

М. М. МАРТИРОСЯН, А. Н. КАГРАМАНЯН

О ВЛИЯНИИ КОНЦЕНТРАТОРА НА ПРОЧНОСТЬ СТЕКЛОПЛАСТИКА

Использование высокопрочных стеклопластиков во многих отраслях промышленности связано с определенными затруднениями, вытекающими из способа крепления отдельных элементов конструкции.

Как известно, в отличие от термопластичных пластмасс, композиты на основе термореактивных смол и, в частности, слоистые стеклопластики не поддаются соединению сваркой. Поэтому создание сборных конструкций из стеклопластиков может быть осуществлено клеевыми или болтовыми и заклепчными соединениями.

Клеевые соединения находят широкое применение, однако, как справедливо отмечают [1], немаловажное значение имеют также болтовые и заклепчные соединения. В этом случае, как известно, в теле соединяемых материалов просверливается отверстие для заклепки или болта, которое, являясь концентратором напряжений, может влиять на прочность конструкции. В этом аспекте исследование прочности стеклопластиков при наличии концентратора напряжений представляет определенный интерес [2].

В настоящей статье приведены результаты экспериментального исследования влияния концентратора напряжений на кратковременную прочность двух типов стеклопластиков, имеющих различное структурное строение: стеклотекстолит СТЭФ и нетканый стеклопластик СВМ 2:1.

Исследования проводились на образцах, имеющих форму двухсторонней лопатки и прямоугольной полоски, вырезанных из листового материала толщиной 5 мм. Для учета влияния ориентации волокон образцы из стеклопластиков в плоскости листа вырезались в 3-х направлениях $\varphi \approx 0, 45$ и 90° . Концентратором напряжений явилось круглое отверстие в середине ширины и длины рабочей зоны образца.

Методика исследования заключалась в следующем. Общее количество образцов разбивалось на две группы — контрольную и рабочую. В контрольную группу включались образцы без концентратора. В рабочую — образцы с концентратором. Влияние концентратора исследовалось как при различных диаметрах отверстий, так и для образцов с различной шириной рабочей зоны. В обоих случаях отношение d/b выдерживалось одинаковым, при этом одинаковые значения d/b в одном случае получались из условия $d = \text{const}$, а в другом — $b = \text{const}$.

Перед тем, как определить влияние концентратора на прочность стеклотекстолита, были проведены исследования по определению кратковремен-

ной прочисти материала при растяжении в зависимости от ширины рабочей зоны и ориентации образца.

Исследованиями была выявлена довольно интересная картина влияния ширины образца на кратковременную прочность стеклопластика. В табл. 1 приведены результаты этих исследований со статистической обработкой данных. Эксперименты показали, что для образцов с $\varphi = 0$ и 90° (основа и уток) с увеличением ширины образца прочность, как правило, падает. Изменение прочности в результате увеличения ширины рабочей зоны образца по двум главным направлениям происходит примерно одинаково. С увеличением ширины в 2 раза (в наших исследованиях исходным значением ширины принято $b = 15$ мм), прочность падает примерно на 10%. Еще чувствительнее снижает прочность при ширине $b = 60$ мм. Здесь падение прочности составляет более, чем 30%. У образцов шириной рабочей зоны 10 мм наблюдается некоторое повышение прочности (примерно 5% при $\varphi = 90^\circ$), однако статистическая обработка экспериментальных данных показывает, что уменьшение ширины образца в общем не повлияло на его прочность, и в интервале от 10 до 15 мм прочность материала имеет максимальное значение.

