

ОБ УПРУГОСТИ И ПОЛЗУЧЕСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКА 27-63с ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Г. И. Брызгалин (Волгоград)

В ряде исследований упругости и ползучести ориентированных стеклопластиков [1-4] отмечается существенная анизотропия этих материалов, малая ползучесть вдоль направлений армирования и большая сдвиговая ползучесть. В работах [5,6] используются уравнения для ориентированного стеклопластика, учитывающие ползучесть вдоль направлений армирования лишь интегрально, как некоторую добавку к упругой деформации. В результате реальный материал заменяется гипотетическим, обладающим только сдвиговой ползучестью.

Такой подход удобен для выбора оптимальных параметров армирования и решения задач, в которых касательные напряжения одного порядка или превышают нормальные на главных площадках анизотропии.

Вместе с тем, для ряда задач желательно уточнение математической модели материала и учет характера ползучести вдоль направлений армирования, что особенно важно при повышенных температурах.

Ниже представлены результаты испытаний стеклопластика 27-63с на растяжение вдоль одного из главных направлений анизотропии и их обработка с целью выявления основных закономерностей упругости и ползучести.

Материал — ориентированный нетканый стеклопластик 27-63с — поставлен одной партией в виде плит размерами $250 \times 250 \times 3$ мм. Каждая плита состояла из шести однонаправленных слоев, уложенных поочередно, причем стекловолокна в соседних слоях направлены взаимно перпендикулярно, так что материал оказался равнопрочным относительно двух направлений.

Образцы вырезались в форме полосок вдоль одного из направлений армирования и имели ширину 10 мм, длину и толщину плиты. По шлифованной боковой поверхности образцов замечено, что продольные слои стекловолокон не были строго прямолинейными, причем эта нелинейность была двух типов: или сильная искривленность, напоминающая гофр, в отдельных местах некоторых образцов, или весьма слабая искривленность, характерная для всех образцов.

Первые испытания при повышенных температурах показали, что образцы, имеющие участки с гофрообразной искривленностью, характеризуются скачкообразной ползучестью, причем их полные деформации на 50—100% превышают соответствующие деформации остальных образцов. После испытаний обнаружено расслоение таких образцов по поверхностям соприкосновения слоев. В дальнейшем образцы такого сорта были отбракованы, а результаты испытаний исключены из обработки.

Испытания проведены на установке, описанной в [7], температура поддерживалась с точностью $\pm 2^\circ \text{C}$, деформации измерялись индикаторами с ценой деления 0,001 мм на базе 100 мм. Установленный образец прогревался в печи в течение 1—2 ч и выдерживался при постоянной температуре еще полчаса, после чего за 2—4 сек двумя ступенями прикладывалась растягивающая нагрузка. Далее нагрузка оставалась постоянной в течение 10 ч для большинства образцов; для некоторых время испытания на ползучесть составляло несколько десятков часов. Диапазон температур 25—200 $^\circ\text{C}$. Основное рабочее напряжение 10 кг/мм^2 , выбрано с тем расчетом, чтобы проследить изменение свойств упругости и ползучести для одного напряжения во всем диапазоне температур. Как оказалось, это напряжение для 200 $^\circ\text{C}$ близко к предельному, если иметь в виду длительную работу материала.

Двуступенчатое приложение нагрузки позволило построить три точки на графике зависимости $\sigma - \epsilon$. Оказалось, что его практически можно считать линейным ($\sigma \leq 10 \text{ кг/мм}^2$), так как отношения $\Delta\sigma/\Delta\epsilon$, определенные по обоим ступеням, отличались незначительно, причем отклонения были разных знаков и имели случайный характер.

Окончательное вычисление экспериментальных значений модулей упругости производилось по полной нагрузке $E_0 = \sigma/\epsilon$.

Приводим результаты испытаний: в первой строке — температура испытаний, во второй — модули упругости E_0 , приведены наибольшее и наименьшее значения для отдельных образцов (сверху), среднее арифметическое (снизу) и число образцов, испытанных при данной температуре (в скобках).

