

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВИВШЕЙСЯ ПОЛЗУЧЕСТИ СЛОИСТЫХ МЕТАЛЛОКОМПЗИТНЫХ БАЛОК С УЧЕТОМ ОСЛАБЛЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОПЕРЕЧНОМУ СДВИГУ*

д.ф.-м.н. Янковский А.П.

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

Основой несущей части современных инженерных сооружений, как правило, является каркас, который представляет собой совокупность силовых элементов стержневого типа: колонн, балок, ферм, рам и т.п. Цель расчета несущего каркаса сооружения по условиям прочности, податливости и устойчивости состоит в обеспечении достаточной, но не чрезмерно избыточной безопасности, т.е. в достижении рационального сочетания надежности с экономичностью, поэтому активно развиваются методы оптимального проектирования силовых элементов сооружений [1, 2 и др.]. В последнее время серьезные надежды возлагаются на создание композитных конструкций, несущие элементы которых создаются на основе сочетания материалов с разными механическими характеристиками.

Известно, что при длительном нагружении металлоконструкций (в том числе, состоящих из металлокомпозитных несущих элементов) большую часть времени они работают в условиях установившейся ползучести [3], поэтому актуальной является проблема адекватного расчета металлокомпозитных (в частности, слоистых) несущих элементов конструкций, работающих в этих условиях.

Исследования различных вопросов изгибного деформирования в условиях ползучести стержневых и балочных элементов, изготовленных из традиционных конструкционных металлических материалов, проводились, например, в [3 и др.]. Теория же расчета изгибаемых металлокомпозитных балок, рам и т.п. (в частности слоистой структуры), работающих в условиях ползучести, находится пока в состоянии становления. Так, в [2, 4 и др.] изучались вопросы изгибного деформирования слоистых металлокомпозитных балок и рам, работающих в условиях ползучести. Основные разрешающие уравнения в этих работах, как и в [3], получены в рамках классической теории Бернулли. Однако известно, что в рационально спроектированной балке (даже не обязательно композитной) несущие слои должны быть разнесены и соединены тонкой стенкой [2, 5 и др.]. Неучет же деформаций поперечного сдвига в тонкой стенке профилированной балки (как это имеет место в случае использования классической теории) может привести к существенному занижению оценки ее податливости, особенно в случае нелинейного поведения материалов компонентов композиции (например, при работе в условиях установившейся ползучести [3]), а значит, в конечном итоге, и к неверным решениям задач оптимизации и рационального проектирования.

В связи с вышеизложенным, настоящее исследование посвящено построению неклассической теории изгибного деформирования в условиях установившейся ползучести слоистых металлокомпозитных балок нерегулярной структуры и сравнению результатов расчетов, полученных на ее основе, с аналогичными результатами классической теории.

В декартовой прямоугольной системе координат x_i рассмотрим прямолинейную слоистую балку длиной L ; ось x_1 направим вдоль оси балки, а x_3 – по ее высоте (рис. 1). Композитная балка представляет собой пакет, состоящий из нескольких слоев, вы-

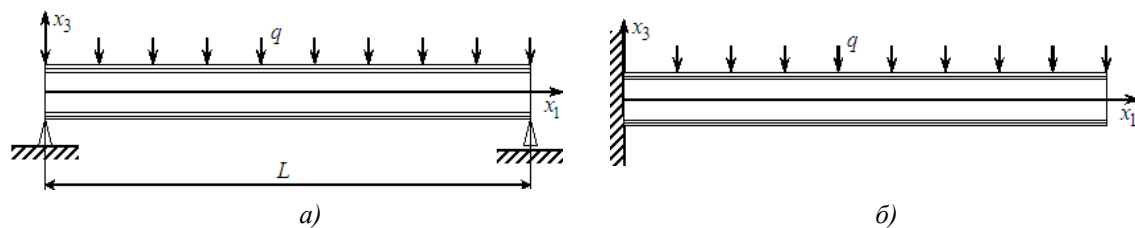


Рис. 1. Слоистые балки нерегулярной структуры: а) – шарнирно опертая; б) – консольная

полненных из однородных изотропных металлических материалов. Этот многослойный пакет обладает свойством симметрии относительно плоскости x_1x_3 (рис. 2). Условия контакта слоев предполагаются идеальными, т.е. отсутствует их взаимное проскальзывание.

