

- наклонной трещины в общее сопротивление срезу железобетонного элемента без поперечного армирования.
- Наличие нормальных и тангенциальных перемещений в формулах (2) и (9) позволяет отслеживать изменение нагельного усилия и усилия, возникающего от сил зацепления на различных стадиях изменения геометрии системы, и следовательно дает возможность использовать её в деформационном методе расчета железобетонных конструкций без поперечного армирования.
 - Использование уравнения (3) позволяет получить траекторию магистральной наклонной трещины, которая дает хорошее совпадение с экспериментальными данными.
- СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСЧТОНИКОВ**
- СНБ 5.03.01-02. Конструкции бетонные и железобетонные. Нормы проектирования/ Министерство архитектуры и строительства. – Минск.: Минскпроект, 2003. – 139 с.
 - Кондратчик А.А., Зубрицкий Н.Н. Построение единой методики расчета железобетонных конструкций при совместном действии изгибающего момента, продольных и поперечных сил/ Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовка инженерных кадров Республики Беларусь: Сб. науч. трудов междунар. науч.-метод. межвузовского семинара, Могилев 16-18 ноября 2005 г. – с. 203-210
 - Dei Poli S., Prisco M.D., Gambarova P.G. Stress field in web reinforcement concrete thin-webbed beams failing in shear/ Journ. St. Eng., v. 116, No 9, Sept., 1990 – pp. 2496-2515.
 - Di Prisco D., Gambarova P.G. Validation of Animproved Truss Model for Shear in RC and PC Beams/ Study e Recherche, v. 15 Politechnico di Milano, 1994 – pp. 77-102.
 - Dotun Adepegba, Narayan Swamy Significance of Dowel Forces on the Shear Failure of Rectangular Reinforced Concrete Beams Without Web Reinforcement/ ACI Struct. Journ., v. 62, No 10, Oct., 1965 – pp. 163-179.
 - Jürgen Fischer, Gert König Pure Mechanical Model for Diagonal Tension Failure/ LACER No. 1 – 1996 – pp. 269-289.
 - Kani G. N. J. The riddle of shear failure and its solution. ACI Journal., 61(4), pp. 441-467.
 - Krefeld W.J., Thurston G.W. Studies of the shear and diagonal tension strength of simply supported reinforced concrete beams. - Columbia University Department of Civil Engineering and Mechanics. New York. June. - 1962. - p. 451-476.
 - Leonhardt F., Walter R. Schubversuche an einfeldigen stahlbetonbalken mit und ohne Shhubbewehrung. DAFST, Heft 151, 1962.
 - Oliver J. Gastbled, Ian M. May, "Fracture Mechanics Model Applied to Shear Failure of Reinforced Concrete Beams without Stirrups" ACI Journal, Proceedings V. 98, No. 2, Apr 2001, pp. 184-190.
 - Raghu S. Pendyala, Priyan Mendis, "Experimental Study on Shear Strength of High-Strength Concrete Beams" ACI Journal, Proceedings V. 97, No. 4, Jul 1998, pp. 564-571.
 - Rebeiz S.K. Shear strength prediction for concrete members/ Journal of structural engineering, vol. 125. No. 3. 1999.
 - Vecchio F.D. Analysis of Shear-Critical Reinforced Concrete Beams/ ACI Struct. Journ., v. 97, No 1, Jan. – Feb., 2000 – pp. 102-110.
 - Vecchio F. J., Collins M. P. (1986) The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear." ACI Struct. Journ., v. 83, No 2 - 1986 – pp.219-231.
 - Vecchio, F. J., and Collins, M. P. (1988). "Predicting the response of reinforced concrete beams subjected to shear using the modified compression field theory." ACI Struct. Journ., v. 85, No 4 – pp.258-268.

УДК 539.013.13

Колдаева С.Н., Екименко А.Н., Колдаев Ю.Н.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В КОМПОЗИТАХ, АРМИРОВАННЫХ СТЕКЛОВОЛОКНОМ

Композиционные материалы, разрабатываемые для нужд горно-шахтной промышленности, относятся к классу конструктивных. Основное требование к материалам этого класса – высокая механическая прочность. Для улучшения механических характеристик композиционных материалов применяется армирование полимерной матрицы высокомолекулярным волокном. Различие коэффициентов термического расширения полимера и армирующих волокон приводит к возникновению остаточных напряжений при термоусадке связующего. Для определения влияния описанного процесса на механические характеристики композиционного материала необходима методика, позволяющая получить численную оценку остаточных напряжений в системе «полимерная матрица - армирующее волокно».

