

## ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДАМИ ТЕОРИИ ТРЕЩИН РАЗРУШЕНИЯ ХРУПКИХ СКЛЕЕК

*Б. М. Малышев, Р. Л. Салганик*

(*Москва*)

Соединение деталей конструкций путем склеивания нашло широкое применение. Это объясняется рядом преимуществ, которыми склеивание обладает по сравнению с другими видами соединений, а также тем, что в некоторых случаях, как например, при соединении полимеров с металлами или полимеров между собой, оно оказывается единственно приемлемым видом соединения. О склеивании, его применении и методах расчета и испытаний клеевых соединений имеется обширная литература (см. книги [1-8]).

Основной характеристикой клеевого соединения является его прочность. Прочность клеевого соединения определяется прилипанием клея к склеиваемым поверхностям — адгезией и собственной прочностью клея — когезией. Соответственно различают адгезионный (отслаивание без разрушения клеевого слоя) и когезионный (разрушение по клеевому слою) типы разрушения клеевых соединений. Количество адгезии (когезии) характеризуют работой, затрачиваемой на отклеивание единицы площади приклеенной поверхности — работой адгезии (когезии). Эта величина может быть разной в случае отрыва, сдвига или их сочетания.

В настоящее время имеется метод ее определения только для случая отклеивания тонкой пленки из достаточно гибкого материала. На использовании этого метода основаны стандартные приборы, в которых отслаивание пленки производится некоторым фиксированным способом. Методы определения работы адгезии (когезии) для соединений относительно жестких тел неизвестны. В связи с этим прочность склейки таких тел характеризуют другой величиной — удельным прилипанием, под которым понимается разрушающее напряжение в склейке при строго нормальному и равномерном (происходящем сразу во всех точках) отрыве. Аналогичная характеристика вводится и для сдвига. Соответственно этому основными видами испытаний являются разрыв образцов склеенных встык и внахлестку (фиг. 1, *a* и *b*).

При испытаниях разрезов, склеенных встык, из-за трудностей создания равномерного отрыва обычно получается большой разброс экспериментальных данных для удельного прилипания (см., например, [9]). Эти трудности привели даже к попытке достичь равномерного отрыва путем настолько быстрого его осуществления, чтобы скорость развития трещин, возникающих в слабых местах, не превышала скорости, с которой разъединяются другие участки контактирующих поверхностей, и процесс отрыва происходил в первом приближении равномерно по всем точкам площади [10].

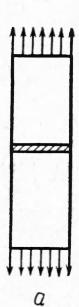
При испытаниях соединений внахлестку разброс осредненного по всей площади разрушающего напряжения сдвига обычно не так велик. Однако это не связано с равномерностью отрыва, который в данном случае явно происходит путем распространения трещин, а связано с тем, что, в противоположность предыдущему случаю, трещина всегда появляется в определенном месте — у конца нахлестки. На фиг. 2 приведены фотографии склеенных эпоксидным клеем поверхностей после отрыва: *a*, *b* — для случая соединения внахлестку полосок из оргстекла, *c* — для случая круглой пластиинки из оргстекла, которая приклеивалась к жесткой поверхности плашмя и отрывалась сосредоточенной силой.

При некоторой нагрузке у концов нахлестки можно было наблюдать появление трещин, которые затем с большой скоростью распространялись через все соединение. В случае *a* через все соединение прошла одна трещина, возникшая у левого конца нахлестки, что можно видеть, по характерным следам, которые обычно оставались на поверхности склейки после прохождения трещины. На фотографии эти следы представляют собой поперечные линии, обращенные выпуклостью в сторону движения трещины. В случае *b* трещина образовалась сначала у левого конца нахлестки, затем — у правого (место встречи этих трещин отмечено стрелкой).

Появление трещины именно у концов нахлестки можно объяснить, исходя из имеющихся теоретических результатов [3, 5], заключающихся в том, что при достаточно длинной нахлестке напряжения концентрируются у ее концов, а в средней части распределены практически равномерно. Если принять, что склейка разрушается,

когда напряжения в ней достигают определенной величины, то отсюда будет следовать вывод о возникновении трещины у концов нахлестки, где напряжения максимальны. Отсюда также получается наблюдаемое в действительности стремление разрушающей нагрузки к некоторому постоянному значению при увеличении длины нахлестки. Осредненное по всей площади разрушающее напряжение при этом будет уменьшаться и, следовательно, не может служить характеристикой прочности склейки.

Разобранные примеры иллюстрируют общий случай. Чаще всего разрушение склеек происходит путем распространения по ним трещин. Поэтому для определения прочности разрушающихся таким образом kleевых соединений естественно воспользоваться методами теории трещин [1], применявшимися до последнего времени к однородным материалам. Отметим сразу же, что эта теория позволяет проследить развитие уже имеющихся трещин и не затрагивает проблемы их зарождения, которая должна рассматриваться отдельно.



Фиг. 1

Применение этой теории для определения прочности склеек оправдывается тем, что не всегда возникновение трещины или начало развития уже имеющейся трещины (например, «непреклея») равнозначно разрушению всего соединения, как это имело место в разобранном примере соединения внахлестку. Часто вследствие устойчивости трещин для их продвижения требуется увеличивать приложенные нагрузки, так что разрушающие нагрузки для всего тела как целого не зависят от размеров исходных трещин и могут быть намного больше тех нагрузок, которые соответствуют началу движения трещин [2].

Несмотря на существенную роль трещин в процессе разрушения kleевых соединений, в существующих методах расчета и испытания kleевых соединений механизм разрушения путем распространения трещин не учитывается.

В предлагаемой работе дан основанный на изучении распространения трещин по склейке метод определения энергии разрушения (работы адгезии, когезии) в случае соединения между собой жестких тел. Показано, что при нормальном отрыве образцов, склеенных и затвердевших приблизительно в одинаковых условиях и испытанных по схемам с существенно различной геометрией, энергия разрушения оставалась практически постоянной в процессе устойчивого распространения трещины и не зависела ни от размеров образцов, ни от схемы испытания.