Как уже отмечалось, в рационально спроектированной балке несущие слои должны быть разнесены и соединены между собой стенкой, которую условимся называть слоем с номером $m=0$. Пронумеруем несущие слои (полки), расположенные выше стенки, снизу вверх от 1 до $M^{(+)}$ ($1 \leq m \leq M^{(+)}$), а несущие слои, лежащие ниже стенки, пронумеруем сверху вниз от -1 до $-M^{(-)}$ ($-M^{(-)} \leq m \leq -1$, $M^{(-)} > 0$). Так, на рис. 2, а изображен случай $M^{(+)} = M^{(-)} = 2$, т.е. балка состоит из пяти слоев. Значения $M^{(\pm)} = 1$ и $M^{(\pm)} = 2$ позволяют описать большинство случаев, наблюдаемых при проектировании стержневых систем на практике [2]. Свяжем с балкой систему координат x_i так, чтобы плоскость x_1x_2 ($x_3 = 0$) проходила через срединный слой стенки ($m = 0$).

В настоящем исследовании для простоты ограничимся случаем, когда поперечное сечение каждого слоя – прямоугольник с размерами $b_m \times h_m$, $-M^{(-)} \leq m \leq M^{(+)}$ (см. рис. 2, а), где b_m , h_m – ширина и толщина m -го слоя (в случае $m=0$ под $h_0 = 2h$ понимается высота стенки, а под b_0 – ее толщина).

Рассматривается случай, когда толщина несущих слоев (полок) существенно меньше высоты стенки, а ширина полок много больше толщины стенки, т.е.

$$h_m \ll h_0, \quad b_0 \ll b_m, \quad -M^{(-)} \leq m \leq M^{(+)}, \quad m \neq 0. \quad (1)$$

Кроме того, принимается допущение, что ширина полок не слишком велика, а сопоставима с высотой стенки

$$b_m \approx h_0 = 2h, \quad -M^{(-)} \leq m \leq M^{(+)}, \quad m \neq 0, \quad (2)$$

т.е. балка не является тонкостенным стержнем (последнее имеет место, например, при $b_m \gg h_0$, $-M^{(-)} \leq m \leq M^{(+)}$, $m \neq 0$). Соотношения (2) выполняются, в частности, для прокатных двуглавых профилей [5].

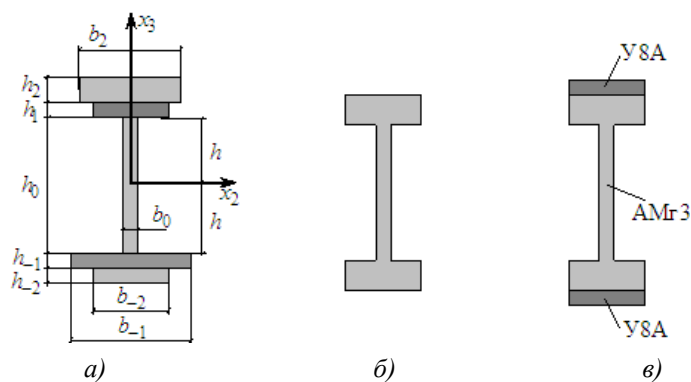


Рис. 2. Поперечные сечения слоистой балки: а) – произвольной пятислойной структуры; б) – двуглавой однородной; в) – двуглавой с усиливающими накладками

Предполагается: начальными деформациями можно пренебречь по сравнению с накопленными деформациями ползучести [3]; прогибы малы; температура конструкции однородна; материалы слоев одинаково сопротивляются растяжению и сжатию; решение задачи не зависит от переменной x_2 (т.е. изгиб в плоскости x_1x_2 и кручение стержня не рассматриваются).

