

Д. Б. ДАВИДЯН, И. А. ДОМБЛЕВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ МАЛОНАПРЯЖЕННОСТИ
 В СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ МЕТАЛЛОВ
 С ЭПОКСИДНЫМ КОМПАУНДОМ

Известно, что при изменении формы соединения двух разнородных материалов изменяется вид напряженного состояния (малонапряженность или концентрация напряжений) в окрестности края поверхности соединения при произвольном нагружении или же при изменении температуры [1]. Оптимальная геометрическая форма края соединения повышает механическую выносливость и коррозионную стойкость стыка разнородных материалов.

В работе приводятся результаты экспериментальных исследований влияния вида напряженного состояния в стыковом цилиндрическом соединении металлов с эпоксидным компаундом на прочность и характер разрушения при равномерном отрыве. Полученные данные сопоставляются с результатами расчетов вида напряженного состояния на крае соединения для случая плоского напряженного состояния.

В окрестности края поверхности контакта все компоненты напряжения имеют вид

$$\sigma = r^{\lambda-1} \Psi(r, \varphi),$$

где $\Psi(r, \varphi)$ — ограниченная и вообще не стремящаяся к нулю при $r \rightarrow 0$ функция; r, φ — полярные координаты края поверхности контакта; λ — действительная часть корня λ трансцендентного уравнения

Вид напряженного состояния около края поверхности контакта определяется величиной наименьшей действительной части корня λ трансцендентного уравнения

$$\begin{aligned} f^*(\lambda) = & (\mu - 1)^2 (\sin^2 \alpha - \lambda^2 \sin^2 \alpha) (\sin^2 \beta - \lambda^2 \sin^2 \beta) + \\ & + 4\mu m_1 m_2 |\sin^2(\alpha + \beta) \lambda - \lambda^2 \sin^2(\alpha + \beta)| - \\ & - 4(\mu - 1) \{ \mu m_2 (\sin^2 \alpha - \lambda^2 \sin^2 \alpha) \sin^2 \beta - m_1 (\sin^2 \beta - \lambda^2 \sin^2 \beta) \sin^2 \alpha \} - \\ & + 4(\mu m_2 - m_1) \{ \mu m_2 (\sin^2 \alpha - \lambda^2 \sin^2 \alpha) - m_1 (\sin^2 \beta - \lambda^2 \sin^2 \beta) \} = 0, \end{aligned}$$

где $\mu = \frac{G_1}{G_2}$; G_1 и G_2 — модули сдвига; $m_1 = \frac{1}{1 + \nu_1}$; $m_2 = \frac{1}{1 - \nu_2}$

ν_1 и ν_2 — коэффициенты Пуассона. Индекс „1“ относится к более деформативному материалу и к нему же относится угол α .

Если $\xi > 1$, в малой окрестности краевой точки поверхности контакта будет нулевое напряженное состояние. При $\xi < \text{около края}$ имеет место сильная концентрация напряжений, а при $\xi = 1$ напряжения будут конечными и отличными от нуля.

Расчеты проводились на ЭВМ „Раздан-3“ для случая $\alpha + \beta = \pi$ для следующих компоновок материалов: Д1 ($E = 77$ ГПа, $\nu = 0,28$) — Эг (смола эпоксидная ЭД-5—100 масс.ч, ДБФ—10 масс.ч, ПЭПА—10 масс.ч, полимеризация при 75°C в течение 8 час, $E = 4,2$ ГПа, $\nu = 0,4$, $[\sigma] = 50$ МПа); Ст3—Э (смола эпоксидная ЭД-5—100 масс.ч, ДБФ—10 масс.ч, ПЭПА—10 масс.ч, полимеризация при комнатной температуре, $E = 2,7$ ГПа, $\nu = 0,416$, $[\sigma] = 32,4$ МПа); Э—Эг. Результаты расчетов λ представлены в виде графиков на рис. 1 и 2.