Постоянство энергии разрушения в процессе распространения трещины наиболее наглядно проявлялось в схеме, использующей отрыв нормальной сосредоточенной силой тонкой прозрачной пластиинки, приклеенной к твердой поверхности пластина. В этой схеме вследствие осевой симметрии трещина получалась дискообразной и на значительном промежуточном участке распространялась при почти постоянной силе, что, как показывает анализ, свидетельствует о постоянстве энергии разрушения.

Обнаруженное поведение энергии разрушения при нормальном отрыве вполне согласуется с принимаемым в теории трещин, распространяющихся в однородных материалах, предположением об автономности, т. е. независимости от приложенных нагрузок и геометрии системы напряженного состояния вблизи конца квазистатически продвигающейся трещины. В общем случае, когда в неразрушенной склейке вблизи конца трещины действуют как нормальные, так и касательные напряжения, можно ожидать автономной в том же смысле зависимости энергии разрушения от отношения этих напряжений. Одна из предложенных схем позволяет определять такую зависимость.

Эта универсальная для данной склейки зависимость является единственной характеристикой склейки, необходимой для применения теории трещин к расчету прочности хрупких и квазихрупких kleевых соединений.

### § 1. Результаты теоретического исследования и основные предположения. 1°. Предварительно приведем основные положения теории распространения трещин в однородном материале [1].

В однородном материале (для простоты рассмотрим пластинку) трещины распространяются так, что в неразрушенном теле вблизи конца трещины на площадке, расположенной вдоль направления распространения трещины, действуют только растягивающие напряжения, которые создают нормальный разрыв.

Экспериментально подтверждено, что развитие трещин в однородном материале согласуется с основными принимаемыми в теории трещин гипотезами.

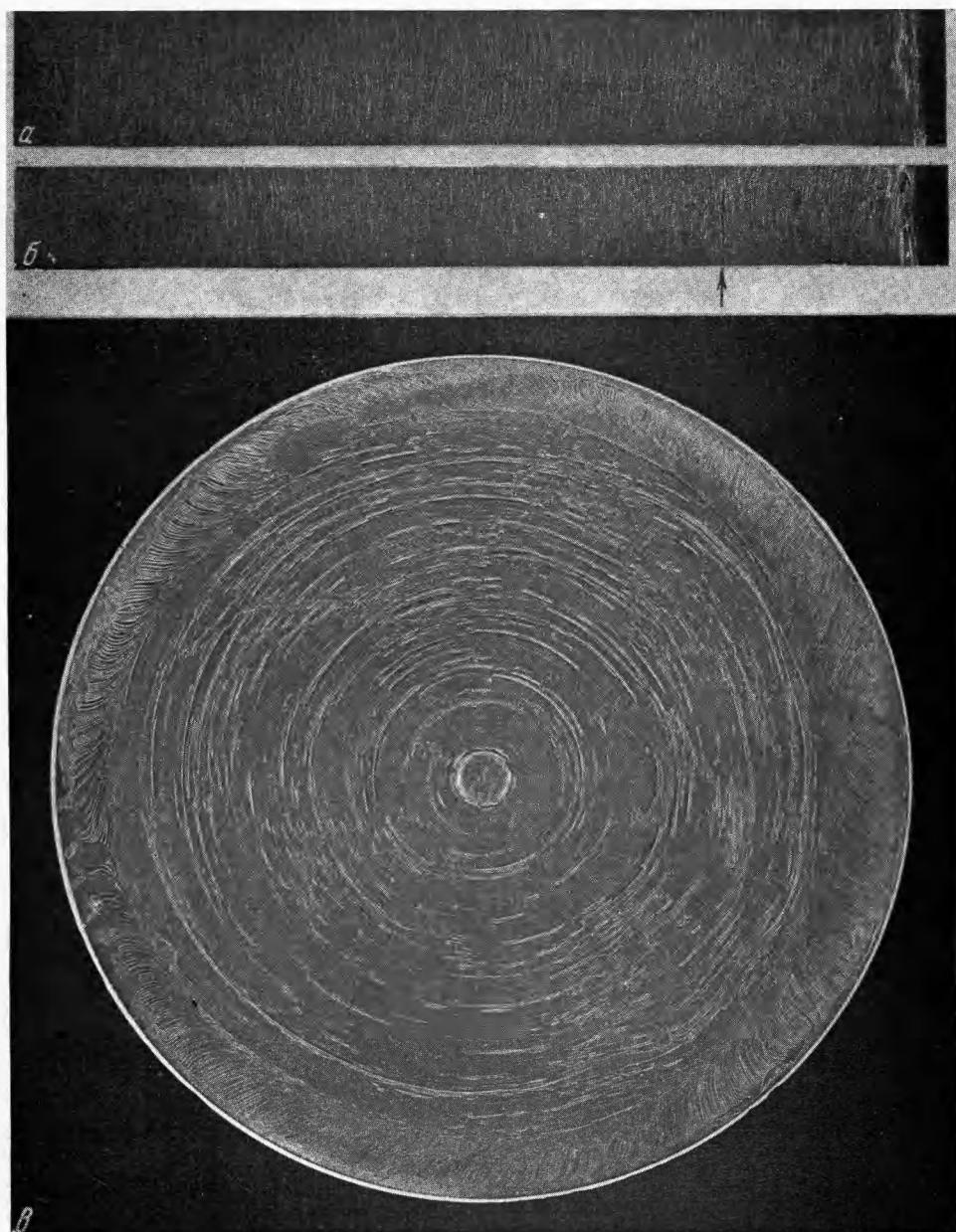


Рис. 2

1. Участки трещины вблизи концов, где внутренние связи еще не окончательно уничтожены и существенно взаимодействие (сцепление) ее противоположных берегов (концевые области), малы сравнительно с размером трещины.

