

УДК 539.3

О ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ
МАТЕРИАЛОВ ПРИ УДАРНЫХ НАГРУЗКАХ

Хачикян А.С., Ширинян Р.А.

Ա.Ս. Խաչիկյան, Ռ.Ա. Շիրինյան

Տարասե նյութերից կազմված միացությունների ամրության մասին հարվածային բեռների դեպքում փորձարկված են հարվածային բեռների դեպքում տարասե նյութերից միացությունների ամրության հարցերը: Փորձերը կատարված են ճոճամակային ցցահարի (կոփեր) վրա, ըստ Շարպի փորձի մոդելներից նմանատիպ մոդելների վրա, որոնք պատրաստված են դյուրալյումինից և էպօքսիդային կոմպոզիտից մասերի ստանձնամ միջոցով: Փորձարկված են մոդելներ, որոնց մեջ լարումների ուժեղ խտացման (եզակիրթյան) կամ թերլարվածության գոտիները գտնվում են միացման մակերևույթի ինչպես ներքին անկյունային կետում, այնպես էլ արտաքին եզրերում: Արդյունքների անալիզը ցույց է տալիս ստատիկ փորձարկումների արդյունքների հետ որակական համաձայնեցվածությունը և քայքայման ձևի ու ցուցանիշների թավաթար կայունությունը: Միացման մակերևույթի եզրի շրջակայքում լարումների ուժեղ խտացումը լիովին փոխարինում է ըստ Շարպի փորձում նախատեսվող արհեստականորեն ստեղծվող լարումների կոնցենտրատորին:

A.S. Khachikian, R.A. Shirinian

On the Strength of Joint from Heterogeneous Materials under the Shock Loadings

Рассмотрены вопросы прочности соединений из разнородных материалов при ударных нагрузках. Эксперименты проведены на маятниковом копре на образцах, аналогичных образцам для испытаний по Шарпи, изготовленных склеиванием частей из эпоксидного компаунда и дюралюминия. Испытаны образцы с зонами сильной концентрации напряжений или малонапряженного состояния как на внешних краях, так и на внутренних ребрах поверхности соединений. Анализ результатов показывает качественное согласие с данными статических испытаний и удовлетворительная устойчивость характера разрушений и показателей прочности. Сильный концентратор в окрестности ребра или края поверхности соединения полностью заменяет искусственный концентратор, создаваемый в испытаниях по методу Шарпи.

Էքսպերիմենտալորեն քննարկվում է սինգուլյարն ու մալոնափրձայն դիստրիբուցիաների ճեղքումները, առաջանալիս միացման ճեղքի եզրերի և կրկնափայտի մակերևույթի վրա, որոնք պատրաստված են դյուրալյումինից և էպօքսիդային կոմպոզիտից մասերի ստանձնամ միջոցով: Փորձերը կատարված են ճոճամակային ցցահարի (կոփեր) վրա, ըստ Շարպի փորձի մոդելներից նմանատիպ մոդելների վրա, որոնք պատրաստված են դյուրալյումինից և էպօքսիդային կոմպոզիտից մասերի ստանձնամ միջոցով: Փորձարկված են մոդելներ, որոնց մեջ լարումների ուժեղ խտացման (եզակիրթյան) կամ թերլարվածության գոտիները գտնվում են միացման մակերևույթի ինչպես ներքին անկյունային կետում, այնպես էլ արտաքին եզրերում: Արդյունքների անալիզը ցույց է տալիս ստատիկ փորձարկումների արդյունքների հետ որակական համաձայնեցվածությունը և քայքայման ձևի ու ցուցանիշների թավաթար կայունությունը: Միացման մակերևույթի եզրի շրջակայքում լարումների ուժեղ խտացումը լիովին փոխարինում է ըստ Շարպի փորձում նախատեսվող արհեստականորեն ստեղծվող լարումների կոնցենտրատորին:

Клеевые соединения находят широкое применение в разных отраслях техники и многие вопросы их прочности достаточно хорошо исследованы [1,2]. В [3,4] обсуждены вопросы распределения напряжений и прочности в клеевых соединениях из разнородных материалов при статических и циклических нагрузках. В работах, включенных в справочник [5], рассматривается напряженное состояние неоднородных тел при наличии трещин, выходящих на поверхность соединения разнородных материалов, или находящихся на этой поверхности. Прочность клеевых соединений при ударных нагрузках сравнительно мало исследована [1].