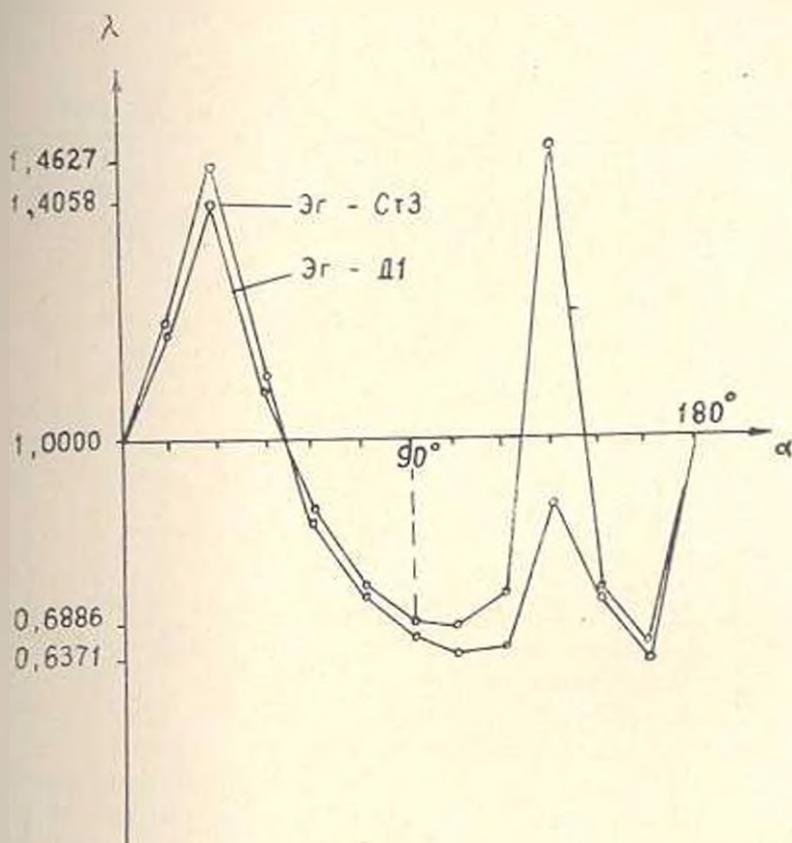


Рис. 1.

Переход из малонапряженного в концентрационное напряженное состояние происходит для исследованных соединений при близких значениях предельного угла, равного $\alpha \approx 52^\circ$. Этот угол определяется значением коэффициента поперечной деформации слабого компонента при

большой разнице в модулях упругости. Угол перехода для исследованных соединений всегда меньше $\frac{\pi}{2}$ поэтому в прямом соединении исследованные композиции имеют сильную концентрацию напряжений на крае соединения.

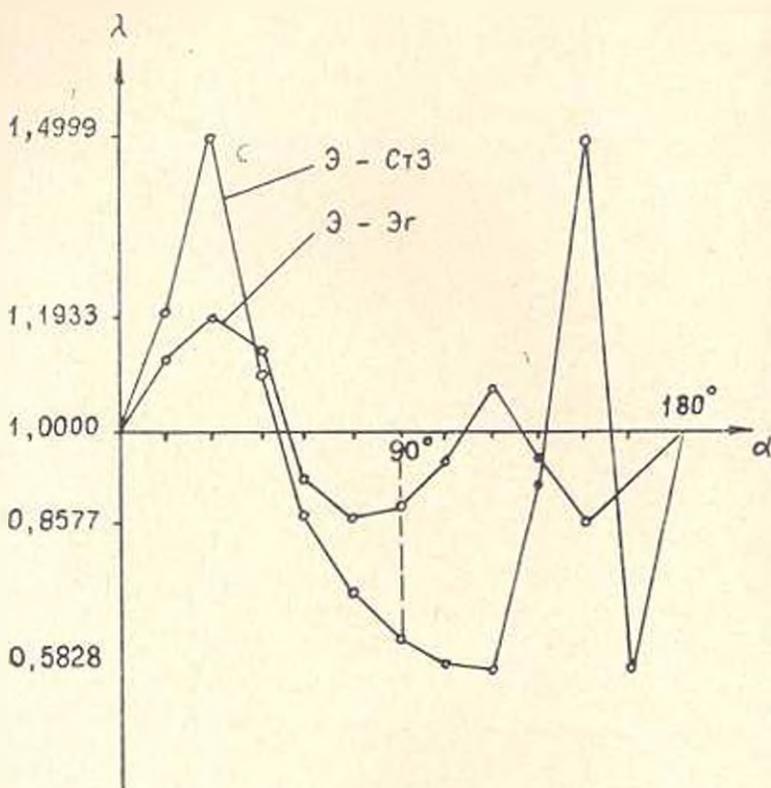


Рис. 2.

Результаты экспериментальной проверки для соединения СтЗ—Э приводятся в табл. 1. Эксперименты проводились по методике [2].

В соединении с малонапряженным краем ($\alpha = 37^\circ 30'$) прочность значительно увеличилась по сравнению с прочностью соединений с концентратором напряжений на крае ($\alpha = 90^\circ$, $\alpha = 142^\circ 30'$), что подтверждает предположения о существенном влиянии на адгезионную прочность вида напряженного состояния на крае соединения [3] и характера его разрушения. Для малонапряженного соединения характер разрушения был когезионным, с частичным выходом в адгезионный в центре соединения. При этом наблюдалось значительное последствие ударной волны: оно выражалось в отслоении кольцеобразного участка компаунда. Подобное расслоение не наблюдалось для образцов с минимальной прочностью. Для соединения типа II характер разрушения был смешанным: частично адгезионным и частично когезионным по адгезиву.