2. Конец трещины начинает продвигаться в глубь тела только после достижения силами сцепления некоторой максимальной величины, причем дальнейшее квазистатическое движение этого конца происходит так, что распределение сил сцепления, а вместе с ним некоторая интегральная характеристика их интенсивности — модуль сцепления, и форма трещины в концевой области автономны, т. е. не изменяются при изменениях приложенных нагрузок и геометрии.

Затрачиваемая на разрушение работа, идущая на образование новой поверхности (энергия разрушения), выражается через модуль сцепления, модуль упругости и коэффициент Пуассона и поэтому, согласно второй гипотезе, должна оставаться постоянной в процессе распространения трещины.

При помощи указанных гипотез определение равновесия пластинки с трещинами сводится к математически точно поставленной задаче.

Существенно, что такой подход применим не только к истинно хрупким материалам (сравнительно немногочисленным), но и к случаю, когда распространение трещины сопровождается пластическими деформациями в узкой приповерхностной зоне (квазихрупкое разрушение). Этот случай реализуется для большинства конструкционных материалов.

2°. Рассмотрим распространение трещин по склейке, воспользовавшись некоторыми результатами работы [13]. Отличие распространения трещины по склейке между двумя достаточно прочными телами прежде всего заключается в том, что трещина несвободна в выборе направления и поэтому в ее подвижном конце, вообще говоря, уже не будет чисто нормального разрыва.

Для изучения такой трещины подходящей математической моделью является разрез, расположенный вдоль границы соединения двух упругих тел, между которыми вне разреза имеет место полное сцепление. В рассматриваемом случае, как и для трещины в однородном материале, основную роль играет исследование распределения напряжений и смещений в малой окрестности конца разреза. Поэтому, без ограничения общности, можно рассмотреть разрез длины  $l$ , расположенный вдоль прямолинейной границы склейки (оси  $x$ ) двух бесконечных пластинок. Анализ решения соответствующей задачи теории упругости [14] показывает, что на продолжении разреза вблизи его конца распределение нормальных  $\sigma_y$  и касательных  $\tau_{xy}$  напряжений, вызванных приложенными нагрузками, определяется выражениями

$$\begin{aligned} \sigma_y &= -\frac{1}{V^s} \left[ A_0 \cos \left( \beta \ln \frac{s}{l+s} \right) - B_0 \sin \left( \beta \ln \frac{s}{l+s} \right) + o(1) \right] \\ \tau_{xy} &= -\frac{1}{V^s} \left[ A_0 \sin \left( \beta \ln \frac{s}{l+s} \right) + B_0 \cos \left( \beta \ln \frac{s}{l+s} \right) + o(1) \right] \quad (1.1) \\ \beta &= \frac{1}{2\pi} \ln \frac{\mu_1 + \mu_2 v_1}{\mu_2 + \mu_1 v_1}, \quad v_{1,2} = 3 - 4v_{1,2} \end{aligned}$$

Здесь  $\mu_1, \mu_2$  — модули сдвига,  $v_1, v_2$  — коэффициенты Пуассона склеенных материалов,  $s$  — расстояние от рассматриваемой точки на продолжении разреза до конца разреза,  $A_0, B_0$  — «коэффициенты интенсивности напряжений», вычисляемые через приложенные нагрузки; величина  $\beta$  служит показателем различия свойств склеенных материалов, она обращается в нуль, когда эти свойства совпадают.

Когда материалы одинаковы ( $\beta = 0$ ), напряжения вблизи конца разреза изменяются монотонно, безгранично возрастая при  $s \rightarrow 0$ . При этом нормальные напряжения пропорциональны коэффициенту  $A_0$ , касательные —  $B_0$ .

Когда материалы различны ( $\beta \neq 0$ ), характер зависимости качественно остается прежним на расстояниях от конца разреза, превышающих некоторое  $x_*$

$$x_* \approx l \exp(-\pi/2\beta) \quad (1.2)$$

На более близких расстояниях ( $s < x_*$ ) характер зависимости существенно меняется: напряжения, безгранично возрастаю по абсолютной величине, будут с бесконечно увеличивающейся частотой менять знак по мере приближения к концу разреза, а нормальные и касательные напряжения, как видно из формул (1.1), зависят от обоих коэффициентов  $A_0, B_0$ . При этом для противоположных берегов разреза получается физически абсурдный результат, заключающийся в том, что они проникают друг в друга (это происходит с частотой, увеличивающейся по мере приближения к концу разреза). Этот недостаток математической модели будет устранен, если предположить, что противоположные берега, выпучиваясь, налегают друг на друга и образуют площадки контакта. Область распространения этих площадок вблизи конца разреза, так же как и область колебаний напряжений на его продолжении, имеет протяженность порядка  $x_*$ . Максимальная оценка для  $x_*$  получается, если предположить наименьший из коэффициентов Пуассона склеенных материалов равным нулю. Тогда  $\beta < 0.17$  и  $x_* < 10^{-4}l$ . В реальном случае можно считать, что этот коэффициент не меньше 0.2, и тогда  $x_* < 10^{-6}l$ .

На площадках контакта возникают силы реакции, которые для определения напряженного состояния вблизи конца трещины должны быть учтены наряду с приложенными силами. Кроме того, в реальной трещине должны быть учтены силы взаимодействия противоположных берегов, действующие со стороны сильно продеформированной, но еще неразрушенной склейки. Все эти силы дают на продолжении трещины напряжения, тоже выражющиеся по формулам (1.1), но со своими значениями коэффициентов интенсивности  $A', B'$ . При равновесии действие этих сил должно компенсировать действие приложенных нагрузок. Это выражается равенствами

$$A_0 + A' = 0, \quad B_0 + B' = 0 \quad (1.3)$$

которые, как видно из выражений (1.1), обеспечивают на некоторой длине  $\lambda$  компенсацию напряжений, возникающих от приложенных нагрузок, так что напряжения на продолжении трещины конечны, и происходит плавное смыкание противоположных берегов трещины на ее концах.

