

**УЧЕТ СДВИГОВОГО ЗАПАЗДЫВАНИЯ
СОГЛАСНО ТРЕБОВАНИЯМ ТКП EN
1993-1-5**

НАДОЛЬСКИЙ В. В., ДЕРГАЧЕВ М. Г.
Белорусский национальный технический
университет Минск, Беларусь

Введение. Возможны случаи, когда реальное распределение напряжений в двутавровой балке может значительно отличаться от теоретического, посчитанного по классической методике сопротивления материалов. Одна из причин – сдвиговое запаздывание. Результатом его влияния является неравномерное распределение напряжений в полках элементов. В статье рассмотрен механизм учета сдвигового запаздывания на примере двутавровой балки. Рассмотрено понятие эффективной ширины полки с учетом сдвигового запаздывания. Стоит отметить, что эффективная ширина элемента с учетом местной потери устойчивости не связана с эффективной шириной с учетом сдвигового запаздывания и определяется отдельно.

Впервые явление сдвигового запаздывания описал Т. Карман в 1924 году. Продолжили изучение этой темы С.П. Тимошенко и Дж. Гудьер, описав ее в своей книге «Теория Упругости». Упрощенный способ определения влияния сдвигового запаздывания приведен в ТКП EN 1993-1-5 [1].

В классической методике сопротивления материалов принято, что под действием изгибающего момента нормальные напряжения распределяются равномерно в поясах двутавровых балок (рис. 1).

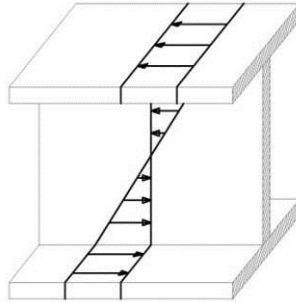


Рис. 1. Распределение нормальных напряжений по классической методике сопротивления материалов

Однако доказано, что в ряде случаев это не соответствует реальному распределению нормальных напряжений [2]. Фактически нормальные напряжения от изгибающего момента передаются на полки балки за счет деформаций сдвига в местах соединения со стенкой (рис. 2).

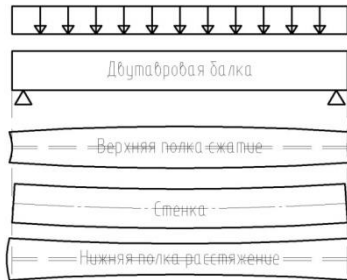


Рис. 2. Механизм деформаций сдвига в изгибаемой балке

Это приводит к деформациям полок балки в опорных зонах как показано на рис. 2. Верхняя полка, которая сжимается, будет становиться уже, в соответствии с коэффициентом Пуассона, а нижняя, растянутая – шире.

Если полки широкие, то эти деформации приведут к неравномерному распределению нормальных напряжений ввиду того, что наиболее удаленные от стенки волокна будут включаться в работу позднее, чем те, которые расположены ближе к центру. Соответственно они не будут полностью участвовать в сопротивлении

сечения, и балка будет работать хуже, чем в соответствии с классической методикой сопротивления материалов, при которой принято, что в работу включаются сразу все волокна полки. Это явление принято называть сдвиговым запаздыванием [2]. Графическое изображение этого явления приведено на рис. 3.



Рис. 3. Неравномерное распределение нормальных напряжений в полке балки в результате сдвигового запаздывания

В соответствии с [1] сдвиговое запаздывание учитывается путем редуцирования расчетной ширины полки. Отметим, что когда редуцирование вызвано сдвиговым запаздыванием, то в соответствии с [1] эффективная ширина обозначается индексом «S», что отличается от эффективной ширины с учетом потери местной устойчивости, обозначенной индексом «P». Сдвиговое запаздывание влияет и на сжатую полку, и на растянутую. Местная потеря устойчивости, в свою очередь, наблюдается только в сжатой полке. Оба явления должны учитываться при определении геометрических характеристик сечения, однако в данной статье рассматривается только влияние сдвигового запаздывания, соответственно индекс «S» далее упоминаться не будет.

Теоретические основы определения эффективной ширины с учетом сдвигового запаздывания. Согласно [1] для определения эффективной ширины для шарнирно опертой неразрезной балки предлагается достаточно простой способ, в соответствии с которым эффективная ширина (b_{eff}) полки определяется посредством коэффициента β :

$$b_{eff} = \beta b_0 \quad (1)$$

где b_0 – ширина свеса пояса или $1/2$ ширины для частей пояса с двухсторонней опорой.

Принцип определения β , описанный в [1], следует из уравнения совместности деформаций (условия Сен-Венана) [3]:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \gamma}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = 0, \quad (2)$$

где ε_x – продольные деформации;

ε_y – поперечные деформации;

γ – деформации сдвига.