$T^\circ \text{C}$	= 25	40	70	100	150	200
$E_0, \text{ кг/мм}^2$	$\frac{2460-2860}{(3) \quad 2650}$	$\frac{2300-2810}{(4) \quad 2570}$	$\frac{2390-2690}{(3) \quad 2560}$	$\frac{1950-2630}{(5) \quad 2280}$	$\frac{1830-1960}{(2) \quad 1900}$	$\frac{1670-2000}{(2) \quad 1840}$
$E_p, \text{ кг/мм}^2$	2653	2579	2431	2283	2036	1783
$\delta_E, \%$	+0.1	+0.4	-5.3	+0.2	+6.7	-3.2

При температуре до 200° С стеклянное волокно, применяемое в конструкционных материалах, деформируется в основном упруго; его временные деформации составляют незначительную долю мгновенных. Зависимость модуля упругости от температуры для стекловолокон линейна [8].

Если образец стеклопластика вырезан вдоль направления армирования, то определяющую роль в его упругих свойствах будут играть продольные стекловолокна. В связи с этим естественно попытаться аппроксимировать связь модуля упругости стеклопластика E и температуры испытаний T линейной зависимостью.

Данные эксперимента были обработаны методом наименьших квадратов в предположении линейной корреляции между E и T ; получена формула

$$E = 2776 - 4.93 T \quad (\text{модуль — в } \kappa\Gamma/\text{мм}^2, \text{ температура — в } ^\circ\text{C}) \quad (1)$$

Значения модуля упругости, рассчитанные по формуле (1) и обозначенные E_p , записаны в третьей строке вывода. В то время, как относительные отклонения значений модулей упругости отдельных образцов от среднего при данной температуре достигают 13%, относительная разница между средними экспериментальными и расчетными значениями

$$\delta E = \frac{E_p - E_{\text{э}}}{E_p} \quad (2)$$

(см. четвертую строку вывода) не превышает 7%, т. е. формула (1) приемлема.

Данные испытаний на ползучесть для различных образцов характеризуются значительным разбросом, причем кривые ползучести при одинаковых температурах и напряжениях зачастую отличаются не только количественно, но и качественно.

Это можно объяснить наличием нескольких механизмов ползучести и неоднородностью материала, обуславливающей преобладание того или иного механизма.

Если предположить, что стекловолокна прямолинейны, то рассматриваемый образец можно моделировать двумя параллельными элементами: один — упругий (соответствует продольным волокнам стекла), другой — обладающий свойством ползучести (соответствует поперечным слоям материала и прослойкам связующего в продольных слоях). Для мгновенных деформаций модельное представление такого рода использовалось в [9–10]. Пусть полные деформации элементов равны, а связь между напряжениями и деформациями для первого и второго элементов имеют вид

$$\varepsilon = \frac{\sigma_1}{E_1}, \quad \varepsilon = \frac{1}{E_2} \left[\sigma_2 + \chi \int_0^t \frac{(t-\tau)^\alpha}{\Gamma(1+\alpha)} \sigma_2(\tau) d\tau \right] \equiv \frac{1}{E_2} (1 + \chi J_\alpha^*) \sigma_2 \quad (3)$$

Здесь $\sigma_1, \sigma_2, E_1, E_2$ — напряжения и модули упругости элементов; J_α^* — оператор ползучести (см. [11]); t — время, $\chi, \alpha = \text{const}$. При $\sigma_2 = \text{const}$ из (3) следует

$$\varepsilon = \frac{\sigma_2}{E_2} + A t^{1+\alpha} \quad (A = \text{const})$$

Если относительные площади поперечных сечений элементов соответственно f_1 и f_2 , то для среднего напряжения модели можно записать

$$\sigma = f_1 \sigma_1 + f_2 \sigma_2 \quad (4)$$

Равенства (3) — (4) позволяют определить связь σ — ε для модели в виде

$$\varepsilon = \lambda [1 + (\kappa - \beta) \mathcal{J}_\alpha^* (-\beta)] \sigma \quad \left(\beta = \frac{\chi f_1 E_1}{f_1 E_1 + f_2 E_2} > 0, \quad \lambda = \frac{\beta}{\chi f_1 E_1} \right) \quad (5)$$

Здесь $\mathcal{J}_\alpha^* (-\beta)$ — оператор Ю. Н. Работнова [11].

