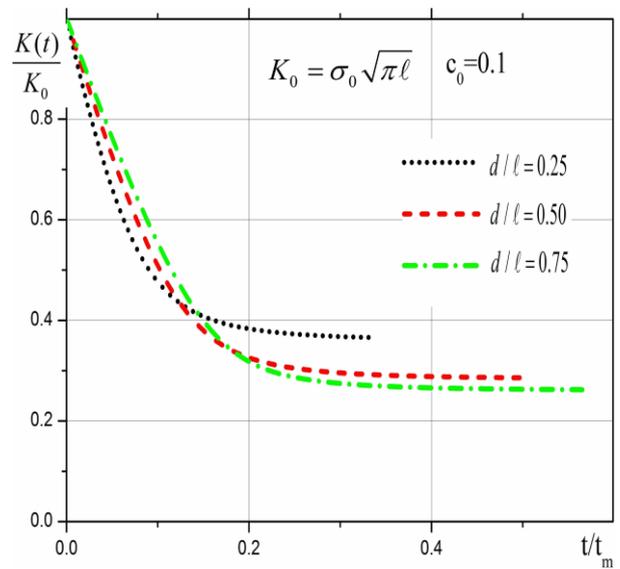


Рис. 4 Зависимость модуля КИН от времени при различной глубине заполнения трещины связями

Расчёты выполнены для состояния плоской деформации для соединения нержавеющей сталь-полимер: $E_1 = 200 \text{ ГПа}$, $E_2 = 25 \text{ ГПа}$, $E_b = E_2$; $\nu_1 = \nu_2 = 0.30$. Размер залечиваемой трещины - $2\ell = 10^{-3} \text{ м}$, нагрузка $\sigma_0 = 10 \text{ МПа}$. Параметры кинетического процесса [11, 12]: энергия активации восстановления связей $U_h = 100 \text{ кДж/моль}$, $\tau_0 = 10^{-10} \text{ с}$, максимальная плотность связей $n_0 = 10^{18} \text{ м}^{-2}$, $T = 310 \text{ К}$. Предельное значение плотности восстановленных связей принималось равным $N_{cr} = 0.95n_0$, экспериментально определяемые параметры в (8) полагались равными $\alpha = 1$ и $\chi = 1$. Вычисления заканчиваются при выполнении условия формирования концевой области трещины (критерий самозалечивания)

$$\bar{N}(t_i) \geq N_{cr}, \quad \bar{N}(t_i) = \frac{1}{d} \int_{\ell-d}^{\ell} n_h(x, t_i) dx \quad (11)$$

где $\bar{N}(t_i)$ - средняя плотность связей вдоль концевой области трещины в момент времени t_i , N_{cr} - предельное значение плотности восстановленных связей.

Продолжительность процесса самозалечивания характеризуется безразмерным параметром t/t_m , где t - время формирования концевой области трещины, $t_m = A(T)/N_{st}$, здесь $N_{st} = 499$ - максимально допустимое число шагов по времени при решении системы СИДУ. Эффективность процесса самозалечивания характеризуется снижением модуля КИН при возрастании жёсткости связей и увеличении размера концевой области трещины. В первой серии расчётов полагалось, что восстановление связей происходит вдоль всей трещины ($d = \ell$), первоначально свободной от связей. Зависимость модуля КИН (5) от времени представлена на рис. 3 для различных значений относительной податливости связей $c_0 = H/\ell$, сформированных в трещине после окончания процесса самозалечивания. На первом этапе формирования концевой области модуль коэффициентов интенсивности напряжений убывает практически линейно, а при $(t/t_m) \geq 0.3$ этот параметр изменяется слабо. Результаты, приведенные на рис. 4, получены для относительной податливости связей после окончания процесса самозалечивания $c_0 = 0.1$ и вариации размера концевой области трещины, формируемой в процессе самозалечивания. Эффективность самозалечивания для концевой области, занимающей четверть длины трещины, сопоставима с эффективностью этого процесса при большем заполнении трещины, $(d/\ell) = 0.5; 0.75$.

Литература

1. Ситников Н.Н., Хабибуллина И.А., Машенко В.И., Ризаханов Р.Н. Оценка перспектив применения самовосстанавливающихся материалов и технологий на их основе // Перспективные материалы. – 2018. – № 2. – С. 5-16.
2. Snoeck D., Malm F., Cnudde V., Grosse C.U., Van Tittelboom, K. Validation of Self-Healing Properties of Construction Materials through Nondestructive and Minimal Invasive Testing // Adv. Mater. Interfaces. – 2018. – V. 5. – No.17. – P. 1-28.
3. Ozaki, S., Osada, T., Nakao, W. Finite element analysis of the damage and healing behavior of self-healing ceramic materials // Int. J. Solids Struct. – 2016. – V. 100 – P.307–318.
4. Ponnusami S. A., Krishnasamy J., Turteltaub S., Zwaag S. A cohesive-zone crack healing model for self-healing materials // International Journal of Solids and Structures. – 2018 –V. 134. – P. 249-263
5. Jefferson A.D., Freeman B.L. A crack-opening-dependent numerical model for self-healing cementitious materials, International Journal of Solids and Structures. – 2022 –Vol. 244–245 – 111601
6. Гольдштейн Р.В., Перельмутер М.Н. Трещина на границе соединения материалов со связями между берегами // Изв. РАН. МТТ. – 2001. – № 1. – С. 94–112.
7. Гольдштейн Р.В. Перельмутер М.Н. О кинетике формирования и роста трещин на границе соединения материалов // Изв. РАН. МТТ. – 2012. – № 4. – С. 32-49.
8. Perelmuter M. Boundary element analysis of structures with bridged interfacial cracks // Computational Mechanics. – 2013. – V. 51, № 4. – P. 523-534.
9. Banea M. D., da Silva L. F. M., Campilho R. D., Sato C. Smart Adhesive Joints: An Overview of Recent Developments // The Journal of Adhesion – 2014 – V.90 – P.16-40.
10. Khawam, A., Flanagan, D.R. Solid-state kinetic models: Basics and mathematical fundamentals // The Journal of Physical Chemistry. – 2006. – V. B 110. – P. 17315–17328
11. Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности твёрдых тел // Вест. АН СССР. – 1968. – № 3. – С. 46–52.
12. Регель В.Г., Слуцкер А.И., Э.Е.Томашевский. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука. – 1974. – 560 С.