Для описания ослабленного сопротивления стенки ($m = 0$) рассматриваемой слоистой балки поперечному сдвигу в плоскости x_1x_3 , согласно (1) и (2), используем гипотезу плоских сечений, не остающихся нормальными к изогнутой оси балки (теория Тимошенко [6]), т.е. для скоростей установившейся ползучести точек балки примем следующие аппроксимации

$$v_1(x_1, x_3) = v_1^0(x_1) - x_3\theta(x_1), \quad v_3(x_1, x_3) = v_3^0(x_1), \quad 0 \leq x_1 \leq L, \quad (3)$$

где v_3^0 – скорость прогиба; v_1^0 – скорость точек срединного слоя стенки ($x_3 = 0$) в продольном направлении x_1 ; θ – скорость угла поворота поперечного сечения балки вокруг оси x_2 .

Используя (3) и дифференциальные соотношения Коши [3, 6], получим выражения для скоростей деформаций установившейся ползучести

$$\xi_{11}(x_1, x_3) = \partial_1 v_1 = \partial_1 v_1^0(x_1) - x_3 \partial_1 \theta(x_1), \quad 0 \leq x_1 \leq L; \quad (4)$$

$$2\xi_{13}(x_1, x_3) = \partial_1 v_3 + \partial_3 v_1 = \partial_1 v_3^0(x_1) - \theta(x_1) = 2\xi_{13}^0(x_1), \quad 0 \leq x_1 \leq L, \quad (5)$$

где ∂_i – оператор дифференцирования по переменной x_i . Из последнего равенства (5) выразим θ и исключим его из (3), (4), тогда

$$v_1(x_1, x_3) = v_1^0(x_1) - x_3 \partial_1 v_3^0(x_1) + 2x_3 \xi_{13}^0(x_1), \quad 0 \leq x_1 \leq L; \quad (6)$$

$$\xi_{11}(x_1, x_3) = \partial_1 v_1^0(x_1) - x_3 \partial_1^2 v_3^0(x_1) + 2x_3 \partial_1 \xi_{13}^0(x_1), \quad 0 \leq x_1 \leq L. \quad (7)$$

Согласно (5), (7), в стенке ($m = 0$) реализуется плоское напряженное состояние (ПНС), а на основании (1), (2) в рамках теории Тимошенко с приемлемой для инженерных приложений точностью можно считать, что в несущих слоях (полках) реализуется одноосное напряженное состояние. При этом для слоев рассматриваемой балки будут справедливы следующие определяющие уравнения установившейся ползучести

$$\sigma_{11}^{(0)} = 3g_0(H)\xi_{11}, \quad \sigma_{13}^{(0)} = 2g_0(H)\xi_{13}^0, \quad H = \sqrt{3\xi_{11}^2 + 4(\xi_{13}^0)^2}, \quad |x_3| \leq h; \quad (8)$$

$$\sigma_{11}^{(m)} = g_m(\xi_{11})\xi_{11}, \quad H_{m-1} \leq x_3 < H_m, \quad 0 \leq x_1 \leq L, \quad -M^{(-)} \leq m \leq M^{(+)}, \quad m \neq 0, \quad (9)$$

где H_m – аппликата границы между m -м и $(m+1)$ -м слоями; g_m – известный секущий модуль материала m -го слоя ($m \neq 0$), определенный из экспериментальной зависимости $\sigma_{11} = g_m(\xi_{11})\xi_{11}$ при одноосном растяжении–сжатии в условиях установившейся ползучести; $g_0(H)$ – известная из эксперимента функция, являющаяся коэффициентом пропорциональности между интенсивностью скоростей деформаций сдвига H и интенсивностью касательных напряжений $T = g_0(H)H$, т.е. $g_0(H)$ – секущий модуль для материала стенки, работающей в условиях ПНС. Соотношения (8) получены как частный случай из общих определяющих уравнений [3] с учетом равенств $\xi_{12} = \xi_{23} = 0$ (так как в стенке $\sigma_{12}^{(0)} = \sigma_{23}^{(0)} = 0$) и $\xi_{22} \approx \xi_{33} \approx -\frac{1}{2}\xi_{11}$. Последние приближенные равенства являются следствием условия несжимаемости материала стенки, работающего в условиях установившейся ползучести ($\xi_{11} + \xi_{22} + \xi_{33} = 0$), а также равенства $\sigma_{22}^{(0)} = 0$ и статической гипотезы теории Тимошенко $|\sigma_{11}^{(0)}| \gg |\sigma_{33}^{(0)}|$ [6].