Одним из методов исследования остаточных напряжений является тензометрический метод, описанный в [1]. Он заключается в следующем. Два одинаковых волокна из константана, рабочий и компенсационный (Ø15-20 мкм), являются плечами мостовой схемы тензостанции. На рабочем волокне формируют образцы для испытаний, которые представ-

ляют собой формы круглого или квадратного сечения, заполненные жидким терморезактивным связующим (эпоксидной смолой). Расстояние от рабочего волокна до стенок формы составляет при этом не менее 1 мм. В процессе нагревания, отверждения и охлаждения образцов наблюдают за показаниями приборов и измеряют параметры, характеризующие остаточные напряжения, которые вычисляют затем с помощью закона Гука [1].

Использовать указанный метод для непосредственной оценки остаточных напряжений в реальных композитах не представляется возможным по следующим причинам. Во-первых, изготавливаемый образец по геометрическим параметрам не соответствует волокну в реальном композите (толщина слоя связующего на волокне реального композита, как правило, соизмерима с размерами поперечного сечения волокна, и объемное содержание в композите составляет 10-70 об. %, в то время как в модельном образце объемное содержание волокна составляет 0,0003 об. % и менее). Как показывают исследования [2, 3], связующее при толщине слоя в пределах, соизмеримых с размерами волокна, существенно влия-

Колдаева С.Н., к.т.н., преподаватель кафедры «Тактика проведения аварийно-спасательных работ и тушения пожаров» Гомельского инженерного института МЧС РБ.

Екименко А.Н., научный сотрудник Института инновационных исследований.

Колдаев Ю.Н., преподаватель кафедры «Тактика проведения аварийно-спасательных работ и тушения пожаров» Гомельского инженерного института МЧС РБ.

Беларусь, г. Гомель.

ет на величину остаточных напряжений. Во-вторых, использование форм для изготовления образцов влияет на полученные результаты вследствие взаимодействия связующего со стенками формы. В-третьих, метод не применим в тех случаях, когда в качестве связующего используют смолы, отверждаемые при повышенных давлениях, например резольные, фенолформальдегидные и т.п. В-четвертых, метод предназначен для исследования напряжений в одиночном константановом волокне и предполагает экстраполяцию полученных результатов на композиты, состоящие из большого количества волокон различной природы.

Нами разработан способ изготовления специальных образцов для непосредственной оценки остаточных напряжений в реальных композитах, армированных волокнами. Разрабатывали образцы двух видов: с одиночным константановым волокном и с группой исследуемых волокон, в которую константановое волокно включено в качестве измерительного элемента. В качестве исследуемых волокон использовали волокна, входящие в состав композита, в котором необходимо оценить внутреннее напряженное состояние. Образцы с одиночным константановым волокном формировали нанесением слоя жидкого связующего на волокно, причем толщину слоя связующего принимали в пределах $d < h > 0,1d$, где d - диаметр волокна, h - толщина слоя связующего. Слой жидкого связующего наносили на распрямленное волокно с помощью оправки, причем равномерность покрытия и требуемую толщину слоя достигали подбором вязкости связующего.

Указанный интервал толщин слоя связующего соответствует содержанию волокна в композите 10-70 об. %. В [1] указано, что толщина слоя связующего более 1 мм не влияет на величину деформаций. Действительно, при таких толщинах (в пересчете на диаметр волокна это составляет $h = 50d$) напряженное состояние образца изменяется незначительно. Поскольку в реальных композитах толщина слоя связующего составляет, как правило, $d < h > 0,1d$, то результаты, полученные при $h = 50d$, не соответствуют истинным значениям напряжений в композите. Проведенные эксперименты по методике [1] подтверждают это. Для изготовления образцов в качестве связующего использовали фенолформальдегидную смолу ЛБС-3, а в качестве волокон - константановые волокна Ø20 мкм, длиной 0,08 м. Измерительным прибором служила тензостанция ТА-5 со шлейфовым осциллографом Н-70. На протарированные волокна наносили жидкое связующее, толщиной $0,1d$ (2 мкм), $0,5d$ (10 мкм), $1d$ (20 мкм). Затем образцы высушивали при комнатной температуре до полного удаления растворителя и отверждали при $T_{отв} = 413$ К в течение 1 мин и затем охлаждали до $T_{кон} = 293$ К. Средние результаты испытаний для серий из 6-10 образцов занесены в табл. 1. Образцы также изготавливались и по известному методу, где $h = 50d = 1000$ мкм.

Как видно из табл. 1, измеряемые величины зависят от толщины слоя связующего. Следовательно, для повышения точности оценки остаточных напряжений необходимо изготавливать образцы с таким соотношением волокна и связующего, как в композите.

В этом случае экспериментальные данные будут максимально приближены к истинным значениям исследуемых напряжений.