Предполагается, что деформаций в поперечном направлении равняются нулю ($\varepsilon_y = 0$). Формула (2) принимает вид

$$\frac{\partial \varepsilon_x}{\partial y} - \frac{\partial \gamma}{\partial x} = 0. \quad (3)$$

Это упрощение позволяет определить функцию кручения, которая в свою очередь описывает реальное распределение напряжений с учетом сдвигового запаздывания (рис. 4) [4].

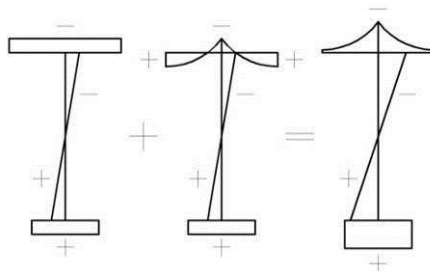


Рис. 4. Распределение напряжений с учетом сдвигового запаздывания:
 1 – распределение напряжений от изгиба; 2 – от деформаций сдвига;
 3 – от совместного действия изгиба и сдвига

Кроме того, для точного определения коэффициента β следует рассмотреть эпюру изгибающих моментов (рис. 5). Для шарнирно опертой неразрезной балки с консольным участком эпюра будет иметь следующий вид.

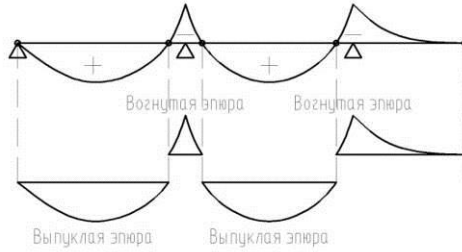


Рис. 5. Эпюра изгибающих моментов в шарнирно опертой неразрезной балке

Разделяя эпюру по смежным точкам, где значение моментов равняется нулю, получается серия однопролетных балок, для каждой из которых определяется коэффициент β [4]. Форма эпюры описывается коэффициентом ψ , выраженным через максимальный изгибающий момент и ее выпуклость:

$$\psi = 4 \frac{\Delta M}{M_{\max}}. \quad (4)$$

Этим коэффициентом можно описать каждую часть эпюры. Ниже указаны значения коэффициента для каждого отдельного случая

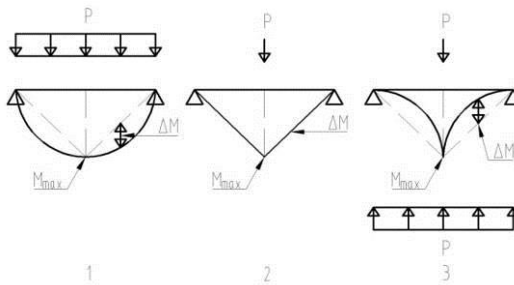


Рис. 6. Определение коэффициента ψ для каждой части эпюры

$$\Delta M = -\frac{M_{\max}}{4}, \text{ тогда } \psi = -1. \quad (5)$$

$$\Delta M = 0, \text{ тогда } \psi = 0. \quad (6)$$

$$\Delta M = \frac{M_{\max}}{4}, \text{ тогда } \psi = 1. \quad (7)$$

Параметр L_e определяет расстояние между двумя смежными точками на балке, где значение изгибающего момента равняется нулю, и, если нет продольных элементов жесткости, коэффициент k определяет только отношение b_0/L_e .

Решая дифференциальное уравнение (2) и принимая некоторые упрощения, в результате получается следующее выражение, которое зависит только от ширины полки b_0 , расстояния между точками нулевых моментов L_e и коэффициентом формы эпюры ψ [4]:

$$\beta = \frac{1}{1 + 4(1 + \psi) \frac{\alpha_0 b}{L_e} + 3,2(1 - \psi) \left(\frac{\alpha_0 b_0}{L_e}\right)^2}. \quad (8)$$

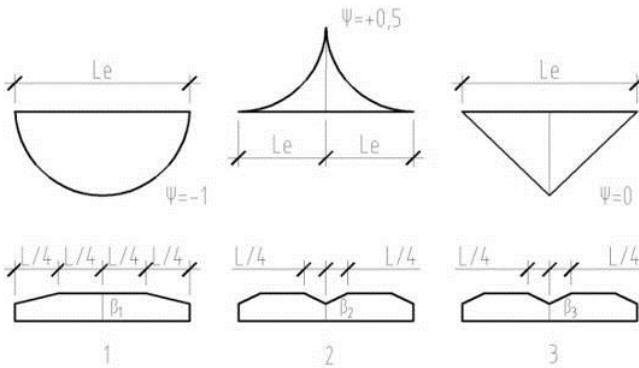


Рис. 7. Эффективная ширина для выпуклой, вогнутой и линейной эпюры изгибающих моментов

Используя формулу (8) и коэффициенты формы эпюры, в итоге получаются следующие формулы для определения коэффициента β :

Выпуклая эпюра:

$$\beta_1 = \frac{1}{1 + 6,4k^2}; \quad (9)$$

вогнутая эпюра:

$$\beta_2 = \frac{1}{1 + 6k + 1,6k^2}; \quad (10)$$

линейная эпюра:

$$\beta_3 = \frac{1}{1 + 4k + 3,2k^2}. \quad (11)$$

Расчет сдвигового запаздывания в соответствии с EN. Влияние сдвигового запаздывания может не учитываться, если выполняется условие $b_0 < L_e / 50$, где b_0 – ширина свеса полки или 1/2 ширины для частей пояса с двухсторонней опорой [5]. Длина L_e равна расстоянию между нулевыми точками действующих моментов.