Таблица 1
Зависимость кратковременной прочности стеклотекстолита от ширины образца

Ориентация образца φ°	Ширина образца мм	Среднее значение $\kappa/\text{мм}^2$	Коэффициент масштаба M	Количество образцов шт.	Коэффициент вариации $v, \%$	Показатель точности $P, \%$
0	10	44.6	1.00	6	2.33	0.55
	15	44.8	1.00	12	3.13	0.90
	30	39.4	0.88	6	1.69	0.69
	60	31.1	0.69	5	12.15	5.47
45	10	23.2	1.04	5	3.37	1.51
	15	22.3	1.00	5	1.57	0.70
	30	22.9	1.03	5	3.62	1.61
	60	22.7	1.02	5	4.31	1.93
90	10	38.8	1.05	5	1.78	0.79
	15	36.8	1.00	5	2.30	1.03
	30	33.7	0.92	5	3.96	1.78
	60	25.7	0.70	5	5.69	2.54

Интересными оказались результаты исследования образцов, вырезанных в промежуточном направлении ($\varphi = 45^\circ$). Оказалось, что увеличение ширины образца в 6 раз совершенно не повлияло на изменение прочности. И хотя при ширине образца $b = 10$ мм прочность примерно на 4% выше, чем при ширине 15 мм, однако, в целом, можно утверждать, что для образцов, вырезанных в промежуточном направлении, изменение ширины образца не влияет на изменение прочности (табл. 1).

Приведенные нами результаты, в целом, соответствуют заключениям, сделанным в [3]. Однако, как показывают наши исследования, увеличение ширины образца свыше 30 мм, в данном случае вновь привело к чувствительному снижению прочности.

Теперь посмотрим, как влияет концентратор напряжений в виде круглого отверстия на прочность стеклотекстолита. Изменение прочности, а точнее, влияние концентратора будем выражать коэффициентом $K_p = \sigma_n / \sigma_k$, где σ_n — предел кратковременной прочности материала без концентратора, σ_k — условный предел прочности образца при наличии концентратора. Коэффициент K_p принято называть эффективным коэффициентом концентрации [4, 5].

Рассмотрим случай, когда отношение $\lambda = d/b$ (фиг. 1) принимает различные значения в результате изменения диаметра отверстия при постоянном значении ширины образца $b = 15$ мм. Значение коэффициента K_p в зависимости от λ и φ приведено в табл. 2.

Таблица 2
Зависимость эффективного коэффициента концентрации от отношения d/b и φ для стеклотекстолита

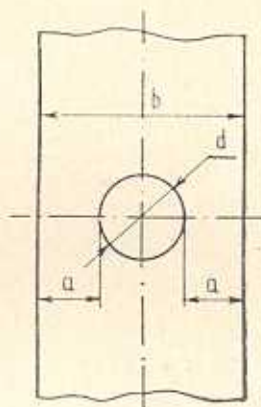
φ°		$\lambda = d/b$ ($l-b = \text{const} = 15$ мм; $l-d = \text{const} = 4$ мм)					
		0.067	0.133	0.267	0.333	0.400	—
0	I	1.31	1.49	1.53	1.57	1.54	—
	II	1.23	1.46	1.52	1.45	1.32	—
45	I	1.08	1.36	1.35	1.38	1.37	—
	II	1.10	1.32	1.35	1.36	1.37	—
90	I	1.31	1.48	1.53	1.53	1.54	—
	II	1.25	1.52	1.53	1.50	1.48	—
		$\lambda = d/b$, $2a = \text{const} = 11$ мм, $d = 1; 2; 4; 5; 6; 8$ мм					
		0.083	0.154	0.267	0.313	0.353	0.421
0	III	1.34	1.46	1.52	1.57	1.53	1.63
45		1.09	1.37	1.37	1.37	1.38	1.37
90		1.30	1.45	1.52	1.59	1.55	1.67