На основании соотношений (8), (9) с учетом (5), (7) вычислим все внутренние силовые факторы в балке

$$\begin{aligned} F_{11}(x_1) &= A_{11}\partial_1 v_1^0(x_1) - B_{11}\partial_1^2 v_3^0(x_1) + 2C_{11}\partial_1 \xi_{13}^0(x_1), \\ M_{11}(x_1) &= B_{11}\partial_1 v_1^0(x_1) - D_{11}\partial_1^2 v_3^0(x_1) + 2E_{11}\partial_1 \xi_{13}^0(x_1), \\ F_{13}(x_1) &= A_{55}\xi_{13}^0(x_1), \quad 0 \leq x_1 \leq L, \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} A_{11}(x_1) &= 3b_0 \int_{-h}^h g_0(H) dx_3 + \sum_{m=-M^{(-)}}^{M^{(+)}} (1 - \delta_{0m}) b_m h_m g_m(\xi_{11}^{(m)}), \\ B_{11}(x_1) &= C_{11}(x_1) = 3b_0 \int_{-h}^h g_0(H) x_3 dx_3 + \sum_{m=-M^{(-)}}^{M^{(+)}} \text{sign}(m) b_m h_m x_3^{(m)} g_m(\xi_{11}^{(m)}), \\ D_{11}(x_1) &= E_{11}(x_1) = 3b_0 \int_{-h}^h g_0(H) x_3^2 dx_3 + \sum_{m=-M^{(-)}}^{M^{(+)}} (1 - \delta_{0m}) b_m h_m (x_3^{(m)})^2 g_m(\xi_{11}^{(m)}), \\ A_{55}(x_1) &= 2b_0 \int_{-h}^h g_0(H) dx_3, \quad \xi_{11}^{(m)} = \xi_{11}(x_1, x_3^{(m)}), \quad -M^{(-)} \leq m \leq M^{(+)}, \quad m \neq 0; \end{aligned} \quad (11)$$

δ_{0m} – символ Кронекера; $x_3^{(m)}$ – аппликата центра тяжести поперечного сечения m -го слоя; F_{11} , F_{13} – продольная и поперечная сила соответственно; M_{11} – изгибающий момент. В равенствах (11) на основании (1) не учитывается изменяемость функций $\sigma_{11}^{(m)} x_3^k$ по переменной x_3 , т.е. приближенно принято $\sigma_{11}^{(m)}(x_1, x_3) x_3^k = \sigma_{11}^{(m)}(x_1, x_3^{(m)}) (x_3^{(m)})^k$, $H_{m-1} \leq x_3 < H_m$, $m \neq 0$, $k = 0, 1, 2$. В правых частях соотношений (10) для коэффициентов A_{11} , B_{11} и т.д. использованы те же обозначения, что и в [7] (см. там формулу (12)).