Согласно свойствам этого оператора, при постоянном напряжении ползучесть асимптотически исчерпывается. Если $t \rightarrow \infty$, то в формуле (5)

$$\varepsilon \rightarrow \frac{\sigma}{E_{1/1}} \equiv \varepsilon_1^\infty$$

Приняв типичные значения параметров $E_1 = 7000 \kappa\Gamma/\text{мм}^2$, $f_1 = 0.3$, $f_2 = 0.7$, $\sigma = 10 \kappa\Gamma/\text{мм}^2$, получим $\varepsilon_1^\infty = 0.005$. Эта предельная деформация соответствует полному перераспределению нагрузки на упругий элемент, т. е. на стекловолокна.

Применимость формулы (5) к описанию ползучести реального материала иллюстрируется фиг. 1. По оси абсцисс отложен логарифм времени, по оси ординат — логарифмы деформаций ползучести. Точки — результат эксперимента для одного из образцов ($\sigma = 5 \kappa\Gamma/\text{мм}^2$, $T = 100^\circ\text{C}$), сплошная линия соответствует функции $4.1 \mathcal{J}_{-0.7}^* (-0.253) 10^{-5}$. К сожалению, эти функции (точнее, функции Миттаг — Леффлера, связанные с ними линейной зависимостью) затабулированы [12] только для значений $\alpha = -0.7$, а большинство экспериментальных кривых в настоящих испытаниях характеризуется несколько большими значениями параметра α .

Кроме ползучести, возникающей за счет перераспределения напряжений, возможно деформирование вследствие выпрямления стекловолокон. Вид искривленных продольных слоев испытанных образцов напоминает синусоиду. Приняв отношение амплитуды синусоиды к длине полуволны равным $a/l = \rho$ и подсчитав длину дуги синусоиды $y = a \sin \pi x/l$:

$$S = \frac{2l}{\pi} \sqrt{1 + (\pi\rho)^2} E(k, 1/2\pi)$$

$$\left(k = \frac{\pi\rho}{\sqrt{1 + (\pi\rho)^2}}\right) \quad (6)$$

($E(k, 1/2\pi)$ — полный эллиптический интеграл второго рода), получим оценку наибольшей деформации материала, обусловленной распрямлением волокон

$$\varepsilon_2^\infty = \frac{S - l}{l} \quad (7)$$

Для слабо искривленных волокон $\rho \leq 0.07$ множители в (6)

$$E(k, 1/2\pi) \approx \pi/2 \quad (\text{см. [13]})$$

$$\sqrt{1 + (\pi\rho)^2} \approx 1 + 1/2 (\pi\rho)^2$$

Тогда из (7) следует

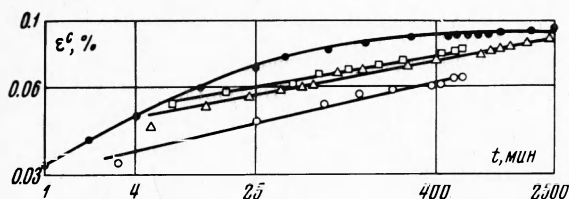
$$\varepsilon_2^\infty \approx 5 \rho^2 \quad (8)$$

Эта формула дает возможность оценить наибольшую деформацию материала за счет распрямления волокон при растяжении с точностью порядка 1% от ε_2^∞ .

Допустим условно, что деформацию $\varepsilon_2^\infty = 0.0002$ (что составляет 4–5% от упругой при $\sigma = 10 \text{ кг/мм}^2$) можно считать пренебрежимо малой. Тогда из соотношения (8) следует, что для получения материала, волокна которого можно практически считать прямыми при растяжении, надо задаться числом $\rho = 0.02$.