Длина  $\lambda$  в реальной трещине соответствует участку перехода от полностью разрушенной склейки к неразрушенной склейке и для достаточно хрупких склеек имеет порядок толщины  $b$  клеевого слоя. Если  $\lambda < x_*$ , то определяемые формулами (1.1) колебания напряжений  $\sigma_y$  и  $\tau_{xy}$  в неразрушенной склейке будут иметь место только на расстояниях от конца трещины, превышающих  $\lambda$ . При  $\lambda > x_*$  этих колебаний не будет совсем, и при описании явлений в концевой области отличием показателя  $\beta$  от нуля можно будет пренебречь. Как видно из приведенных оценок для  $x_*$ , именно этот случай имеет место в реальных склейках, так как толщина клеевого слоя не бывает меньше 0.01 мм.

Принимаемые для трещин в однородном теле две гипотезы можно распространить и на рассматриваемый случай трещины в склейке. Первая гипотеза о малости концевой области переносится без изменения. Вторая гипотеза обобщается и заключается в том, что квазистатическое продвижение трещины начинается и происходит при достижении в неразрушенной склейке вблизи конца трещины некоторого предельного состояния, при котором нормальные и касательные напряжения в этом месте связаны между собой функциональной зависимостью, автономной в прежнем

смысле, т. е. не изменяющей своего вида при изменении приложенных нагрузок и геометрии системы. В силу равенств (1.3) и того, что можно пренебречь  $\beta$  в (1.1), напряжения в склейке вблизи равновесного конца трещины выражаются через коэффициенты интенсивности  $A_0, B_0$ , так что имеет место автономная зависимость между этими коэффициентами.

Распространение трещины сопровождается необратимыми процессами разрушения склейки. На это затрачивается некоторая работа. Эта работа адгезии (когезии), отнесенная к единице площади новой поверхности, описанной контуром трещины при его перемещении в окрестности данной точки в глубь склейки, представляет собой удельную поверхностную энергию разрушения, которую обозначим через  $T$ . Энергия разрушения  $T$  однозначно определяется силами взаимодействия противоположных берегов трещины в концевой области и в случае квазистатического распространения трещины выражается через  $A_0, B_0$  по формуле

$$T = \frac{\pi}{2} \frac{(\mu_1 + \mu_2 x_1)(\mu_2 + \mu_1 x_2)}{\mu_1 \mu_2 [\mu_1(x_2 + 1) + \mu_2(x_1 + 1)]} (A_0^2 + B_0^2) \quad (1.4)$$

Поэтому указанная зависимость между  $A_0$  и  $B_0$  может быть записана как зависимость энергии разрушения  $T$  от какой-либо комбинации  $A_0$  и  $B_0$ , не являющейся функцией от  $A_0^2 + B_0^2$ .

Учитывая, что при рассмотрении явлений вблизи конца трещины в реальной склейке отличием показателя  $\beta$  от нуля можно пренебречь, из формул (1.1) получаем пропорциональность нормальных напряжений в склейке коэффициенту  $A_0$ , а касательных — коэффициенту  $B_0$ , вплоть до конца трещины. Поэтому удобно выбрать в качестве аргумента, от которого зависит энергия разрушения  $T$  в состоянии подвижного равновесия, величину  $A_0 / B_0$ , равную отношению нормальных  $\sigma_y$  и касательных  $\tau_{xy}$  напряжений в склейке вблизи конца трещины. Таким образом, получаем автономную зависимость<sup>1</sup>

$$T = T_* f(A_0 / B_0) = T_* f(\sigma_y / \tau_{xy}) \quad (1.5)$$

где  $T_*$  — какое-нибудь характерное значение  $T$ , например, соответствующее нормальному отрыву ( $A_0 / B_0 = \infty$ ).

Эта зависимость будет иметь место также и для пространственных трещин при условии, что отсутствуют напряжения сдвига вдоль контура. Учет последних не представляет затруднений и приводит к добавлению еще одного коэффициента интенсивности  $C_0$ , так что в выражении (1.5) будут два аргумента:  $A_0 / B_0$  и  $A_0 / C_0$ , равные отношению нормальных напряжений в склейке к касательным, направленным соответственно перпендикулярно контуру трещины и вдоль него.

**§ 2. Постановка задачи экспериментального исследования.** Для экспериментальной проверки существования зависимости (1.5) нужна схема, допускающая простое определение коэффициентов интенсивности  $A_0$  и  $B_0$  через измеряемые величины.

1°. В качестве такой схемы можно предложить отрыв двух тонких скленных встык пластинок сосредоточенными силами, приложенными к противоположным берегам трещины (фиг. 3). Для не очень малых углов  $\alpha$  между направлениями силы и трещины эта схема легко осуществима, и в случае длин трещин, малых сравнительно с размерами пластинок, можно получить весьма простые аналитические зависимости.

<sup>1</sup> Если бы при описании явлений в концевой области нельзя было считать  $\beta = 0$ , то в выражении (1.1) существенно входил бы размер трещины  $l$ , и тогда автономной зависимости между коэффициентами  $A_0, B_0$  либо не было бы вообще, либо она должна была бы сводиться к постоянству энергии разрушения  $T$  при любых значениях отношения  $A_0 / B_0$ .

Для левого конца получаем

$$T = \frac{\pi}{2} \frac{(\mu_1 + \mu_2 \kappa_1)(\mu_2 + \mu_1 \kappa_2)}{\mu_1 \mu_2 [\mu_2(\kappa_1 + 1) + \mu_1(\kappa_2 + 1)]} \frac{P^2 l_2}{(l_1 + l_2) l_1 b^2}, \quad \frac{A_0}{B_0} = \operatorname{tg} \alpha \quad (2.1)$$

где  $b$  — толщина пластинок, остальные обозначения показаны на фиг. 3. Чтобы получить отсюда формулы для правого конца, нужно поменять местами индексы 1, 2 и заменить  $\alpha$  на  $\pi - \alpha$ .