1. Вопросы сопротивления материалов и конструкций ударным нагрузкам очень актуальны [6]. Проведены многочисленные исследования разрушений волнами напряжений и динамического распространения трещин [7-9]. В распространенном, особенно для металлов, методе определения ударной вязкости материалов по Шарпи на образце заранее делается искусственный концентратор-остроконечный надрез. Этот

концентратор, по идее, обеспечивает если не замену зарождающейся трещины, то одинаковые условия ее зарождения, определяемые остротой надреза, размеры которого стандартизируются [10]. Конструкции типа клеевого соединения из разнородных материалов имеют на ребрах и краях поверхности соединения сингулярность напряжений (КС) или малонапряженное состояние (МС) [11]. Степень особенности напряжений определяется по местным решениям задачи линейной теории упругости, а коэффициент при особенности можно оценить по фотоупругим картинам [11,12]. Влияние этих специфических распределений напряжений на прочность соединения при статических и циклических нагрузках рассмотрено в [13]. Эти исследования показали хорошее соответствие показателей прочности соединений характеру распределения напряжений, определенных теоретически и по фотоупругим картинам.

Исследования прочности соединений из разнородных материалов при импульсных нагрузках нам неизвестны.

Здесь приводятся результаты наших экспериментов по выявлению влияния специфического распределения напряжений в кусочно-однородном теле на характер разрушения клеевого соединения из эпоксидного компаунда и дюралюминия при импульсной нагрузке. Испытывались образцы, аналогичные Шарпи без искусственных концентраторов. Роль концентраторов напряжений выполняют особенности напряжений на ребрах поверхности соединения. Испытаны образцы с концентрационными и малонапряженными зонами распределения напряжений как на внешней поверхности образцов, так и на внутренних ребрах поверхности соединений разнородных частей образцов.

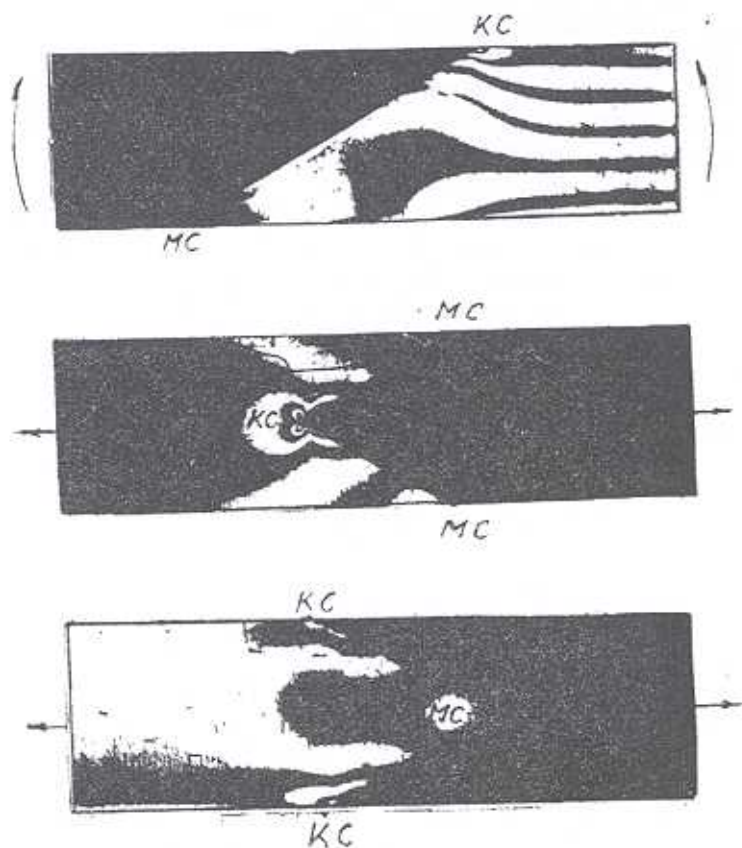
Скорость приложения нагрузки и температура образцов при испытаниях не менялись. Не менялись также углы отделки склеиваемых частей соединений, что равносильно постоянству параметров поведения напряжений в угловых точках – коэффициента при особенности и степеней особенности или стремления к нулю.