Тот факт, что для отдельных образцов ρ может различаться в несколько раз, частично объясняет разброс в свойствах ползучести не только количественный, но и качественный, ибо исчерпание рассматриваемого механизма при малых ρ должно сказаться на характере кривых ползучести.

Ползучесть испытанного материала при комнатной температуре ($T = 25^\circ \text{C}$) хорошо описывается степенной зависимостью во всем диапазоне времени испытания (около 500 ч):



Фиг. 3

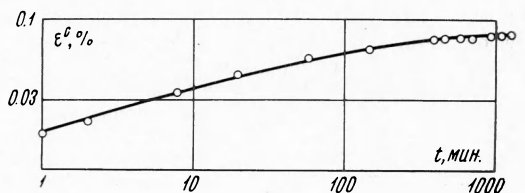
в логарифмических координатах $\lg \varepsilon^c - \lg t$ (где ε^c — деформация ползучести) точки для всех образцов при $\sigma = 10$ лежат на прямых, практически параллельных между собой, как это видно из фиг. 2.

При более высоких температурах (эти испытания проведены на базе времени 10 ч) такой стабильности в характере кривых ползучести нет. Для части образцов кривые практически линейны в логарифмических координатах; для других — зависимость $\lg \varepsilon^c - \lg t$ оказывается нелинейной, причем угол наклона касательных к оси $\lg t$ убывает со временем, как видно из фиг. 3, где представлены испытания при $t = 100^\circ \text{C}$, $\sigma = 10$. В обоих случаях, подбирая параметры α и β , кривые можно описать при помощи функции $\mathcal{E}_\alpha^* (-\beta)$ при $\beta = 0$ получается степенная зависимость

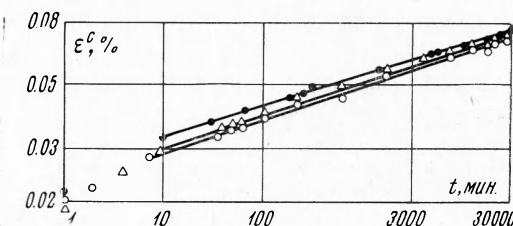
$$\varepsilon^c = A t^{1+\alpha} \quad (9)$$

Именно эта зависимость и была использована для описания кривых ползучести при различных температурах. В выводе даны значения коэффициента $1 + \alpha$ только для тех образцов, ползучесть которых подчиняется соотношению (9) без существенных отклонений, по крайней мере, в диапазоне времени (10–600 мин).

$T, ^\circ \text{C} =$	25	40	70	100	150
$1 + \alpha =$	$\frac{0.09-0.11}{(5) \quad 0.10}$	$\frac{0.07-0.12}{(2) \quad 0.09}$	$\frac{0.11-0.12}{(2) \quad 0.12}$	$\frac{0.10-0.12}{(3) \quad 0.11}$	$\frac{0.14-0.22}{(2) \quad 0.18}$



Фиг. 1



Фиг. 2

Принимая во внимание значительный разброс в величине деформации для отдельных образцов, можно условиться, что и все остальные кривые подчиняются формуле (9), погрешность при этом составит 2—4% полной деформации и вполне уложится в полосу разброса.

Деформирование при 200° С в основном также характеризовалось формулой (9), однако почти для всех остальных образцов наблюдалось скачкообразное возрастание деформаций в отдельные моменты времени, в связи с чем данные для $1 + \alpha$ при этой температуре не приводятся.

Характерен существенно больший разброс результатов, причем ползучесть некоторых образцов в несколько раз превышает деформацию при других температурах.