Как отмечалось выше, с помощью одиночных образцов можно давать качественную оценку напряжений, возникающих в волокнах другой природы. В образце с одиночным волокном не учитывается фактор взаимного влияния волокон друг на друга, которое имеет место в реальных композитах.

Выяснить характер этого влияния с помощью константановых волокон практически невозможно, так как трудно изготовить образец, в котором бы константановые волокна были достаточно приближены друг к другу и исключена возможность их соприкосновения. Соприкосновение же волокон приведет к нарушению работы тензостанции.

Образцы, представляющие собой модель композита и состоящие из исследуемых волокон и связующего, изготавливали таким образом, что константановое волокно выполняло роль только измерительного элемента. Использовали группу исследуемых волокон одинаковой длины, количество которых определяли по эмпирической формуле:

$$n \geq k \frac{E_k F_k}{E_u F_u}, \quad (1)$$

где E_k, E_u - соответственно, модули упругости, F_k, F_u - площади поперечного сечения константанового и исследуемого волокон, k - коэффициент, зависящий от чувствительности приборов, который определялся экспериментально (для тензостанции ТА-5: $k \approx 19$).

Волокна покрывались жидким связующим и выдерживались при комнатной температуре до полного удаления растворителя. Толщина слоя связующего принималась равной: $d \geq h \geq 0,1d$. Затем волокна собирали в «пучок» таким образом, чтобы концы их совпадали, разместив среди них константановое волокно, длина которого не превышала длин исследуемых волокон. Полученный образец помещали внутрь тонкостенной фторопластовой трубки. Герметически закупоренную трубку опускали в жидкостной термостат, где осуществляли отверждение связующего под гидростатическим давлением, так как отверждение в обычных пресс-формах методом прямого прессования привело бы к повреждению константанового волокна. После отверждения образца давление снимали, охлаждали термостат вместе с образцом и в процессе охлаждения измеряли деформацию константанового волокна.

Напряжения в образце с одиночным константановым волокном определяли по методике, описанной в [1]. Определение напряжений в образце, состоящем из группы волокон, имеет свои особенности ввиду различной природы исследуемого и константанового волокон. Средняя относительная деформация константанового волокна, отражающая его напряженное состояние, отличается от деформации исследуемых волокон. Это отличие особенно проявляется в образцах, отверждаемых при повышенных температурах, когда различны коэффициенты температурного линейного расширения связующего и волокон. В процессе отверждения образца при температуре $T_{отв}$ имеет место химическая усадка связующего. Константановое

Таблица 1. Результаты исследований остаточных напряжений в системе «константановое волокно - смола ЛБС-3»

Физические величины	Толщина слоя связующего			
	$0,1d = 2$ мкм	$0,5d = 10$ мкм	$1d = 20$ мкм	$50d = 1000$ мкм
$\epsilon_{x_{cp}}$, отн. ед.	$42,7 \times 10^{-6}$	$191,8 \times 10^{-6}$	$441,6 \times 10^{-6}$	$1223,3 \times 10^{-6}$
$\sigma_r = \sigma_\phi$, Н/м ² × 10 ⁵	45	135	181	221
$\sigma_{x_{cp}}$, Н/м ² × 10 ⁵	98	396	826	2143

Таблица 2. Результаты исследований остаточных напряжений в системе «стекловолокно – смола ЛБС-3»

Физические величины	Толщина слоя связующего			
	0,1d = 2мкм	0,5d = 10 мкм	1d = 20 мкм	50d = 1000 мкм
ϵ_k , отн. ед.	-1227×10^{-6}	-527×10^{-6}	553×10^{-6}	2455×10^{-6}
ϵ_u , отн. ед.	213×10^{-6}	913×10^{-6}	1993×10^{-6}	3895×10^{-6}
σ_{oc} , Н/м ² × 10 ⁵	153	657	1429	2804

волокно, находясь в группе волокон, деформируется так же, как исследуемые волокна, так как оно не может влиять на общую деформацию образца ввиду превосходящей жесткости последнего. При охлаждении образца до температуры $T_{кон}$ средняя относительная деформация константанового волокна $\epsilon_1 = \alpha_k \Delta T + \epsilon_k$, где $\alpha_k \Delta T$ - температурная деформация, не влияющая на напряженное состояние волокна и протекающая свободно, ϵ_k - показания приборов, отражающие истинные напряжения в константановом волокне. Одновременно исследуемое волокно деформируется на величину $\epsilon_2 = \alpha_u \Delta T + \epsilon_u$,

где $\alpha_u \Delta T$ - свободная деформация от воздействия температуры; ϵ_u - деформация, отражающая действительное напряженное состояние волокна.