В силу ограниченности объема статьи в настоящем исследовании рассмотрим лишь изгибное деформирование статически определимых балок. При этом левые части в соотношениях (10) – известные функции переменной x_1 . Например, в случае равномерно нагруженной двухопорной балки (рис. 1, а) имеем [5]

$$F_{11}(x_1) \equiv 0, \quad F_{13}(x_1) = q(x_1 - L/2), \quad M_{11}(x_1) = qx_1(x_1 - L)/2, \quad 0 \leq x_1 \leq L; \quad (12)$$

в случае же равномерно нагруженной консольной балки (рис. 1, б) получаем

$$F_{11}(x_1) \equiv 0, \quad F_{13}(x_1) = q(x_1 - L), \quad M_{11}(x_1) = q(L - x_1)^2/2, \quad 0 \leq x_1 \leq L. \quad (13)$$

Дальнейший ход решения рассматриваемой задачи полностью совпадает с итерационным процессом, подробно описанным в [7], поэтому не будем более подробно останавливаться на обсуждении этого вопроса. Единственное отличие от [7] заключается в том, что согласно (3), (6) в заделке (см. рис. 1, б) выполняются следующие кинематические граничные условия (ср. с (21), (22) в [7]):

$$v_1^0(x_1) = 0, \quad v_3^0(x_1) = 0, \quad \partial_1 v_3^0(x_1) = 2\xi_{13}^0(x_1), \quad x_1 = 0. \quad (14)$$

В качестве конкретных примеров исследуем механическое поведение в условиях установившейся ползучести трех- и пятислойных однородных и металлокомпозитных балок, изображенных на рис. 1 и имеющих длину $L = 1$ м. Слои балок изготовлены из алюминиевого сплава АМгЗ или стали марки У8А.

Предполагается, что установившаяся ползучесть описывается степенным законом $\xi = A_m \sigma^{\mu_m}$. При этом секущие модули $g_0(H)$, $g_m(\xi_{11})$ в соотношениях (8), (9) определяются так [3]:

$$\begin{aligned} g_0(H) &= \bar{B}_0 H^{\eta_0 - 1}, \quad \eta_0 = \mu_0^{-1}, \quad \bar{B}_0 = B_0^{-\eta_0}, \quad B_0 = \sqrt{3^{\mu_0 + 1}} A_0, \\ g_m(\xi_{11}) &= \bar{B}_m \xi_{11}^{\eta_m - 1}, \quad \eta_m = \mu_m^{-1}, \quad \bar{B}_m = A_m^{-\eta_m}, \quad -M^{(-)} \leq m \leq M^{(+)}, \quad m \neq 0, \end{aligned}$$

где значения постоянных μ_m , A_m для материала m -го слоя ($-M^{(-)} \leq m \leq M^{(+)}$) при температуре $\Theta \approx 200$ °С приведены в таблице.

Табл. 1. Характеристики установившейся ползучести материалов слоев [8, 9]

Материал	μ	$A, (\text{МПа})^{-\mu} \cdot \text{ч}^{-1}$	$\rho, \text{кг/м}^3$
Алюминиевый сплав АМгЗ	6,045	$1,025 \cdot 10^{-14}$	2700
Сталь марки У8А	24,89	$1,054 \cdot 10^{-84}$	7800

На рис. 3 изображены эпюры скоростей прогибов ползучести $v_3^0(x_1)$ для трехслойных алюминиевых (кривые $1', 1''$), трехслойных стальных (линии $2', 2''$) и пятислойных металлокомпозитных (кривые $3', 3''$) двухопорных (рис. 3, а) и консольных (рис. 3, б) балок, рассчитанных при разных значениях распределенной нагрузки q с учетом соотношений (12), (13). Кривые, номера которых помечены одним штрихом, определены на основе теории Тимошенко, а двумя штрихами – на базе классической теории (в последнем случае в равенствах (5)–(7), (10), (14) следует принять $\xi_{13}^0(x_1) \equiv 0$.)

Размеры поперечных сечений трехслойных (рис. 2, б) однородных балок характеризуются значениями:

$$h_0 = 85,6 \text{ мм}, \quad b_0 = 4,5 \text{ мм}, \quad h_1 = h_{-1} = 7,2 \text{ мм}, \quad b_1 = b_{-1} = 55 \text{ мм}. \quad (15)$$

Эти данные соответствуют характерным значениям размеров двутаврового прокатного профиля № 10 [5].