Данные вывода позволяют считать коэффициент $1 + \alpha$ не зависящим от температур в интервале 25—100° С, что означает подобие кривых ползучести для разных температур. Выбрав какой-то момент времени t_0 (в данном случае $t_0 = 420$ мин) и определив $\epsilon^c(t_0)$ для различных образцов и разных температур, можно, пользуясь подобием кривых, полностью охарактеризовать связь между деформацией ползучести и температурой. Полученные таким образом данные были обработаны методом наименьших квадратов в предположении линейной корреляции между ϵ^c и T было найдено

$$\epsilon^c = (45 + 0.294 T) 10^{-5} \quad (10)$$

Наибольшее относительное отклонение δ_ϵ среднеэкспериментальной от расчетной деформации составляет 1%:

$T, ^\circ\text{C} =$	25	40	70	100
$10^5 \epsilon_p^c =$	$\frac{44-63}{(5) 52}$	$\frac{52-65}{(4) 57}$	$\frac{60-70}{(2) 65}$	$\frac{60-87}{(5) 74}$
$10^5 \epsilon_p^c =$	52.4	56.8	65.6	74.4
$\delta_\epsilon, \% =$	+0.8	-0.4	+1	+0.6

Испытания трех образцов при 5 кГ/мм^2 , $T = 100^\circ \text{С}$ показали среднюю полную деформацию, в два раза меньшую, чем при $\sigma = 10 \text{ кГ/мм}^2$, $T = 100^\circ \text{С}$, в связи с чем можно принять линейную зависимость деформации от напряжения.

Используя полученные данные, по меньшей мере, для $\sigma \leq 10 \text{ кГ/мм}^2$, $T \leq 100^\circ \text{С}$ можно записать зависимость

$$\epsilon = \frac{\sigma}{a - bT} + 10^{-5} \frac{\sigma}{\sigma_0} (d + cT) \left(\frac{t}{t_0} \right)^{1+\alpha} + \gamma (T - 25)$$

Здесь $a = 2776 \text{ кГ/мм}^2$, $b = 4.93 \text{ кГ/мм}^2 \text{ } ^\circ\text{С}$, $\sigma_0 = 10 \text{ кГ/мм}^2$, $1 + \alpha = 0.1$, $c = 0.294 \text{ 1/}^\circ\text{С}$, $d = 45$, $t_0 = 420 \text{ мин}$, γ — коэффициент линейного расширения (согласно предварительным данным $\gamma = 1.3 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{С}$).

Автор благодарит П. В. Софиевко за помощь при проведении испытаний.

Поступила 15 VI 1967

ЛИТЕРАТУРА

1. М а л и н и н Н. И. К теории анизотропной ползучести. ПМТФ, 1964, № 3.
2. М а л и н и н Н. И. Ползучесть армированного слоя. ПМТФ, 1962, № 6.
3. В а н - Ф о - Ф ы Г. А. Температурные напряжения и смещения в стеклослоях. ПМТФ, 1964, № 4.
4. Б а е в Л. В., М а л и н и н Н. И. Упругость и ползучесть стеклопластика АГ-4с. Пластические массы, 1964, № 7.
5. Б р ы з г а л и н Г. И. К расчету на ползучесть пластинок из стеклопластика. ПМТФ, 1963, № 4.
6. Б р ы з г а л и н Г. И. К описанию анизотропной ползучести стеклопластика. ПМТФ, 1963, № 6.
7. Б а е в Л. В., М а л и н и н Н. И., Р а б о т н о в Ю. Н., Ш у б и н И. А. Установка для испытаний пластмасс. Заводск. лаб. 1962, № 4.
8. З а к А. Ф. Физико-химические свойства стеклянных волокон. М., Ростехиздат, 1962.
9. Д а н и л о в а И. Н. О напряженно-деформированном состоянии стеклопластика. Механика полимеров, 1965, № 2.
10. Б р ы з г а л и н Г. И. К расчету внутренних напряжений и деформаций в стеклопластике. Пластические массы, 1963, № 7.
11. Р а б о т н о в Ю. Н. Равновесие упругой среды с последствием. ПММ, 1948, т. 12, вып. 1.
12. Р о з о в с к и й М. И. Интегральные операторы и задача о ползучести цилиндра. Научн. докл. высшей школы, Физ.-матем., 1958, № 6.
13. Справочная математическая библиотека. Матем. анализ (под ред. Люстерника Л. А.) Физматгиз, 1961.