Таким образом, в рассматриваемой схеме нормальные и касательные напряжения в склейке вблизи конца трещины относятся друг к другу так же, как нормальная и касательная составляющие приложенной сосредоточенной силы.

Из приведенных выражений видно, что в этой схеме проверка существования зависимости (1.5) сводится к проверке постоянства энергии разрушения  $T$  в процессе продвижения каждого из концов трещины при данном фиксированном значении угла  $\alpha$ .

В случае, если это постоянство установлено при различных  $\alpha$ , можно найти самую зависимость (1.5), построив график  $T = T(\operatorname{tg} \alpha) = T(A_0/B_0)$ .

2°. Если ограничиться только нахождением характерных точек зависимости (1.5), в частности, энергии разрушения, соответствующей нормальному отрыву, то может быть предложена более простая схема, заключающаяся в отрыве нормальной сосредоточенной силой тонкой балки, приклеенной к недеформируемой поверхности (фиг. 4). Эта схема аналогична схемам, применяемым для определения энергии разрушения однородных тел. Впервые<sup>1</sup> такая схема была использована для определения поверхностного натяжения слюды [15]. Выражение для  $T$  получается из уравнения сохранения энергии

$$P\delta w = \delta\Pi + Tb\delta l \quad (2.2)$$

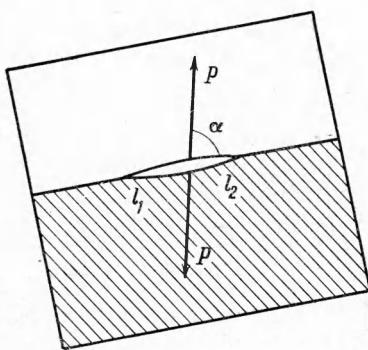
Здесь  $P$  — сила,  $w$  — перемещение отгибающего конца,  $\Pi$  — запасенная в балке упругая энергия,  $l$  — длина трещины,  $b$  — ширина балки. Вследствие недеформируемости поверхности, от которой происходит отрыв, балку можно считать жестко заделанной в конце трещины (консоль). Тогда

$$w = \frac{Pl^3}{3EI}, \quad \Pi = \frac{3EIw^2}{2l^3} \quad (I = \frac{bh^3}{12}) \quad (2.3)$$

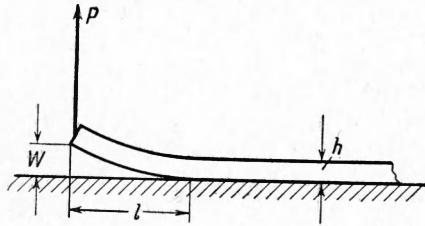
где  $E$  — модуль упругости,  $h$  — высота балки. Из соотношений (2.2), (2.3) находим

$$T = \frac{3Pw}{2bl} = \frac{P^2 l^2}{2bEI} = \frac{9EIw^2}{2bl^4} = \left( \frac{9P^4 w^2}{8bEI} \right)^{1/3} \quad (2.4)$$

<sup>1</sup> С иными чем здесь целями близкие схемы рассматривались в связи с вопросами адгезии в статьях сборника [16], стр. 101—145. (Замечание при корректуре.)



Фиг. 3



Фиг. 4

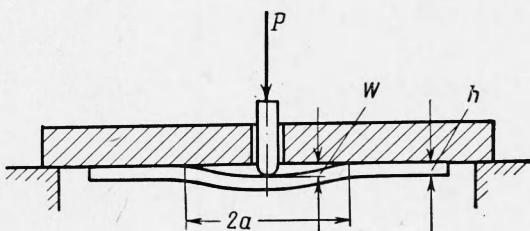
3°. Гораздо удобнее для определения энергии разрушения при нормальном отрыве другая схема. Эта схема заключается в отрыве сосредоточенной силой тонкой пластинки, приклеенной к жесткой поверхности плашмя (фиг. 5). Вследствие осевой симметрии трещина будет дискообразной. Принимая, как и в предыдущей схеме, жесткую заделку пластины по контуру трещины, получим для прогиба  $w$  и потенциальной энергии  $\Pi$  выражения.

$$w = \frac{Pa^2}{16\pi D}, \quad \Pi = \frac{8\pi Dw^2}{a^2}$$

$$(D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}) \quad (2.5)$$

где  $h$  — толщина пластины,  $a$  — радиус трещины. Отсюда и из уравнения сохранения энергии (2.2), в котором нужно заменить  $bdl$  на  $2\pi a$ , получим

$$T = \frac{P^2}{32\pi D^2} = \frac{Pw}{2\pi a^2} = \frac{8Dw^2}{a^4} \quad (2.6)$$



Фиг. 5

так что энергия разрушения  $T$  выражается только через нагрузку  $P$  и постоянную жесткость пластины  $D$ . Таким образом, постоянство энергии разрушения в данном случае влечет за собой постоянство отрывающей силы  $P$ .

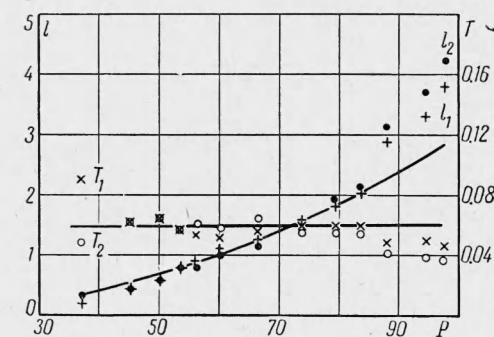
**§ 3. Постановка опытов и результаты испытаний<sup>1</sup>.** Для возможно более резкого проявления различия упругих свойств склеенных материалов испытания проводились со склейками оргстекла с оргстеклом и оргстекла со сталью, модуль упругости которой приблизительно в 70 раз больше модуля упругости оргстекла. Выбор оргстекла в качестве одного из склеиваемых материалов определился тем, чтобы можно было легко наблюдать и измерять трещину.

