

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОДЛЕНИЮ СРОКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОНСТРУКЦИИ

Стоянов В.В. (ОГАСА, г. Одесса)

Известно, что для элементов металлических конструкций содержащих трещину величина предела выносливости зависит от длительности периода роста длины трещины до критической. Это означает, что конструкция способная работать при определенной величине расчетного сопротивления, может, вследствие достижения трещиной критической длины, через короткий период времени получить недопустимые деформации или вообще разрушиться.

В механике разрушения твердых тел проблемы связанные с ростом трещин рассмотрены достаточно подробно и основательно проработаны в нескольких принципиально отличающихся моделях [1], [2].

- хрупкого разрушения (на базе энергетического или силового подхода);
- упруго-пластического разрушения;
- разрушения с учетом свойств пластичности и ползучести материалов.

Все перечисленные модели позволяют определить критическую длину трещины, когда трещина сверхбыстро самостоятельно (неуправляемо) растет вызывая критическую концентрацию напряжений и разрушение конструкции. Управлять развитием трещины пока мы не умеем. А вот «консервировать» трещины, наверное, возможно. Одним из перспективных направлений здесь может стать использование новых материалов на базе нанотехнологий, которыми можно было бы укреплять трещины. Пока, этого нет, но есть другой реальный метод «консервации». Для его применения требуется знакомство с некоторыми вопросами теории разрушения материалов.

Общие подходы решения покажем на модели хрупкого разрушения с позиции энергетического баланса. Рассмотрим какие существуют известные ограничения по критической длине трещины, и величины концентратора напряжений. Используем для этого одну из самых простых моделей механики разрушения – модель хрупкого разрушения, а в качестве инструмента решения выберем энергетический подход.

В этом случае, принимается условие – рост трещины должен быть процессом обязательно выгодным, и признания того факта, что

определенная часть материала от берегов трещины в глубь материала релаксирует, а упругая энергия переходит в поверхностную.

Именно такой подход был использован проф. С. Инглисом [3] для определения концентрации напряжения (K) в виде формулы:

$$K = 1 + 2\sqrt{\frac{l}{r}} \quad (1)$$

где l – полудлина трещины;

r – радиус кривизны кончика трещины.

Аналогичный результат при исследованиях прочности пластмасс был получен самостоятельно Я. Немец [4].

В некоторых источниках [2], [6] формула (1), приводится без корня, что возможно только для круглых отверстий, где размеры полудлины трещины и его радиус одинаковы. В других случаях следует руководствоваться выражением (1).

Заметим еще, что довольно часто в некоторых современных публикациях указывают автором формулы (1) А. Гриффитса (напр. стр. 10 [2]). Заслуга А. Гриффитса в другом – он блестяще использовал формулу (1), впервые обосновав на ее базе физику развития трещины, когда трещина в начальной стадии развития растет поглощая энергию (причем, линейно в месте с длиной трещины), а за границей критической полудлины ($l_{кр}$) трещина выделяет энергию из системы (но уже пропорционально квадрату полудлины l^2) [5].

Выражение (1), безусловно, важно, так как указывает на ключевую роль размера радиуса вершины трещины в росте концентрации напряжений. Вместе с тем, важно получить выражение, позволяющее определить критическую длину трещины и критические напряжения ($\sigma_{кр}$) на базе известных линейных, прочностных и жесткостных параметров. Обратимся для этого к одному из упомянутых выше методов – хрупкого разрушения [2].

В области релаксации (Рис.1) величины деформаций и напряжений уменьшаются при одновременном освобождении упругой энергии. Для образования двух новых поверхностей (по Гриффитсу) ограниченных берегами трещин требуются энергетические затраты:

$$G = 2l\gamma \quad (2)$$

где G – поверхностная энергия;

γ – удельная плотность поверхности энергии.

Энергия упругой деформации в единице объема определяется как половина произведения напряжений (σ) и относительных деформаций (ϵ). Площадь области релаксации может быть принята в виде площади квадрата (l^2) или круга (πl^2). Принимаем площадь релаксации πl^2 и запишем:

$$u = \frac{1}{2} \pi \sigma \epsilon l \quad (3)$$

или используя закон Гука получим:

$$u = \pi \frac{1}{2} \sigma^2 l^2 / (2E) \quad (4)$$

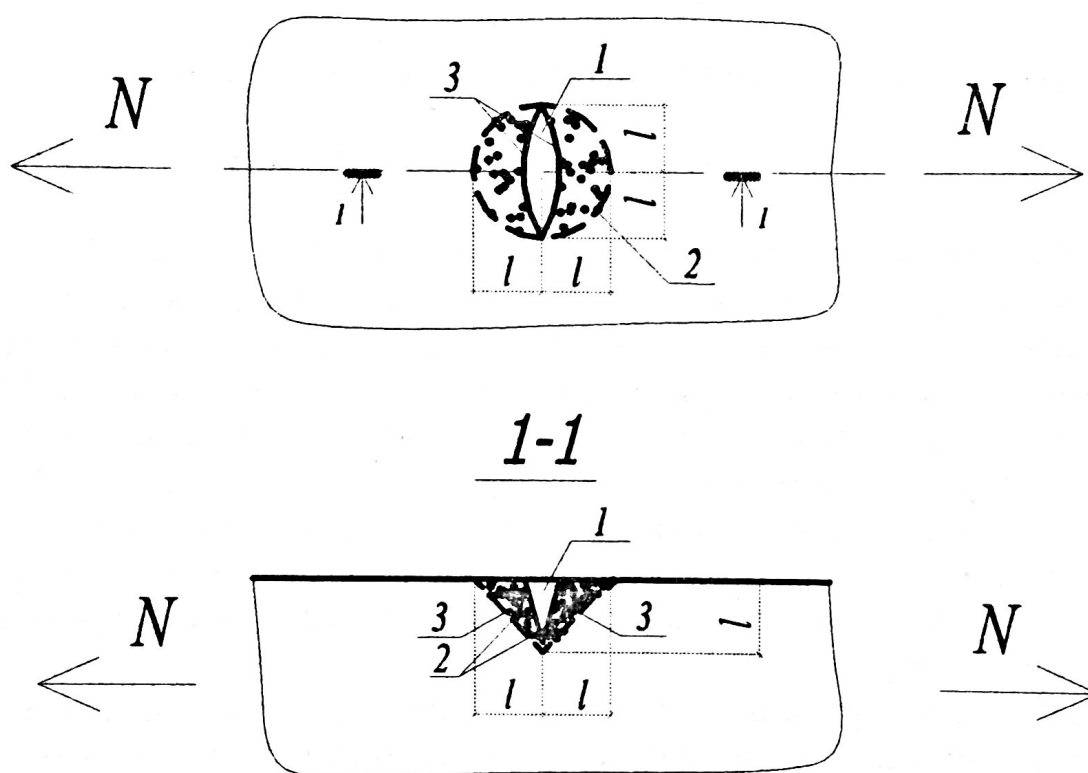


Рис.1. Схема расположения области релаксации вокруг трещины
1 – трещина; 2 – область релаксации; 3 – берега трещины.

Из сравнения выражения (2) и (4) следует, что количество энергии необходимое для образования новых поверхностей трещины пропорционально первой степени длины (l), в то время как количество энергии освобожденной при росте трещины пропорционально квадрату длины (l^2) трещины. Это свидетельствует о том, что при заданных напряжениях (σ) существует критическая длина трещины ($l_{кр}$) определяющая максимум общей энергии тела и определяется она

как разность величин поверхностей энергии (2) и энергии упругой деформации (4):

$$W = 2l\gamma - \pi\sigma^2 l^2 / (2E) \quad (5)$$

Максимум W находим из условия:

$$dW / (dl) = 0 \quad (6)$$

Дифференцируя (5) по длине трещины l получим выражение для определения критической полудлины трещины ($l_{кр}$):

$$l_{кр} = 2E\gamma / (\pi\sigma^2) \quad (7)$$

Из (7) следует выражение для критических напряжений:

$$\sigma_{кр} = \sqrt{2E\gamma / (\pi l)} \quad (8)$$

Установить возможные величины критической длины трещины ($l_{кр}$) и критических напряжений ($\sigma_{кр}$) возле вершины трещины необходимо для проектирования конструктивных мероприятий по «консервации» трещин. Выражение типа (7) и (8) можно получить для других различных типов разрушений, используя соответствующие методы механики разрушения [1], [2], [6]. Процесс «консервации» трещин можно проводить на любом этапе развития трещины, в том числе, на начальном этапе изготовления конструкции или в процессе эксплуатации задолго до достижения критических величин $l_{кр}$ и $\sigma_{кр}$.

Идея консервации трещины состоит в использовании конструктивных мероприятий обеспечивающих неизменными габариты трещины в наиболее ответственном месте усиливаемой конструкции при проектной нагрузке и заданном периоде ее работы.

Рост трещины сопряжен с обязательным расширением устья трещины, т.е. развития ее берегов (Рис.1). Очевидно, что постановка связей между берегами трещины, лишит ее возможности развиваться, т.е. образовывать новые поверхности и, следовательно, рост трещин прекратится или в худшем случае – замедлится. Самый простой способ конструктивного решения это установить накладки (Рис.2) Размеры накладки устанавливаем исходя из значений величины $l_{кр}$ и $\sigma_{кр}$ (Рис.2).