2. Были испытаны четыре типа образцов, изготовленных из эпоксидного компаунда (ЭД6-МТГФА) и дюралюминия (Д16-АТ). Склеивание проводилось эпоксидным клеем. Технология изготовления и склеивания образцов описана в [14]. В [15-17] приведены также результаты статических и циклических испытаний этих же образцов, а также фотоупругие картины напряжений при изгибе и растяжении, некоторые из которых приведены здесь (фиг. 1). Конструкция образцов с размерами $0.6 \times 1.3 \times 6.0$ см и схемы нагружения показаны на фиг. 2.

Испытания проводились на маятниковом копре МК-0.5-1. Предварительными испытаниями нескольких образцов был определен диапазон энергии разрушения для образцов разных типов и выбрана скорость начала удара 2.5 м/с.

С целью исключения влияний возможных случайных факторов изготовлены и испытаны две группы образцов. Для каждого типа были испытаны пять образцов в первой группе и по три образца типа А, Б, Г – во второй. Были также испытаны две группы по три и пять однородных образца (фиг. 3) по методу Шарпи с разной остротой искусственного концентратора для определения когезионной прочности эпоксидного компаунда. Результаты испытаний приведены в табл. 1-4.

В табл. 1 и 2 приведены экспериментальные значения работ разрушений первой и второй групп образцов соответственно, а также величины площадей поверхностей, образованных разрушением когезионно по эпоксидному компаунду и адгезионно по плоскости склеивания. В табл. 3 приведены значения работ разрушения однородных образцов из эпоксидного компаунда при двух разных значениях остроты надреза концентратора. В табл. 4 приведены средние (по двум группам образцов) и удельные значения энергии образования поверхностей адгезионным разрушением, рассчитанных согласно значениям удельных расходов энергий на когезионное разрушение для двух разных концентраторов-надрезов.

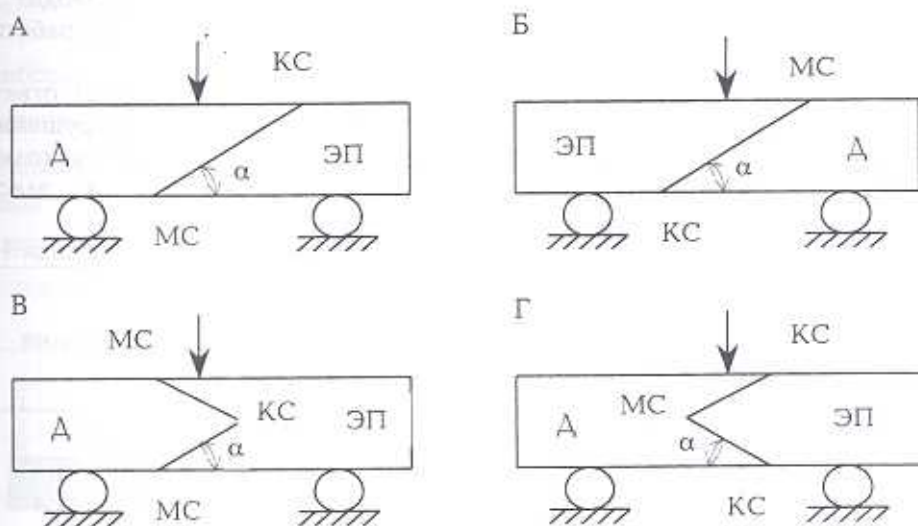


Фиг. 1. Фотоупругие картины напряжений при статическом нагружении. КС — концентрационное состояние, МС — малонапряженное состояние