Кривые $1', 1''$ и $2', 2''$ на рис. 3, а рассчитаны при уровне погонной поперечной нагрузки $q = 20 \text{ кН/м}$ и $q = 600 \text{ кН/м}$ соответственно. При этом точность расчета податливости по классической теории для алюминиевой балки (линии $1', 1''$) составляет 4,5 %, а для стальной балки (кривые $2', 2''$) – 1,8 %.

Кривые же $1', 1''$ и $2', 2''$ на рис. 3, б определены с учетом граничных условий (14) при $q = 5 \text{ кН/м}$ и $q = 150 \text{ кН/м}$ соответственно. В этом случае точность классической теории при вычислении скорости прогиба ползучести v_3^0 составляет 8 % для алюминиевой балки (линии $1', 1''$) и 20,6 % для стальной балки (кривые $2', 2''$). Следовательно, в случае консольной (рис. 1, б) двутавровой балки, выполненной даже из однородного материала, классическая теория не гарантирует традиционной 5 %-й инженерной точности определения податливости в условиях установившейся ползучести. Если же считать, что 20 %-я точность в расчетах на ползучесть вполне приемлема [3, 9], то, согласно поведению кривых $1', 1''$ и $2', 2''$ на рис. 3, с приемлемой точностью расчет

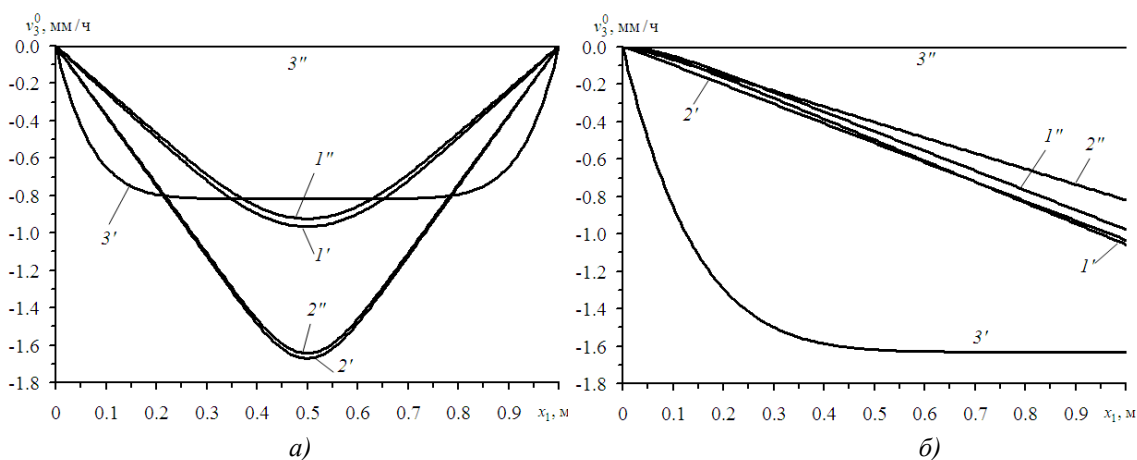


Рис. 3. Эпюры скорости прогиба установившейся ползучести балок: а) – шарнирно опертых; б) – консольных

установившейся ползучести изгибаемых однородных балок можно проводить на базе уравнений классической теории. Однако, как показывают дополнительные расчеты, при существенном увеличении размеров полков точность классической теории может стать неприемлемой.

Сравнение кривых $1'$ и $2'$ на рис. 3 демонстрирует, что при сопоставимой податливости в условиях установившейся ползучести стальные балки (линии $2'$) несут в 30 раз большую нагрузку, чем алюминиевые (кривые $1'$), при этом У8А-балки всего в 2,89 раза тяжелее алюминиевых (см. таблицу).