Для соединения типа III характер разрушения был вначале адгезионным, а затем когезионным.

Таблица 1

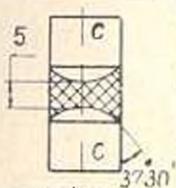
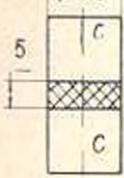
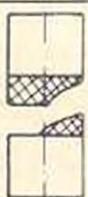
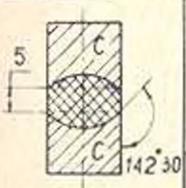
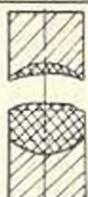
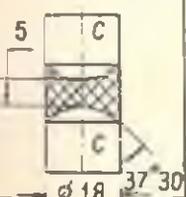
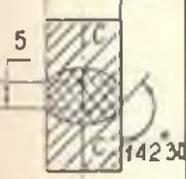
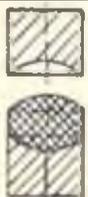
№	Тип соединения	σ МПа	$\frac{\sigma}{\sigma_2}$ 100%	Характер разрушения
1		15,1	176	
2		8,6	100	
3		5,6	65	

Таблица 2

№	Тип соединения	σ МПа	$\frac{\sigma}{\sigma_2}$ 100%	Характер разрушения
1		27,1	560	Тип I Тип II Тип III
2		4,8	100	

В табл. 2 приведены результаты экспериментов с соединениями Ст3—Эг. Для малонапряженного состояния получено значительное уве-

личение прочности при когезионном характере разрушения трех типов (рис. 3). Тип I — наиболее прочен, поверхность разрушения шероховатая; тип II — подобен типу I, но менее прочен и поверхность разрушения гладкая; тип III — получен в результате растяжения с изгибом. Соединения с концентрационным напряженным состоянием характеризуются чистым адгезионным расслоением.

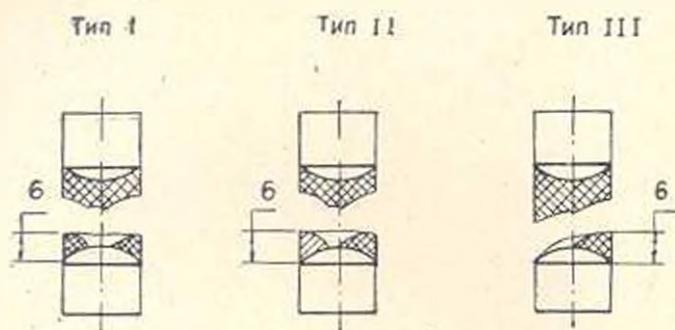


Рис. 3.

В следующем эксперименте выявлялось влияние формы кромок на прочность и характер разрушения в цилиндрических соединениях Д1—Эг в диапазоне углов от $\alpha = 20^\circ$ до $\alpha = 150^\circ$. Для снижения влияния концентратора напряжений во внутренней области пересечения поверхностей последняя скруглялась с радиусом $R = 1$ мм. Для каждого угла испытывалось по 6 образцов. Для сравнения были склеены образцы с тонкой клеевой прослойкой в 0,2 мм без разделки кромок, со скруглением и образцы с канавками для получения малонагруженного с края соединения.

Эксперимент проводился одновременно для всех углов и сравниваемых соединений на одном и том же компаунде. Результаты представлены на рис. 4. Для выбранной формы кромки прочность и характер разрушения соответствуют результатам экспериментов, представленным в табл. 1 и 2.

Выявилось смещение предельного угла в сторону малонапряженной области приблизительно на 10° по сравнению с рассчитанным, из условия идеальности геометрических форм, однородности, изотропности и упругости материалов. Это смещение связано еще и с тем, что в формуле учитываются не все факторы, влияющие на предельный угол. Одним из таких факторов могут быть остаточные напряжения, возникающие после горячей полимеризации компаунда. Вероятно, по этой же причине не выявлена в эксперименте вторая узкая область малонапряженности между углами 90° и 180° .

Прочность малонапряженного соединения с толстой клеевой прослойкой оказалась близкой к прочности прямого соединения с тонкой клеевой прослойкой без разделки кромок. Для прямого соединения ($\alpha = 90^\circ$) с толстой клеевой прослойкой прочность снижена: для же-

стких клеев это снижение значительнее, чем для клеев с большей долей высокоэластических деформаций. Влияние толщины клеевой прослойки на прочность зависит от вида напряженного состояния на крае соединения. Эта зависимость, обнаруженная при сдвиге [4], распространяется и на случай малонапряженности на крае соединения при испытаниях на равномерный отрыв.