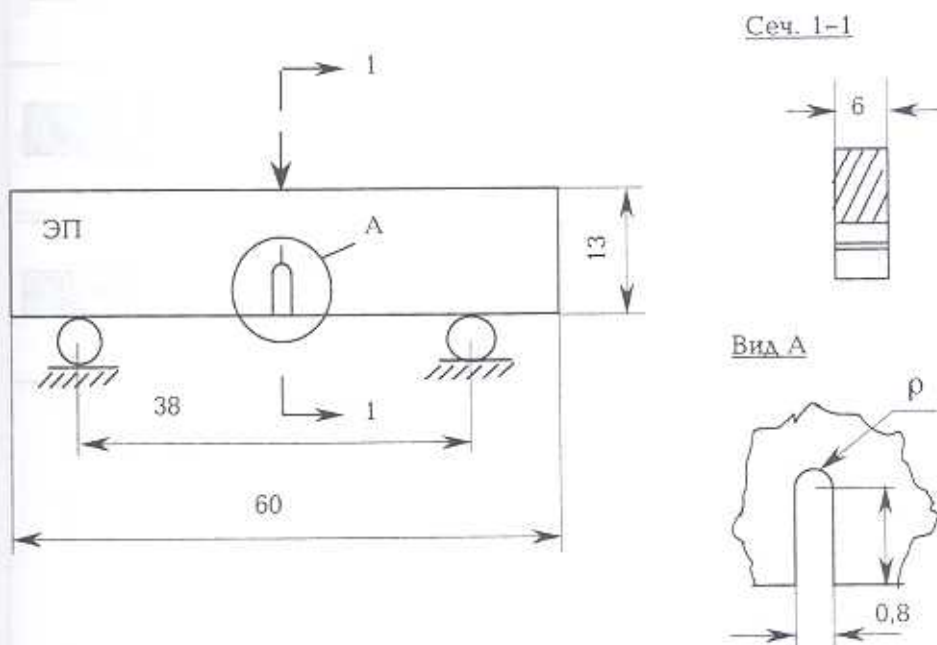
3. Рассматривая результаты испытаний, прежде всего следует отметить достаточно хорошую, для таких экспериментов, устойчивость значений энергии, затрачиваемой на разрушение образцов каждого типа. Можно отметить также устойчивость характера разрушения и отношения величин площадей вновь образованных поверхностей, разрушенных адгезионным и когезионным образом. Из 37 образцов забракованы результаты испытаний 6 образцов. Еще только 5 образцов дали значительно отличающиеся от средних значений результаты. Остальные

26 образцов дали стабильные в своей группе результаты.

Во-вторых, можно отметить согласованность с результатами статических испытаний и с фотоупругими картинками напряжений этих же образцов [13]. Образцы типа А (с концентратором на сжатой зоне изгибаемой полосы) прочнее образцов типа В (с концентратором на растянутой зоне), образцы типа Г (с КС на границах полосы) слабее образцов типа В (с КС на нейтральной линии). Отметим еще, что



Фиг. 2. Тип образцов и схемы нагружения. Д - дюралюминий, ЭП - эпоксидный компаунд, $\alpha = 30^\circ$.



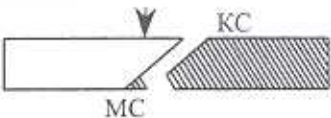
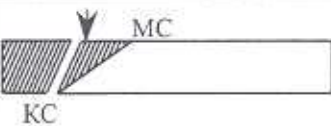
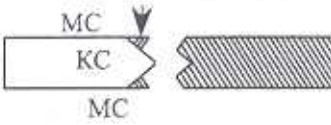
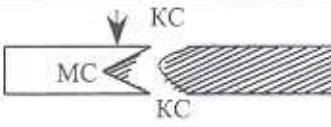
Фиг. 3. Образцы для испытаний на вязкость разрушения с переменной остротой концентратора. ρ - радиус закругления на кончике концентратора.

исключительно во всех образцах в окрестности МС поверхность соединения не раскрылась (нет адгезионного и вообще никакого разрушения), а в окрестности КС поверхность соединения раскрылась (имеет место адгезионное разрушение).

Важно еще отметить большую разницу удельной когезионной работы на разрушение однородных образцов по Шарпи из эпоксидного компаунда с различной остротой надреза (табл. 4). Менее острый надрез дает слишком завышенные значения удельной работы, что приводит к противоречию (табл. 4, отрицательные значения адгезионной работы разрушения).