1°. *Склевание.* Так как образцы склеивались из непористых материалов и испытывались при комнатной температуре, то для равномерного распределения клеевого слоя и предотвращения появления в нем температурных напряжений нужен был маловязкий клей с небольшим содержанием летучих веществ, затвердевающий при комнатной температуре. Такой клей приготовлялся на основе эпоксидной смолы ЭД-6 (10 г) с добавлением полиэтиленполиамина (0,8 или 1 г) в качестве отвердителя. В некоторых случаях применялся ацетон в качестве разбавителя смолы (0,5 или 1 г) или пластификатор — дибутилфталат (5, 10%). Поверхности образцов, подлежащие склеиванию, тщательно механически обрабатывались, включая притирку на плите с мелким наждачным порошком. Затем эти поверхности обезжиривались четыреххлористым углеродом и ацетоном. Эпоксидная смола перед склеиванием подогревалась до 50—60° С. До этой же температуры подогревались и образцы. После вливания в смолу отвердителя состав тщательно перемешивался и смесь наносилась на склеиваемые поверхности по возможности ровным слоем, после чего части образца соединялись вместе, устанавливались на ровную горизонтальную поверхность, и на них помещался груз, так что затвердевание происходило при комнатной температуре под давлением 0,5—1 кг/см<sup>2</sup>. После затвердевания, продолжавшегося в разных случаях от одних до десяти суток, выдавленный клей счищался, и образцы испытывались. Толщина клеевого слоя составляла десятые доли миллиметра.

<sup>1</sup> В проведении экспериментов большую помощь оказали Г. В. Бычков, Н. С. Турбанова, Д. И. Генералов, С. Г. Карташев.

2°. *Испытания пластинок, склеенных встык.* Применялись пластиинки толщиной 0.5, 0.6, 0.8 см, имевшие длину 30 см и ширину 6 и 12 см для стали и оргстекла соответственно. Попарно склеивались (вдоль длинной стороны) пластиинки одинаковой толщины. Испытания проводились на стандартной разрывной машине кинематического типа с рычажным динамометром.

Сосредоточенные силы прикладывались к берегам трещины при помощи стальных проволок. Проволоки продевались в специально просверленные вблизи границы склейки отверстия и отгибались вдоль пластиинки, образуя П-образные петли. Концы проволок закреплялись в захватах машины. При некотором натяжении, обычно превышавшем 30 кг, начинала образовываться трещина. Распространение этой трещины вызывалось дальнейшим увеличением силы. Сила измерялась по шкале динамометра, расстояния от



Фиг. 6

концов трещины до места приложения силы — по линейке. Большинство опытов было проведено для случая нормального разрыва, когда направления трещины и силы составляли прямой угол. Ряд опытов был проведен для непрямых углов (косой отрыв). Последнее достигалось поворотом пластиинки, которая в процессе распространения трещины образовывала фиксированный угол с вертикалью.

Энергия разрушения определялась по формуле (2.1). Для оргстекла принималось  $E = 3 \cdot 10^4 \text{ кг} / \text{см}^2$ ,  $v = 0.4$ . Сталь, так как она склеивалась с оргстеклом, можно было считать абсолютно твердой.

На фиг. 6 приведены типичные результаты для изменения расстояний  $l_1$  и  $l_2$  (см) от концов трещины до места приложения силы и соответствующие значения энергий разрушения  $T_1$ ,  $T_2$  (кг / см) в зависимости от величины силы  $P$  (кг) (образец — «оргстекло — сталь», клей — 10 г ЭД-6, 0.8 г полиэтиленполиамина, 1 г ацетона; время затвердевания  $\sim 5$  суток). Из этих результатов видно, что существует некоторый промежуточный участок постоянства энергии разрушения в интервале значений растягивающей силы  $P$  от 45 до 85 кг. Энергия разрушения на этом участке близка к  $0.06 \text{ кг} / \text{см}$ . Для этого значения энергии разрушения на фиг. 6 приведен график изменения длины  $l_1 = l_2$  в зависимости от силы  $P$ , вычисленный по формуле (2.1). Разброс при малых нагрузках связан со случайным характером начала процесса и неупругим поведением материала вблизи точек приложения силы. При больших нагрузках происходит кажущееся падение энергии разрушения. Это объясняется не учитываемым при вычислении энергии разрушения влиянием границ. Как видно из приведенного примера, для использованных пластиинок приходится считаться с влиянием границ уже при длинах трещин порядка  $(l_1 + l_2) \sim 4\text{--}6 \text{ см}$ .

Несколько испытаний, проведенных при косом разрыве, показало, что при фиксированном угле между силой и трещиной энергия разрушения остается приблизительно постоянной, но неодинаковой для обоих концов. Энергия разрушения меньше, а трещина соответственно длиннее с той стороны, где угол между силой, приложенной к оргстеклу, и трещиной — острый. С этой стороны касательные напряжения более способствуют отрыву, чем с противоположной. При угле  $60^\circ$  отношение энергий разрушения было равно полутора, а при угле  $30^\circ$  оно составляло уже 7—8.