Для образцов, в которых адгезия связующего к волокнам достаточно сильна, т.е. исключена возможность сдвига связующего относительно волокон по поверхности раздела под действием нагрузки, допустимо применить гипотезу плоских сечений и совместности деформаций в образцах, т.е.

$$\alpha_k \Delta T + \epsilon_k = \alpha_u \Delta T + \epsilon_u, \quad (2)$$

откуда $\epsilon_u = \Delta \alpha \Delta T + \epsilon_k$, (3)

где $\Delta \alpha = (\alpha_k - \alpha_u)$ - разность коэффициентов температурного линейного расширения константанового и исследуемого волокон;

$\Delta T = (T_{отв} - T_{кон})$ - разность температуры отверждения и конечной температуры после охлаждения образцов.

Что касается величины ϵ_u , которая определена по выражению (3), то она отражает среднюю относительную деформацию исследуемого волокна от совместного воздействия осевых и боковых нагрузок. Определить отдельно боковые и осевые деформации волокна, как это делается в образце с одиночным волокном, достаточно сложно. Для этого необходимо выяснить взаимовлияние деформаций исследуемых и константанового волокон.

Величина ϵ_u позволяет выяснить зависимость остаточных напряжений в композиционных материалах от различных

факторов и получить численные значения одного из компонентов напряженного состояния системы - осевого напряжения от совместного действия осевых и боковых нагрузок, т.е.

$$\sigma_{oc} = \sigma_u \cdot \epsilon_u. \quad (4)$$

Для изготовления образцов по описанной выше методике использовались стеклянные волокна диаметром 50 мкм, длиной 90 мм в количестве

$$n \geq k \frac{E_k F_k}{E_u F_u} \approx 7 \text{ шт.}, \quad (5)$$

где $k \approx 19$ - постоянный коэффициент для тензостанции ТА-5; $E_u = 0,72 \cdot 10^5$ МН/м²; $E_k = 1,6 \cdot 10^5$ МН/м²; $F_u = \pi d_u^2 / 4 = 625 \pi$ мкм²; $F_k = \pi d_k^2 / 4 = 100 \pi$ мкм²

Для изготовления образца использовали 15 волокон. Толщину слоя связующего (фенолформальдегидная смола ЛБС-3) на волокнах принимали равной: $h = 0,1d = 5$ мкм, $h = 0,5d = 25$ мкм, $h = d = 50$ мкм и $h = 50d = 2500$ мкм, температура отверждения $T_{отв} = 140^\circ\text{C}$, $T_{кон} = 20^\circ\text{C}$, $\alpha_k = 17 \times 10^{-6}$ град⁻¹.

Образцы отверждали при гидростатическом давлении 100×10^5 Н/м² в течение 3 мин и затем постепенно охлаждали до $T_{кон} = 20^\circ\text{C}$. Относительную деформацию и напряжения в исследуемом стекловолокне определяли по формулам (3), (4), результаты занесены в табл. 2. Знак "минус" при ϵ_k означает, что константановое волокно растянуто. Из таблицы видно, что толщина слоя связующего, характеризующая объемное соотношение количества волокна и связующего в образце, является одним из факторов, определяющих величины остаточных напряжений в полимерной матрице, армированной жестким волокном.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Поляков В.Л., Горбаткина Ю.А.: «Остаточные напряжения в системе волокнистый наполнитель - связующее», сб. Физико-химическая механика материалов. - М., 1969, т. 5, №1, с.94
2. Александров А.Я., Ахметдзянов М.Х.: «Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела». - М.: Наука, 1973, 576 с.
3. Абитов А.Л., Молодцов Т.А.: «Исследование остаточных внутренних напряжений в армированном эпоксидном полимере». Механика полимеров, 1965, №4, стр.76.

УДК 539.3

Босаков С.В., Дмитриева К.В.

РАСЧЁТ ГОРИЗОНТАЛЬНО НАГРУЖЕННОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ СТЕНКИ В УПРУГОЙ СРЕДЕ С УЧЕТОМ КОНСТРУКТИВНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ

Состояние проблемы

При строительстве в условиях плотной городской застройки широкое применение находят шпунтовые стенки, конструкции типа «стена в грунте», гибкие подпорные стенки.

Босаков Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительной механики Белорусского национального технического университета.

Дмитриева Ксения Владимировна, аспирант кафедры строительной механики Белорусского национального технического университета.

Беларусь, БНТУ, 220027, г. Минск, пр. Ф.Скорины, 65.

Теория их расчета в полной мере не разработана и вызывает интерес многих ученых. Расчеты подобных задач можно свести к рассмотрению контактных задач для клина.