Анализ данных показывает, что центральное круглое отверстие, независимо от диаметра, является концентратором напряжений, ослабляющим тело образца. Об этом свидетельствует тот факт, что коэффициент K_p всегда принимает значение больше единицы. В количественном отношении влияние отверстия тесно связано с ориентацией образца, при этом оно больше в направлении армирования и меньше в промежуточном направлении ($\varphi = 45^\circ$). Говоря о коэффициенте концентрации, очевидно, следует подчеркнуть, что он для реальных материалов вряд ли может принимать значения меньше единицы, так как отверстие в таких ситуациях не может привести к упрочнению материала. Между тем, как это видно из табл. 3, в некоторых случаях для СВМ 2:1 коэффициент концентрации принимает значение меньше единицы. Такое, в частности, наблюдается у образцов с ориентацией $\varphi = 0$ и 45° . Получение таких противоположных результатов, по-видимому, всецело связано с конструктивными особенностями материала. Действительно, пластина СВМ 2:1 в направлении большого числа волокон в поперечном сечении имеет в два раза больше продольных волокон, чем в перпендикулярном. Такая укладка волокон делает материал сильно анизотропным в плоскости листа, в результате чего

прочность по двум главным направлениям чувствительно отличается (примерно вдвое). Отверстие диаметром 1 мм ($\lambda = 0.067$) уменьшает сечение образца и, безусловно, вызывает концентрацию напряжений, однако в условиях большего числа волокон эффект концентрации напряжений, по-видимому, выявляется относительно меньше, чем в перпендикулярном направлении, когда количество волокон вдвое меньше. В результате этого, разрушающая нагрузка образцов при $\varphi = 0^\circ$ с концентратором в виде отверстия $d = 1$ мм отличается от разрушающей нагрузки контрольных образцов не намного. Следует отметить, что как показывают многочисленные эксперименты, уменьшение ширины образца на 1 мм совершенно не

Таблица 3
Зависимость эффективного коэффициента концентрации от отношения d/b и φ для стеклопластика СВАМ

	φ°	$\lambda = d/b, b = \text{const} = 15 \text{ мм}, d = 1; 2; 4; 6 \text{ мм}$			
		0.067	0.133	0.267	0.400
СВАМ 2:1	0	0.96	1.03	1.17	1.25
	45	0.95	1.00	1.18	1.06
	90	1.03	1.14	1.23	1.19
СВАМ 1:1	0	1.06			
	90				



Фиг. 1.

влияет на изменение разрушающей нагрузки (в пределах разброса) в направлении $\varphi = 0^\circ$. И так как разность величин разрушающих нагрузок для образцов без концентратора и с отверстием 1 мм меньше, чем разность площадей рабочих сечений этих образцов, то в итоге разрушающее напряжение при наличии концентратора оказывается больше предела прочности контрольных образцов

$$P_p \cong P_k; \quad F_0 > F_k; \quad \sigma_s = \frac{P_p}{F_0} < \sigma_x = \frac{P_k}{F_k}; \quad \sigma_s / \sigma_x < 1$$

Здесь P_p — разрушающая нагрузка без концентратора; P_k — разрушающая нагрузка при концентраторе диаметром 1 мм; F_0 — сечение контрольного образца; F_k — сечение образца с концентратором диаметром 1 мм.

В подтверждение сказанного, можно привести результаты испытания образцов с $\varphi = 90^\circ$ и результаты испытаний образцов, вырезанных из пластин СВАМ 1:1 в двух основных направлениях (табл. 3). Во всех этих случаях коэффициент K_p больше единицы, что несомненно подтверждает предположение, сделанное выше.

Коэффициент концентрации зависит также и от величины λ или же, если учесть, что в данном случае изменение λ происходит за счет изменения диаметра отверстия, то — и от диаметра концентратора. Наименьшее значение коэффициент концентрации, независимо от угла ориентации φ ,

имеет при $\lambda = 0.067$, то есть, когда $d = 1$ мм. Затем коэффициент концентрации возрастает, однако в промежутке от $\lambda = 0.133$ до $\lambda = 0.400$ изменение составляет не более 5% ($\varphi = 0^\circ$). Следовательно, в результате проведенных исследований мы можем заключить, что после того, как λ приобретает значение 0.133 или начиная с диаметра $d = 2$ мм и выше, количественным изменением коэффициента концентрации можно пренебречь независимо от ориентации образца.