Поведение кривых $1'$, $1''$ и $2'$, $2''$ на рис. 3, *a* показывает, что в окрестности центральных сечений двухопорных балок (см. рис. 1, *a* при $x_1 = L/2$) в них реализуются напряженные состояния, близкие к вязко-ползучим шарнирам (особенно ярко это проявляется на кривых $2'$, $2''$ на рис. 3, *a*), а в случае консольных балок (рис. 3, *б*) аналогичное напряженное состояние возникает в окрестности заделки (см. рис. 1, *б* при $x_1 = 0$). Такое поведение эпюр скоростей прогибов ползучести вполне традиционно для однородных балок [3]. Однако в случае металлокомпозитных слоистых балок эти эпюры могут измениться не только количественно, но и качественно.

Действительно, рассмотрим поведение пятислойных ($M^{(\pm)} = 2$) металлокомпозитных конструкций, представляющих собой двутавровые алюминиевые балки прежних размеров (см. (15)), к полкам которых сверху и снизу присоединены стальные слои следующих поперечных размеров (поперечное сечение таких конструкций изображено на рис. 2, *в*): $h_2 = h_{-2} = h_1/2 = h_{-1}/2 = 3,6$ мм, $b_2 = b_{-2} = b_1 = b_{-1} = 55$ мм. Согласно таблице, масса таких металлокомпозитных конструкций на 97,2 % больше массы алюминиевых двутавровых балок.

Кривые $3'$, $3''$ на рис. 3 рассчитаны для указанных композитных конструкций при нагрузке $q = 40$ кН/м в случае двухопорной балки (рис. 3, *a*) и $q = 20$ кН/м в случае консольной балки (рис. 3, *б*). Линии $3''$ на рис. 3 визуально не отличаются от горизонтальных прямых, так как ординаты их точек на 19 и 13 порядков меньше ординат точек кривых $3'$ на рис. 3, *a* и 3, *б* соответственно. (При выборе соответствующих масштабов по осям ординат кривые $3''$ качественно выглядят подобно линиям $1''$.) Следовательно, согласно поведению кривых $3''$ на рис. 3, усиление алюминиевой двутавровой балки внешними стальными слоями приводит как бы к эффекту абсолютного армирования в том смысле, что классическая теория предсказывает практически полное отсутствие ползучести металлокомпозитных балок при заданных уровнях их нагружения. Однако поведение кривых $3'$, рассчитанных с учетом ослабленного сопротивления этих балок поперечным сдвигам, показывает, что металлокомпозитные конструкции все же ползут, причем достаточно активно. Из сравнения кривых $1'$ и $3'$ на рис. 3, *a* видно, что примерно при одинаковой податливости металлокомпозитная балка несет вдвое большую нагрузку, чем алюминиевая, т.е. действительно имеет место эффект армирования, но этот эффект не является абсолютным, как то предсказывает классическая теория.

Сравнение кривых $1'$ и $3'$ на рис. 3, *б* демонстрирует, что эпюра скорости прогиба ползучести металлокомпозитной консольной балки (линия $3'$) качественно отличается от аналогичной зависимости для однородной балки (кривая $1'$), в частности, линии $1'$ и $3'$ на рис. 3, *б* имеют кривизну разных знаков.

Поведение кривых $3'$ на рис. 3 показывает, что в металлокомпозитных балках возникают ярко выраженные краевые эффекты, которые не имеют места в однородных конструкциях (см. кривые $1'$ и $2'$). Эти краевые эффекты являются следствием того, что в условиях установившейся ползучести в окрестности опорных сечений в стенках металлокомпозитных балок активно развиваются скорости деформаций поперечных сдвигов, которые классическая теория не учитывает. Следовательно, при рациональном и оптимальном проектировании таких балок нужно не столько осуществлять целевое

управление геометрией и топологией несущих слоев – полок (как это делается в [2] на основе решений, полученных в рамках классической теории), сколько укреплять стенки слоистых конструкций в окрестности опорных сечений.