Длина накладки (l_n) принимается из расчета обеспечения необходимой площади для работы клеевого шва на скалывание. При этом площадь поверхности возможной релаксации материала ($\approx l^2$) не

учитывается. Ширину накладки устанавливаем из условия закрытия $2l_{кр}$ с расширением от вершины трещины на $2\delta_{ст}$ с целью выровнять возможные концентрации напряжений:

$$l_n = 2(l_{ск} - l_{кр}) \quad (9)$$

$$b_n = 2l_{кр} + 4\delta_{ст} \quad (10)$$

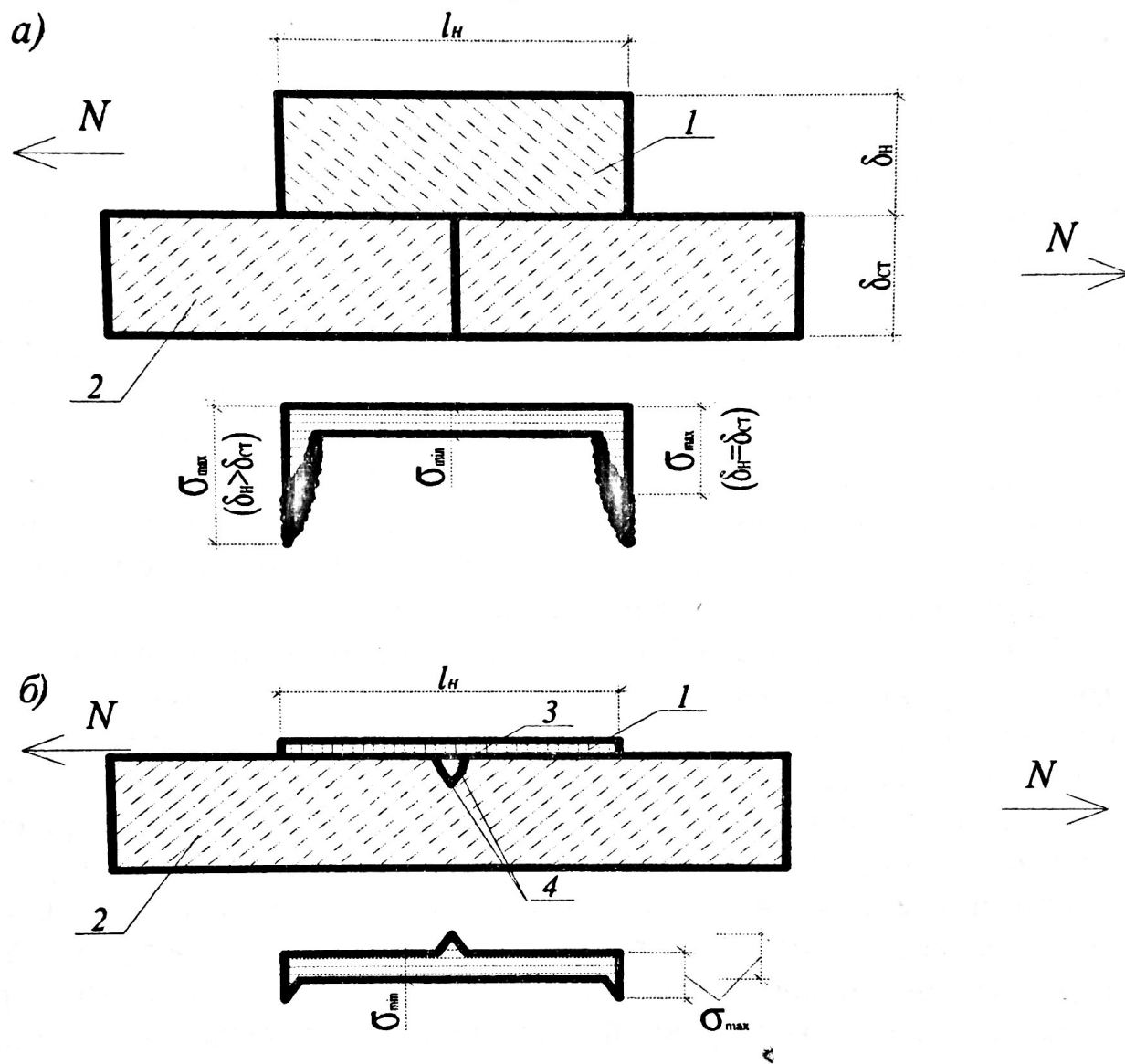


Рис. 2. Схема распределения напряжений в накладке

а) при $\delta_n > \delta_{ст}$; б) при $\delta_n \leq 1/20\delta_{ст}$

1 – накладки; 2 – стенка; 3 – трещина; 4 – берега трещины.