Рассмотрим теперь случай, когда величина λ имеет те же значения, что и в предыдущем случае, однако здесь постоянным остается диаметр концентратора, а изменение λ достигается изменением ширины образца. Принимая диаметр отверстия $d = 4$ мм постоянным, ширину образца варьировали так, что λ принимала значения 0.400; 0.333; 0.267; 0.133 и 0.067. В табл. 2 даны результаты экспериментального исследования влияния концентратора на прочность материала, когда при постоянном диаметре отверстия меняется ширина образца. Необходимо отметить, что в этом случае концентратор и масштабный фактор действуют на образец одновременно. Поэтому в данном случае при расчете коэффициента концентрации необходимо внести корректив масштабного эффекта. Приведенные в табл. 2 значения коэффициента концентрации рассчитаны по формуле, учитывающей также и масштабный эффект $K_p = \frac{\sigma_n M}{\sigma_k}$, здесь M — масштабный коэффициент.

В качестве масштабного коэффициента принято отношение условного предела кратковременной прочности образца данной ширины к пределу кратковременной прочности образца шириной 15 мм.

Наименьшее влияние отверстия, как концентратора, здесь, как и в случае $b = \text{const}$, наблюдается при $\lambda = 0.067$, то есть когда $b \approx 4$ мм и $b = 60$ мм. Наибольшее влияние концентратора для случая $\varphi = 0$ и 90° обнаруживается при $\lambda = 0.267$, затем с увеличением λ влияние концентратора снова уменьшается. Однако при более строгом подходе можно заметить, что и в этом случае для значения $\lambda = 0.133$ и выше, изменением коэффициента концентрации можно пренебречь. И действительно, в случае $\varphi = 0^\circ$ среднее значение коэффициента K_p для $\lambda = 0.133$; 0.267; 0.333 и 0.400 составляет 1.44, при максимальном отклонении от среднего — не больше 8%. В случае, когда $\varphi = 90^\circ$, среднее значение коэффициента K_p для перечисленных случаев составляет 1.51, а максимальное отклонение от среднего значения не превышает 2%.

Если пренебречь сравнением средних значений, то можно, по-видимому, сделать заключение, что когда изменение λ происходит за счет изменения ширины образца, то максимальное влияние концентратора наблюдается в случае $\lambda = 0.267$. При больших или меньших значениях λ влияние концентратора ослабевает.

Несколько иная картина наблюдается при испытаниях образцов с ориентацией $\varphi = 45^\circ$. И хотя здесь также наименьшее влияние концентратора оказывает при $\lambda = 0.067$, однако, в целом, можно считать, что влияние концентратора не уменьшается в зависимости от величины λ . Действительно, при $\varphi = 45^\circ$ для пяти значений λ среднее значение коэффициента кон-

центрации составляет 1,3. Максимальное отклонение от этого значения составляет менее 4%. Естественно, таким разбросом можно пренебречь, считая, что приведенный ряд значений коэффициента концентрации с изменением λ не меняется.

Наконец, рассмотрим вариант, когда при изменяющемся диаметре концентратора несущее поперечное сечение образца остается постоянным, то есть неизменной остается номинальная ширина образца ($2a = \text{const}$).

По-видимому, это именно тот вариант, когда влияние диаметра концентратора на величину эффективного коэффициента концентрации выявляется однозначно.

Во избежание побочного влияния масштабного фактора номинальная ширина образца была принята $2a = 11$ мм. Тогда при диаметрах отверстий 1; 2; 4; 5; 6 и даже 8 мм фактическая ширина образца находилась в интервале от 10-и до 20-и мм, что обеспечивало получение для прочности «максимального, достаточно стабильного значения» [3].

Здесь, как и в предыдущих случаях, особо нужно отметить результаты, полученные от испытания образцов, вырезанных в промежуточном направлении $\varphi = 45^\circ$. Весьма стабильные значения для коэффициента концентрации получены независимо от диаметра концентратора. Этот момент, по-видимому, особо замечается уже потому, что в случаях $\varphi = 0$ и 90° при $d = 8$ мм наблюдается резкое повышение значения коэффициента концентрации, тогда как при $\varphi = 45^\circ$ значение коэффициента концентрации совершенно не изменяется. С другой стороны, заметного различия в значениях коэффициента концентрации по каждому отдельно взятому углу ориентации образца, независимо от метода исследования, не обнаруживается.