Таким образом, проведенный сравнительный анализ двух теорий деформирования в условиях установившейся ползучести изгибаемых слоистых балок нерегулярной структуры показывает, что классическая теория в случае металлокомпозитных конструкций может давать совершенно неприемлемые результаты расчетов их податливости, занижая ее на десятки порядков. Кроме того, классическая теория может приводить к неприемлемым результатам даже в случаях однородных металлических балок, имеющих достаточно широкие несущие слои (например, в случаях широких полок в балках двутаврового поперечного сечения). В силу этих обстоятельств для получения адекватных результатов расчетов изгибного деформирования слоистых балок, работающих в условиях установившейся ползучести, необходимо использовать неклассическую теорию Тимошенко, в рамках которой учитывается ослабленное сопротивление стенок таких балок поперечному сдвигу.

** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-00102-а).*

РЕЗЮМЕ

На основе гипотез теории Тимошенко сформулирована задача деформирования в условиях установившейся ползучести металлокомпозитных балок, состоящих из стенок и двух пакетов несущих слоев (полок). Исследовано механическое поведение шарнирно опертых и консольных балок. Показано, что даже для однородных двутавровых балок классическая теория не гарантирует получения надежных результатов по податливости в пределах 20 %-й точности, считающейся приемлемой при изучении деформирования металлоконструкций в условиях ползучести. В случаях же металлокомпозитных балок классическая теория становится вообще неприемлемой, так как занижает податливость таких конструкций в условиях установившейся ползучести на десятки порядков. Продемонстрировано, что для адекватного расчета металлокомпозитных слоистых балок нерегулярной структуры необходимо учитывать в их стенках наличие активно развивающихся скоростей деформаций поперечных сдвигов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каркаускас, Р.П. Строительная механика. Программы и решения задач на ЭВМ / Р.П. Каркаускас, А.А. Крутинис, Ю.Ю. Атчкюнас и др.; Под ред. А.А. Чираса. – М.: Стройиздат, 1990. – 360 с.
2. Немировский, Ю.В. Рациональное и оптимальное проектирование слоистых стержневых систем / Ю.В. Немировский, А.В. Мищенко, И.Т. Вохмянин. – Новосибирск: Изд-во НГАСУ, 2004. – 488 с.
3. Качанов, Л.М. Теория ползучести / Л.М. Качанов. – М.: Физматгиз, 1960. – 456 с.
4. Мищенко, А.В. Ползучесть однородных и слоистых рам на основе трехкомпонентной модели / А.В. Мищенко, Ю.В. Немировский // Изв. вузов. Строительство. – 2009. – № 5. – С. 16–24.
5. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов: учебник для втузов. – 9-е изд., перераб. / В.И. Феодосьев. – М.: Наука, 1986. – 512 с.
6. Васидзу, К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности / К. Васидзу. – М.: Мир, 1987. – 542 с.
7. Янковский, А.П. Исследование установившейся ползучести армированных металлокомпозитных балок-стенок с учетом ослабленного сопротивления поперечному

- сдвигу / А.П. Янковский // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2012. – Т. 18, № 3. – С. 301–319.
8. Композиционные материалы. Справочник / Под ред. Д.М. Карпиноса. – Киев: Наукова думка, 1985. – 592 с.
 9. Никитенко, А.Ф. Ползучесть и длительная прочность металлических материалов / А.Ф. Никитенко. – Новосибирск: НГАСУ, 1997. – 278 с.

SUMMARY

Based on the Timoshenko hypotheses the problem is formulated for the deformation in the conditions of steady-state creep of metal-composite beams, consisting of walls and two packets of bearing layers. Mechanical behavior of simply supported and cantilever beams was investigated. It is shown that even for a homogeneous double-T-shape-beams, the classical theory does not guarantee reliable results in compliance within 20 % accuracy, which is acceptable when studying the deformation of structures under creep conditions. In cases of metal-composite beams, the classical theory becomes unacceptable, as it lowers the slenderness of such constructions in conditions of steady creep on few tens orders of magnitude. It is demonstrated that presence of actively growing rates of shear strain in the walls necessary to allow for adequate calculation of the metal-composite laminated beams of irregular patterns.

E-mail: yankovsky_ap@rambler.ru
lab4nemir@rambler.ru

Поступила в редакцию 25.09.2015