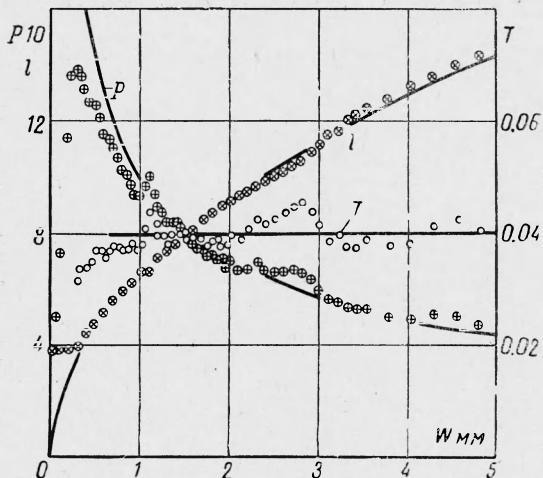
3°. Испытания балок. Балки изготавливались из стали и оргстекла и имели следующие размеры поперечного сечения: ширина  $b = 0.5, 0.6, 0.8 \text{ см}$ , высота  $h = 1.0, 1.2, 1.5 \text{ см}$ . Попарно склеивались балки с одинаковой шириной. При испытаниях всегда производился отрыв балок из оргстекла. Для определения энергии разрушения измерялись отгибающая сила, перемещение конца балки и длина трещины.

Измерение отгибающей силы требует применения достаточно жесткого (мало податливого), но очень чувствительного динамометра, способного без заметного перемещения реагировать на небольшие изменения усилий. В противном случае процесс испытания осложняется, так как трещина может стать неустойчивой. Так, например, при испытании путем подвешивания груза начавшийся процесс распространения трещины пойдет до полного разрушения, поскольку усилие, как это видно из формул (2.4), необходимое для устойчивого распространения трещины, должно падать по мере увеличения ее длины, а сила, создаваемая подвешенным грузом, остается постоянной.

В качестве такого динамометра была использована тонкая стальная пластинка с наклеенным на нее тензодатчиком. Эта пластинка прикреплялась к концу балки из оргстекла, тогда как другая балка (из оргстекла или стали) жестко зажималась по всей длине. Усилие создавалось путем постепенного перемещения пластинки в перпендикулярном к линии склейки направлении.

На фиг. 7 приведены типичные результаты для изменения силы  $P$  ( $\text{кг}$ ), длины трещины  $l$  ( $\text{см}$ ) и энергии разрушения  $T$  ( $\text{кг} / \text{см}$ ) в зависимости от прогиба  $w$  ( $b = 6 \text{ мм}$ ,  $h = 10 \text{ мм}$ , клей — 10 г ЭД-6, 1 г полиэтиленполиамина, 1 г дибутилфталата, отрыв от оргстекла, время затвердевания  $\sim 5$  суток). Энергия разрушения, как видно из графиков, колеблется в весьма узких пределах около  $0.04 \text{ кг} / \text{см}$ . Для этого значения энергии приведены графики зависимости  $P$  и  $l$  от  $w$ , вычисленные из соотношений (2.4). Значительные отклонения экспериментальных точек от этих кривых имеются на начальном участке, где происходило линейное возрастание силы, пока трещина стояла, и вблизи  $w = 1 \text{ мм}$ ,  $w = 2.75 \text{ мм}$ , где наблюдались остановка и задержка развития трещины, связанные, по-видимому, с неоднородностью склейки.

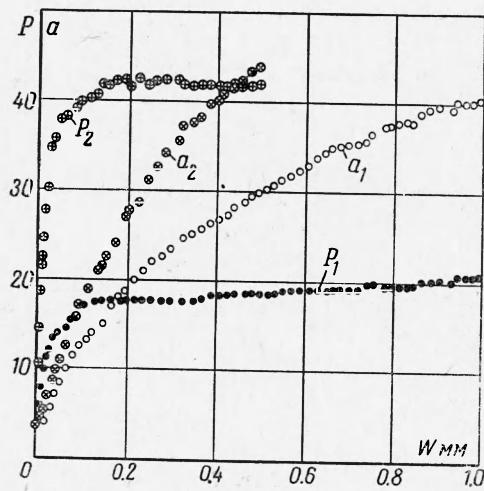
4°. Испытания пластинок, приклеенных плашмя. Пластинки круговой формы диаметром 110  $\text{мм}$  вырезались из листов оргстекла толщиной 3 и 5  $\text{мм}$  и приклеивались к стальной плите, в которой было просверлено отверстие. Усилие, вызывавшее отрыв пластинки, передавалось через вставлявшийся в это отверстие стальной стержень. Испытания проводились на 5-тонной машине Шоппера. Подача осуществлялась вручную. Сила измерялась по динамометру, прогиб — по индикатору, диаметр трещины — по линейке. При хорошей однородной склейке трещина получалась достаточно круглой. Это видно из приведенной на фиг. 2, в фотографии следов



Фиг. 7

в виде концентрических окружностей, оставленных трещиной на поверхности оторванной пластинки. Наблюдая трещину, можно было по отклонениям ее формы от круговой отбраковывать образцы с неоднородной склейкой.

На фиг. 8 приведены типичные графики изменения отрывающей силы  $P$  и радиуса  $a$  трещины в зависимости от прогиба  $w$  для двух пластинок толщиной 3 и 5 мм, приклеенных и затвердевших в одинаковых условиях (клей — 10 г ЭД-6, 0,8 г полиэтиленполиамина; время затвердевания  $\sim 5$  суток). Из этих графиков видно, что на некотором промежуточном участке развитие трещины происходило при почти постоянной отрывающей силе (меньшая сила соответствует более тонкой пластинке). Из первой формулы (2.6) видно, что при этом оставалась постоянной энергия разрушения. Для обеих пластинок получаются приблизительно одинаковые значения энергии разрушения  $\sim 0,017 \text{ кг/см}$ .



Фиг. 8

при относительно больших прогибах, в конце процесса, связаны с неприменимостью на этих его этапах приближенной теории тонких пластин, использованной для получения формул (2.6). Эта теория применима при условиях, что  $a \gg h \gg w$ , из которых первое не выполняется на начальном, а второе — на конечном этапах процесса нагружения. При неудачном подборе параметров может вообще не быть области, где одновременно выполняются оба неравенства, и тогда промежуточного участка постоянства силы не получится.

Сопоставление с более точными теориями [17] показывает, что отклонения силы  $P$  от постоянства на начальном и конечном участках процесса нагружения должны быть в наблюдаемую на опыте сторону.