На основании проведенных исследований можно заключить следующее:

1. Кратковременная прочность стеклотекстолита, определенная на плоских образцах путем одноосного растяжения, тесно связана с шириной рабочей зоны. Максимальные значения прочности получаются при ширине 10—15 мм. С увеличением ширины образца прочность падает.

2. Круглое центральное отверстие, независимо от диаметра, ослабляет тело материала, вызывая концентрацию напряжений.

3. Величина эффективного коэффициента концентрации напряжений зависит от отношения диаметра концентратора к ширине образца и увеличивается с увеличением этого отношения.

4. Для практических целей после того, как отношение d к b приобретает значение 0,133 и выше, изменением коэффициента концентрации можно пренебречь, принимая его постоянным.

5. Эффективный коэффициент концентрации практически не зависит от того, за счет какого из двух параметров (d и b) происходит изменение. Однако, если изменение происходит так, что номинальная ширина образца ($2a = \text{const}$) всегда остается постоянной, то с увеличением диаметра концентратора коэффициент концентрации растет.

6. Коэффициент концентрации зависит от ориентации волокон. Он больше в направлении волокон и меньше в промежуточном направлении.

7. Величина коэффициента концентрации при прочих равных условиях (λ и φ) зависит и от структуры материала. Он больше у тканого и меньше у ориентированного стеклопластика (СВАМ).

Институт механики
АН Армянской ССР

Поступила 13 XII 1978

Մ. Մ. ՄԱՐՏԻՐՈՅԱՆ, Ա. Ն. ԿԱԳՐԱՄԱՆԻԱՆ

ԿՈՆՑԵՆՏՐԱՏՈՐԻ ԱԶԳԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ԱՊԱՆԵՊԼԱՍՏԻ ԱՄՐՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ

Ա մ փ ո փ ո ս մ

Հնդվածում բերված են կտր անցքի ձևով լարումների կոնցենտրատորի աղղեցությունը ապակեանթաղիտի և կողմնորոշված ապակեպլաստի կարճատև ամրությանը նվիրված էքսպերիմենտալ հետազոտության արդյունքները:

Ցույց է արված, որ կոնցենտրատորի աղղեցությունը կախված է ինչպես անցքի տրամագծի և նմուշի լայնության հարաբերությունից, այնպես էլ նյութի կառուցվածքից և նմուշների մեջ ապակե թելիկների ուղղությունից:

ON INFLUENCE OF CONCENTRATOR ON THE STRENGTH OF FIBRO-GLASS-REINFORCED PLASTIC

M. M. MARTIROSIAN, A. N. KAGRAMANIAN

S u m m a r y

The results of experimental investigations on influence of strain concentrator in the form of circular hole on the momentary strength of orientated fibro-glass-reinforced plastic and fibro-glass laminate are presented. It is shown that the influence of concentrator depends both on the ratio d/b and orientation of the specimen and the structure of the material.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рабинович А. Л., Аврасин Я. Д. О механических характеристиках некоторых слоистых пластиков в связи с прочностью болтовых и заклепочных соединений. В кн.: Стеклотекстолиты и другие конструкционные пластики. М., 1960.
2. Серенсен С. В., Стрельев В. С., Болотников Б. И. Определение расчетных характеристик прочности стеклотекстолитов в зонах концентрации напряжений. Проблемы прочности, 1972, № 10, 3—9.
3. Смирнова М. К., Соколов Б. П., Сидорин Я. С., Иванов А. П. Прочность корпуса судна из стеклотекстолита. 1965, 331.
4. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов. 1972, 544.
5. Полилов А. Н., Степанючев Е. И. Влияние концентрации напряжений на прочность ортогонально армированных полимеров. Машиноведение, 1975, № 1, 70—74.