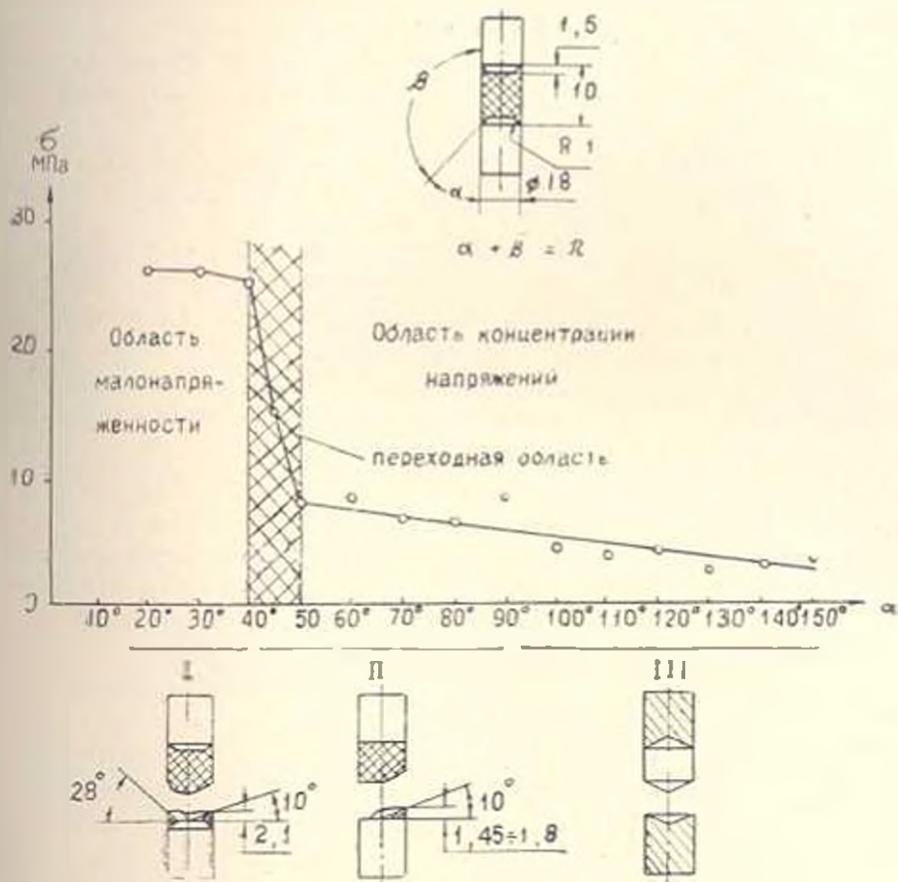


Рис. 4.

Таким образом, при равенстве или небольшой разности адгезионной и когезионной прочности адгезивов в толстых слоях малонапряженному состоянию на крае соединения соответствует высокая прочность и когезионное разрушение, а концентрационному напряженному состоянию — малая прочность и адгезионный характер разрушения.

«ՄԵՏԱՂ-ԷՊՈՔՍԻԳԱՅԻՆ, ԿՈՐՊՈԱՌԻՆԳ» ԵԱՅՐԱԿՅՎԱՆ ՄԻԱՑՄԱՆ ՄԵՉ
ԹԵՐԱՐՎԱՌՈՒԹՅԱՆ ԵՐԵՎՈՒՅԹԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Ա մ փ ո փ ու ռ

Գիտարկվում է մետաղ-էպօքսիդային միացման հաժախարաչափ պոկման փորձի ղեկավարում նրա մակերևույթի եզրի յարվածային վիճակի (Յերյարվածային կամ կոնցենտրացված) սղղեցությունը միացման ամրության և քայքայման բնույթի վրա:

Յերյարվածային վիճակին համապատասխանում է բարձր ամրություն և կոդեզային, իսկ կոնցենտրացված վիճակին՝ ցածր ամրություն և աղղեզային բնույթի քայքայում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Чобакян К. С. Явление малонапряженности края поверхности контакта нагруженного тела. Открытие № 102 «Открытия. Изобр. Пром. образцы. Товарн. знаки», 1971, № 36.
2. Патурова В. В. Испытания синтетических клеев. М., «Лесная промышленность», 1969.
3. Бикерман Я. О. «Успехи химии», Т. 42, № 1431, 1972.
4. Фрейдун А. С., Малицкий Ю. М., Ву Би Кием. О факторах, влияющих на масштабный эффект в клеевых соединениях ВНИИТII, № 1241—69. Дел.