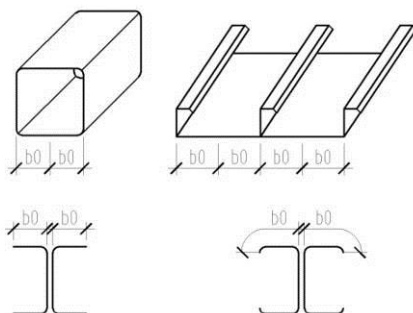


Рис. 8. К определению ширины свеса полки

В случае, если указанное условие не выполняется, то сдвиговое запаздывание должно быть учтено при оценке предельного состояния эксплуатационной пригодности и состояний, связанных с усталостью материала путем определения эффективной ширины. Эффективная ширина определяется в соответствии с формулой (1) и табл. 3.1 [1].

При оценке предельного состояния несущей способности сдвиговое запаздывание допускается учитывать одним из следующих способов [5].

Как сдвиговое запаздывание в упругой стадии определенное при оценке предельного состояния эксплуатационной пригодности и состояний, связанных с усталостью материала.

Как комбинация эффектов от сдвигового запаздывания и потери устойчивости пластины.

Как сдвиговое запаздывание при упругопластической стадии работы материала с ограничением пластических деформаций.

Стоит отметить, что комбинацию эффектов от сдвигового запаздывания и от потери устойчивости пластины допускается учитывать по формуле

$$A_{\text{eff}} = A_{\text{C,eff}} \beta_{\text{ult}}, \quad (12)$$

где $A_{\text{C,eff}}$ – эффективная площадь сжатого пояса при потере устойчивости пластины от действия нормальных напряжений;

β – коэффициент эффективной ширины сдвигового запаздывания в предельном состоянии несущей способности, который допускается принимать равным β согласно таблице 3.1 [1] с заменой α_0 на α_0^* :

$$\alpha_0^* = \sqrt{\frac{A_{\text{C,eff}}}{b_0 t_f}}. \quad (13)$$

Заключение. Сдвиговое запаздывание влияет на распределение внутренних усилий. Не только при определении несущей способности, но и при статических расчетах необходимо учитывать редуцирование поперечного сечения.

Доказано, что в балках с широкими полками значение напряжений не может быть определено только в соответствии с классической методикой сопротивления материалов, ввиду того, что распределение напряжений в полках неравномерно. Максимальное значение напряжений наблюдается в зоне стенки, минимальное – на краях полки. Неравномерное распределение напряжений описывается нелинейной функцией. Практический способ определения влияния сдвигового запаздывания приведен в [1] и базируется на понятии эффективной ширины.

Явление сдвигового запаздывания наблюдается в балках, в которых отношение ширины свеса полки к пролету не превышает 1/50.

Это означает, что влияние сдвигового запаздывания уменьшается по мере увеличения пролета балки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ТКП EN 1993-1-5–2009* (02250). Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1–5. Пластинчатые элементы конструкций (EN 1993-1-5:2006, EN 1993-1-5:2006/AC:2009, IDT). – Минск: Минстройархитектуры, 2014. – 51 с.
2. Sorensen R.K. Evaluation of shear lag in standard H-/I-sections / Ruben Krogh Sørensen. – Aalborg university esbjerg, 2013. – 64 с.
3. Szumigala M., Ciesielczyk K. Shear lag effect in the numerical experiment / Szumigala M, Ciesielczyk K – de gruyter, 2015. – 20 с.
4. Johansson B., Maquoi R., Sedlacek G., Müller C., Beg D. commentary and worked examples to EN 1993-1-5 "Plated structural elements" / B. Johansson, R. Maquoi, G. Sedlacek, C. Müller, D. Beg – Luxembourg: JRC Scientific and Technical Reports, 2007. – 228 с.
5. Dubina D. Design of Cold-formed Steel Structures / Dan Dubina, Viorel Ungureanu, Raffaele Landolfo. – Mem Martins: ECCS, 2012. – 654 с.

УДК 693.98

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА СБОРНО- МОНОЛИТНЫХ КАРКАСНЫХ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

ПЕНЯЗЬ М. А.

Белорусский национальный технический
университет Минск, Беларусь

Общие положения. Отличительной особенностью сборно-монолитных конструктивных систем является совместное использование различных элементов, которые различаются по жесткостным и прочностным характеристикам. В связи с этим, встает вопрос обеспечения их совместной работы при восприятии эксплуатационных и монтажных нагрузок. К сожалению, до настоящего времени очень часто встречаются случаи усиления монолитных