Приведенные типичные примеры характеризуют ход кривых, полученный во многих испытаниях. Эти испытания показали, что на соответствующих промежуточных участках процесса нагружения, где справедливы формулы, использованные для вычисления энергии разрушения, последняя оставалась приблизительно постоянной, и это постоянство наблюдалось также в испытаниях склеенных встык пластинок в случае косого отрыва.

Нужно отметить, что для энергии разрушения, вычисленной по разным формулам как в случае балочной схемы, так и схемы с дискообразной трещиной, получались несколько отличающиеся значения, что связано с не вполне упругим поведением оргстекла.

Отметим также, что все рассмотренные экспериментальные схемы основаны на использовании устойчиво развивающихся трещин. Для обеспечения устойчивости развития трещин во всех трех схемах нужно, чтобы динамометр и другие элементы системы нагружения были жесткими, т. е. запасали пренебрежимо малую потенциальную энергию. Это особенно необходимо в балочной схеме, гденейшей длине равновесной трещины соответствует меньшая отгибающая сила, запаздывание в изменении которой может привести к быстрому динамическому развитию трещины. Меньших предосторожностей в этом отношении требует схема с дискообразной трещиной, распространяющейся в основном при почти постоянной силе, и еще меньших — схема отрыва склеенных встык пластин, характеризующаяся возрастанием силы, необ-

ходимой для продвижения трещины. Но даже в этой последней схеме, как показали эксперименты, может быть неустойчивость, если система нагружения слишком податлива.

Для определения энергии разрушения при нормальном отрыве наиболее удобной представляется схема с дискообразной трещиной. В этой схеме для определения энергии разрушения достаточно довести трещину до тех пор, пока сила не перестанет изменяться, и замерить это значение силы. Такой способ измерения энергии разрушения годен как для случая, когда, по крайней мере, один из склеенных материалов прозрачен, так и для случая непрозрачных материалов; причем, если трещина оставляет следы, подобные изображенным на фиг. 8, то по этим следам можно проверить дискообразность и по отклонениям от нее судить о степени однородности склейки. Вообще следует отметить, что для определения энергии разрушения без измерения длины трещины в случае непрозрачных материалов пригодна и балочная схема, в которой достаточно определять  $P$  и  $w$  (см. последнюю формулу (2.4)), а также схема отрыва склеенных в стык пластин при условии, что кроме силы  $P$ , будет измеряться относительное смещение двух каких-либо точек поверхности пластин.

Измерения показали, что в случае нормального отрыва во всех трех схемах для многих образцов, склеенных и затвердевших приблизительно в одних и тех же условиях, получались согласующиеся между собой значения энергии разрушения. Однако процент случаев, когда этого не наблюдалось, был все же велик. Это связано с тем, что малые изменения таких технологических условий, как дозировка, способ нанесения клея и состояние поверхностей, температура при склеивании и затвердевании, давление и др., сильно влияли на энергию разрушения и не могли быть устраниены обычными довольно грубыми методами контроля, применявшимися в рассмотренных экспериментах. Высокая чувствительность энергии разрушения к изменениям технологических параметров процесса склеивания может быть использована для строгого контроля качества склейки.

Влияние различных факторов, определяющих поведение клея и его взаимодействие со склеенными поверхностями, может исследоваться теоретически на основе принятия тех или иных конкретных моделей. Однако для применения теории трещин к оценке прочности хрупких и квазихрупких kleевых соединений это не обязательно. Рассмотренные методы экспериментального определения энергии разрушения и ее зависимости от отношения нормальных напряжений к касательным в неразрушенной склейке вблизи конца трещины позволяют находить единственную необходимую для применения теории трещин характеристику прочности хрупких и квазихрупких kleевых соединений.

Авторы благодарны Г. И. Баренблатту за постоянное внимание к работе и дискуссии, значительно повлиявшие на ее содержание.

Институт механики МГУ

Поступила 28.VIII.1964

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дерягин Б. В., Кротова Н. А. Адгезия. Изд-во АН СССР, 1949.
2. Вуюцкий С. С. Аутогезия и адгезия высокополимеров. Гостехиздат, 1960.
3. Адгезия (клей, цементы, припои). Сб. перев. Изд. иностр. лит., 1954.
4. Эштейн Г. Склейивание металлов. Оборонгиз, 1956.
5. Клеи и технология склеивания. Сб. статей. Оборонгиз, 1960.
6. Перри Г. А. Склейивание армированных пластиков. Судпромгиз, 1962.
7. Черняк К. И. Эпоксидные компаунды и их применение. Судпромгиз, 1963.
8. Кардашов Д. А. Синтетические клеи. Изд. «Химия», 1964.
9. Айнбандер С. В., Клокова Э. Ф. Об определении величины сил адгезии между твердыми телами. Докл. АН СССР, 1962, т. 146, № 5.
10. Кротова Н. А., Морозова Л. П., Сокolina Г. А. Механические характеристики адгезии полимеров. Докл. АН СССР, 1959, т. 127, № 2.
11. Баренблatt Г. И. Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении. ПМТФ, 1961, № 4.
12. Баренблatt Г. И. О некоторых общих представлениях математической теории хрупкого разрушения. ПММ, 1964, т. 28, вып. 4.
13. Салганик Р. Л. О хрупком разрушении склеенных тел. ПММ, 1963, т. 27, вып. 3.
14. Черепанов Г. П. О напряженном состоянии в неоднородной пластинке с разрезами. Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение, 1962, № 1.
15. Обреимов I. V. The splitting strength of mica. Proc. Roy. Soc., 1930, A 127, p. 290—297.
16. Adhesion and Cohesion, Elsevier Publ. Co., Amsterdam, 1962.
17. Тимошенко С. П. и Войновский - Кригер С. Пластиинки и оболочки. Физматгиз, 1963.