При выборе толщины накладки (δ_n) следует руководствоваться следующим регламентом. Известно, что при равнотолщинности накладки (δ_n) и стенки ($\delta_{ст}$) укрепляемой конструкции на концах накладки во много раз возрастают напряжения (Рис.3). В случае, если $\delta_n > \delta_{ст}$, то концентрация напряжения увеличивается значительно

больше, чем при $\delta_n = \delta_{cm}$. Отсюда следует необходимость уменьшить толщину накладки ($\delta_n < \delta_{cm}$). При этом регламентом для оптимального выбора толщины является условие, когда временный предел прочности ($\sigma_{n,y}^H$) материала накладки выше на порядок аналогичного показателя металла стенки, т.е. $\sigma_{n,y}^H \geq 10\sigma_{n,y}^M$, а модуль упругости материала накладки должен быть по величине не менее модуля упругости металла, т.е. $E_n \geq E_{cm}$. Окончательно накладки выбираем по условию $\delta_n \leq 1/20\delta_{cm}$, что ограничивает деформации накладки (Δ_n) величиной менее 0,01мм ($\Delta_n \leq 0,01\text{мм}$) и, тем самым, исключается расширение устья трещины и передвижение берегов.

Материалом для накладки, соответствующим обозначенным выше требованиям, может быть выбран углепластик, обладающий временным пределом прочности $\sigma_{пч} = 3,5 \cdot 10^3$ МПа и модулем упругости $2,3 - 3,0 \cdot 10^5$ МПа [9].

Процессу устройства накладки должен предшествовать анализ работы конструктивного элемента на базе опытных и расчетных данных с целью выявления наиболее проблемных мест, где возможна опасная концентрация напряжений и появление трещин. Затем определяются габариты накладки – l_n , b_n , δ_n . Углепластиковая накладка формируется из углеродных холстов типа Sika Wrap [9] толщиной каждый 0,13мм на базе клея Sikadur 330 [9]. Такой же клей используется для крепления накладки к стенке.

Углепластик, многослойный композиционный материал, обладает многими уникальными физико-механическими характеристиками, в том числе по продолжительности работы в условиях цикловой нагрузки. Так, для стали предел выносливости составляет $2 \cdot 10^6$ циклов нагружений, а в случае, когда циклическое напряжение превышает предел текучести, то разрушение может произойти раньше – при числе циклов порядка нескольких тысяч [10]. Углепластик способен выдержать вдвое больше чем сталь циклов нагружений без видимых признаков усталости. В этой связи, для целого ряда металлических конструкций (составные подкрановые балки, резервуары различного типа и др.) возникает возможность повысить усталостную прочность используя углепластик [8], [11]. Для этого, например, в составных подкрановых балках в местах стыка стенки с полками и ребрами жесткости устанавливают многослойные углепластиковые накладки.

На кафедре конструкций из металла, древесины и пластмасс ОГАСА изучаются проблемы увеличения предела выносливости для стали усиленной углепластиком. Предварительные экспериментальные исследования подтверждают теоретические предпосылки. После

завершения испытаний лабораторные образцы и серии моделей составных балок усиленных определенным образом углепластиком появиться возможность сделать окончательную оценку предлагаемого метода «замораживания» трещин и рекомендовать его в практику.

ЛИТЕРАТУРА

1. Седов Л.И. «Механика сплошной среды» Наука, М. 1976, 573с.
2. Зайцев Ю.В. «Механика разрушения для строителей» М., Высшая школа, 1991, 285с.
3. Inglis C.E. Transaction Institute Naval Archctects, v. 60, 1913.
4. Я. Немец и др. «Прочность пластмасс» М., Машиностроение, 1990.
5. Greffeth A.A. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids Philosophical transations of the Royal Society. London. ser. A v.221, №587, 1921.
6. Яременко А.Ф., Балдук П.Г. «Механика материалов и конструкций» Одесса, ВРС, 2001, 243с.
7. Стоянов В.В. «Новые подходы в управлении несущей способности конструкций» В сб. «Совр. стр. констр.» Одесса, ВРС, 2001, 164 - 167с.
8. Стоянов В.В. «Проблемы обеспечения несущей способности строительных металлических конструкций в полном объеме срока эксплуатации» В сб. VII Украинской НТК «Металлические конструкции» К., Сталь, 286 – 292с.
9. Strengthenig of structures with CFRP strips. Sika Carbo Dur Convention, okt/nov, 1997.
10. Горев В.В. «Металлические конструкции» т.1., М., «ВШ», 2002, 541с.
11. Стоянов В.В. «Металлические резервуары – некоторые проблемы проектирования и реконструкции» в ж-ле «Металлические конструкции» Д., УАМК, 2007, 45 – 49с.