4. Один из интересующих нас вопросов имеет однозначный ответ: при импульсных нагрузках (как и при статических нагрузках) разрушение никогда не начинается в зоне МС и поверхность разрушения не проходит через зоны МС. Это предсказано теоретически [11] и здесь подтверждается экспериментально.

Таблица 1

| Тип образца | № образца | Q | $S_{\text{ког}}$ | $S_{\text{адг}}$ | q | $q_{\text{ср}}$ | Характер разрушения |
|-------------|-----------|------|------------------|------------------|------|-----------------|--|
| А | 1 | 0.81 | 0.3 | 1.14 | 0.56 | 0.58 |  |
| | 2 | 0.75 | 0.42 | 0.84 | 0.60 | | |
| | 3 | 1.09 | 0.24 | 1.14 | 0.72 | | |
| | 4 | 0.60 | 0.36 | 1.0 | 0.45 | | |
| | 5 | 0.60 | 0.72 | 0.27 | 0.60 | | |
| Б | 1 | 0.24 | 0.93 | 0.06 | 0.24 | 0.15 |  |
| | 2 | 0.24 | 0.36 | 0.82 | 0.20 | | |
| | 3 | 0 | 1.11 | 0.06 | - | | |
| | 4 | 0.04 | 0.93 | 0.06 | 0.04 | | |
| | 5 | 0.10 | 1.02 | 0 | 0.10 | | |
| В | 1 | 0.20 | 0.42 | 0.90 | 0.15 | 0.17 |  |
| | 2 | 0.05 | 0.54 | 0.42 | - | | |
| | 3 | 0.19 | 0.60 | 0.66 | 0.15 | | |
| | 4 | 0.30 | 0.42 | 0.72 | 0.17 | | |
| | 5 | 0.25 | 0.48 | 0.72 | 0.20 | | |
| Г | 1 | 0 | 0.66 | 0.12 | - | 0.08 |  |
| | 2 | 0.04 | 0.66 | 0.24 | 0.04 | | |
| | 3 | 0.05 | 0.72 | 0.18 | 0.06 | | |
| | 4 | 0.16 | 0.66 | 0.18 | 0.19 | | |
| | 5 | 0.04 | 0.66 | 0.15 | 0.05 | | |

Q – энергия разрушения в Дж
 $S_{\text{ког}}$ – площадь поверхности когезионного разрушения в см²
 $S_{\text{адг}}$ – площадь поверхности адгезионного разрушения в см²
 $q = \frac{Q}{S_{\text{ког}} + S_{\text{адг}}}$ – удельная работа разрушения в Дж/см²
 $q_{\text{ср}}$ – средняя удельная работа разрушения в Дж/см²

В противоположность этому разрушение начинается в зоне КС и проходит по поверхности соединения (адгезионно), по крайней мере, в

малой окрестности сингулярной точки КС во всех испытанных образцах.

Противоречие, полученное при расчете адгезионной части энергии разрушения (табл. 4), показывает, что работа, затрачиваемая на зарождение трещины, составляет значительную часть баланса энергии в этих экспериментах. Представим баланс энергии на разрушение образца в следующем виде:

$$Q = Q_3 + Q_k + Q_a + Q_y$$

Здесь Q – суммарная работа разрушения образца по показаниям прибора, Q_3 – работа, расходуемая на динамическое зарождение трещины, Q_k – работа, расходуемая на образование новой поверхности когезионным разрушением, Q_a – работа расходуемая на образование новой поверхности адгезионным (по поверхности склеивания) разрушением, Q_y – другие слагаемые расходуемой энергии, включая расход энергии на местные и упругие деформации в образце и ударнике.

Таблица 2

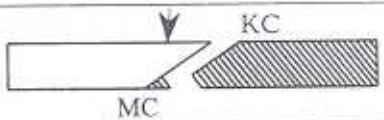
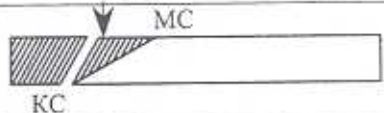
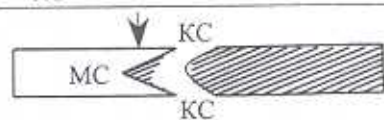
| Тип образца | № образца | Q | $S_{\text{ког}}$ | $S_{\text{адг}}$ | q | $q_{\text{ср}}$ | Характер разрушения |
|-------------|-----------|------|------------------|------------------|------|-----------------|---|
| А | 1 | 0.32 | 0.21 | 1.02 | 0.26 | 0.23 |  |
| | 2 | 0.24 | 0.24 | 0.96 | 0.20 | | |
| | 3 | 0 | 0.18 | 1.14 | – | | |
| Б | 1 | 0.06 | 0.60 | 0.36 | 0.06 | 0.08 |  |
| | 2 | 0.08 | 0.90 | 0.06 | 0.08 | | |
| | 3 | 0.10 | 0.96 | 0 | 0.10 | | |
| Г | 1 | 0.10 | 0.72 | 0.06 | 0.13 | 0.12 |  |
| | 2 | – | 0.60 | 0.18 | – | | |
| | 3 | 0.10 | 0.66 | 0.24 | 0.11 | | |

Таблица 3

| Радиус концентратора мм | № образца | Q | S | $q_{\text{эл}}$ | $q_{\text{ср}}$ |
|-------------------------|-----------|------|------|-----------------|-----------------|
| $\rho = 0,4$ | 1 | 0.24 | 0.72 | 0.33 | 0.30 |
| | 2 | 0.03 | 0.60 | – | |
| | 3 | 0.25 | 0.72 | 0.35 | |
| | 4 | 0.24 | 0.71 | 0.34 | |
| | 5 | 0.12 | 0.68 | 0.18 | |
| $\rho = 0,05$ | 1 | 0.04 | 0.60 | 0.07 | 0.09 |
| | 2 | 0.06 | 0.60 | 0.10 | |
| | 3 | 0.08 | 0.66 | 0.11 | |

$q_{\text{эл}}$ – удельная работа разрушения эпоксидного компаунда

На основании отсутствия заметных местных деформаций в окрестности точки удара и некоторых других соображений мы полагаем,

что Q_y составляет малую долю в балансе энергии и в первом приближении можно ее не учитывать. Тогда, пользуясь данными испытаний однородных образцов (табл. 3), можно вычислить значения части энергии, расходуемой на когезионное образование новой поверхности при разрушении и, вычитая из суммарного расхода энергии эту слагаемую, определить значение суммы энергии, расходуемой на динамическое зарождение трещины и на адгезионное разрушение (табл. 4). Для краткости эту величину мы называем адгезионной частью расхода энергии на разрушение образца.

Таблица 4

| Тип образца | $Q_{\text{ср}}$ | $S_{\text{ког ср}}$ | $S_{\text{адг ср}}$ | $q_{\text{эл}} = 0.30$ | | $q_{\text{эл}} = 0.09$ | | $q_{\text{адг}}$ |
|-------------|-----------------|---------------------|---------------------|------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|------------------|
| | | | | $Q_{\text{ког ср}}$ | $Q_{\text{адг ср}}$ | $Q_{\text{ког ср}}$ | $Q_{\text{адг ср}}$ | |
| А | 0.52 | 0.28 | 1.10 | 0.08 | 0.44 | 0.03 | 0.49 | 0.44 |
| Б | 0.12 | 0.96 | 0.06 | 0.30 | -0.18 | 0.08 | 0.04 | 0.67 |
| В | 0.20 | 0.50 | 0.75 | 0.15 | 0.05 | 0.06 | 0.14 | 0.19 |
| Г | 0.09 | 0.66 | 0.15 | 0.20 | -0.11 | 0.06 | 0.03 | 0.20 |

$Q_{\text{ср}}$ — средняя работа разрушения, $Q_{\text{ког ср}} = q_{\text{эл}} S_{\text{ког ср}}$ — средняя работа на когезионное разрушение, $Q_{\text{адг ср}} = Q_{\text{ср}} - Q_{\text{ког ср}}$ — средняя работа на адгезионное разрушение, $q_{\text{адг}} = \frac{Q_{\text{адг ср}}}{S_{\text{адг ср}}}$ — средняя удельная работа адгезионного разрушения

Отрицательные значения адгезионной части энергии разрушения, полученные при использовании удельной когезионной энергии разрушения при менее остром концентраторе, показывает, что в этом случае значение удельной когезионной энергии образования новой поверхности сильно завышено. Мы полагаем, что это происходит вследствие значимости части энергии, расходуемой на динамическое образование трещины при менее остром концентраторе. Это подтверждает также чувствительность испытаний по Шарпи к остроте концентратора-надреза.

Аналогичные расчеты удельного адгезионного расхода энергии, основанные на значениях когезионного расхода энергии при более остром концентраторе-надрезах, дают в целом непротиворечивый, приемлемый результат. В результате можно утверждать, что энергия, необходимая для динамического образования трещины в концентрационной зоне на ребре или крае поверхности склеивания образца из разнородных материалов, сравнима с энергией образования трещины в однородном образце с остроконечным надрезом.

5. Суммируя сказанное, можно утверждать, что:

- зоны малонапряженного состояния в разрушении клеевого соединения не участвуют;
- образование новой поверхности при разрушении клеевого соединения не проникает в зону малонапряженного состояния;
- характер разрушения и относительная прочность образцов при динамическом нагружении находятся в согласии с результатами статических испытаний этих же образцов;
- количество расхода энергии на образование трещины в зоне

концентрационного состояния на ребре или крае поверхности склеивания в клеевом соединении разнородных материалов сравнимо с расходом энергии на образование трещины в однородном образце в зоне остроконечного надреза-концентратора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кинлок Э. Адгезия и адгезивы. М.: Мир, 1991. 484 с.
2. Майлонас К. и Дебройн Н. Статические проблемы склеивания. /В кн. Адгезия, клеи, цементы, припои. Под редакцией Н. Дебройна и Р. Гувинка. М.: ИЛ, 1954. С. 108-174.
3. Давидян Д.Б., Домбаева И.А., Хачикян А.С., Ширинян Р.А. О влиянии напряженного состояния краев поверхности стыка на сопротивление усталости соединений из разнородных материалов. //Изв. АН Арм. ССР. Сер. техн. наук. 1989. Т. XLII. №4. С. 195-198.
4. Давидян Д.Б., Ширинян Р.А. Прочность клеевых нахлесточных соединений и явление малонапряженности. // Изв. АН Армении. Механика. 1992. Т.45. №1-2. С. 69-73.
5. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений в двух томах. Под ред. Ю. Мураками. Пер. с англ. Т.1. М.: Мир. 1990. С. 1-448. Т.2. С. 449-1016.
6. Динамика удара. М.: Мир. 1985. 296 с.
7. Крысин В.Н. Слоистые клеевые конструкции в самолетостроении. М.: Машиностроение. 1980. 231 с.
8. Кольский Г., Рейдер Д. Волны напряжений и разрушение. /В кн. Разрушение. Том 1. С. 570 - 608.
9. Разрушение. Под ред. Г. Либовица. Т. 4. М.: Машиностроение. 1977. 400 с.
10. Испытание материалов. Справочник. Под ред. Х. Блюменауера. М.: Металлургия. 1979. 448 с.
11. Чобанян К.С. Напряжения в составных упругих телах. Ереван: Изд. АН АрмССР. 1987. 338 с.
12. Theocaris P.S. The mesophase concept in composites. Springer Verlag. 1987. 292.
13. Ширинян Р.А. Исследование полей напряжений в составных упругих телах методом фотоупругости. Автореферат. Диссер. на соискание степени к.т.н. по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела. Ереван. 2001. 22 с.
14. Кардашов Д.А. Синтетические клеи. М.: Химия. 1976. 504с.
15. Ширинян Р.А. Поле напряжений в окрестности внутренней угловой точки поверхности соединения растянутой составной полосы. //Изв. НАН Армении. Механика. 1999. Т.52. №4. С. 84-88.
16. Чобанян К.С., Ширинян Р.А. Исследование явления малонапряженности края стыка соединения из разнородных материалов. /В сб.: Материалы VIII Всесоюзной конф. по методу фотоупругости. Т. III. Таллин. 1979. С. 291-296.
17. Давидян Д.Б., Домбаева И.А. Исследование явления малонапряженности в стыковых соединениях металлов с эпоксидным компаундом. //Изв АН Арм ССР. Сер. ТН. 1981. №2. С. 8-14.