

УЧЕТ ЭФФЕКТА УПРОЧНЕНИЯ МАТЕРИАЛА В УГЛАХ БАЛОК ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

А. В. Омелюсик

Государственное научное учреждение «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель А. В. Шмелев

При испытаниях кузовов пассажирских транспортных средств на соответствие требованиям пассивной безопасности происходит динамическое нагружение верхней части конструкции с последующей деформацией боковых стоек и крыши. Как известно, для получения достоверных расчетов машиностроительных конструкций при динамическом нагружении необходимо проводить промежуточные верификационные расчеты их отдельных элементов [1], [2]. Такими элементами могут служить балки каркасов, сварные, клеевые, болтовые соединения и др. Как правило, для расчета выбирают наиболее нагруженные элементы. Следовательно, для разработки расчетно-экспериментальной методики оценки пассивной безопасности автобусов актуальным является проведение испытаний балок каркаса с последующими верификационными расчетами.

Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния балок проводилось путем трехточечного изгиба. В качестве образцов выступали 6 профилей $60 \times 40 \times 3$ и 6 профилей $50 \times 40 \times 3$, изготовленных из материала Сталь 20. Нагружение трех профилей из каждой группы проводилось вдоль широкой стороны поперечного сечения, остальных – вдоль узкой. Нагружение проводилось с помощью силового гидроцилиндра РЛ63М с заданным максимальным перемещением штока 100 мм с точностью измерения не менее 0,1 мм. В качестве регистрируемого параметра выступало усилие на штоке гидроцилиндра. Точность измерения усилия не менее 0,1 кН. На рис. 1 показана установка для испытаний.



Рис. 1. Установка для проведения испытаний балок на трехточечный изгиб

Компьютерное моделирование процесса деформирования балок осуществлялось в программном комплексе конечно-элементного анализа LS-DYNA. Параметры модели материала балки соответствуют идентифицированным параметрам полилинейной модели материала, полученным по результатам испытаний образцов Стали 20, изготовленных из балок каркаса. С целью упрощения процедуры расчетов опоры и движущийся палец (наконечник штока силового гидроцилиндра) моделировались как абсолютно жесткие тела, а во избежание нежелательного скольжения балки вдоль опор был задан коэффициент трения скольжения между трущимися поверхностями в размере 0,1. На рис. 2 представлена расчетная модель балки $60 \times 40 \times 3$ с элементами установки перед нагружением вдоль узкой стороны поперечного сечения.

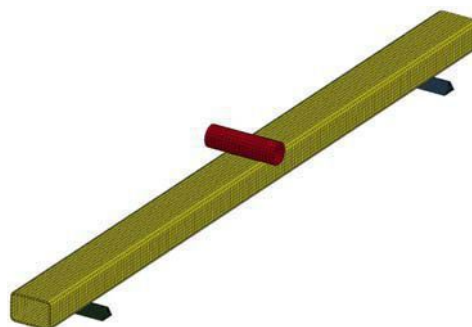


Рис. 2. Расчетная модель балки $60 \times 40 \times 3$ с элементами установки

По результатам экспериментальных и расчетных исследований получены зависимости усилий на штоке гидроцилиндра от его перемещения в процессе деформирования балок. Расчетные значения усилий оказались значительно меньше экспериментальных. Это говорит о том, что при обработке полученных данных следует учитывать технологию изготовления труб. При проведении холодной прокатки в углах труб возникает эффект упрочнения материала [3], так называемый наклеп. Эффект упрочнения происходит непосредственно в углах с охватом области плоских участков в размере двойной толщины стенки трубы [4]. На рис. 3 представлена схема распределения значений предела текучести по контуру сечения, где f_{yc} – предел текучести в углах; f_{yf} – предел текучести плоских участков.

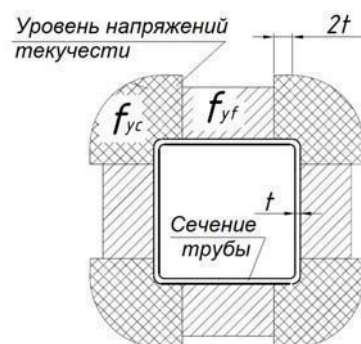


Рис. 3. Распределения значений предела текучести по контуру сечения [5]

В программных комплексах конечно-элементного анализа балки моделируются с одинаковыми механическими свойствами материала по всему сечению и длине.

Назначить другие свойства материала только в углах балки является проблематичным и трудоемким процессом, а значит существенно усложняет процесс исследования сложных конструкций. Поэтому возникает необходимость разработки эффективного способа учета данного эффекта при моделировании. Для учета эффекта упрочнения материала в углах балок авторами предлагается использовать условный предел текучести для всей балки, определяемый по следующей формуле:

$$\sigma_{T-i} = i_{уг-i} \cdot \sigma_{уг} + i_{пл-i} \cdot \sigma_{пл}, \quad (1)$$

где σ_{T-i} – условный предел текучести балки, используемый при моделировании изгиба относительно оси сечения i (x или y); $i_{уг-i}$ – доля момента инерции углов в общем моменте инерции поперечного сечения относительно оси i ; $\sigma_{уг}$ – предел текучести в углах; $i_{пл-i}$ – доля момента инерции плоских участков в общем моменте инерции поперечного сечения относительно оси i ; $\sigma_{пл}$ – предел текучести плоских участков, принимается по результатам испытаний образцов материалов.

Для определения предела текучести в углах труб $\sigma_{уг}$ используем уравнения, регламентированные государственным стандартом Австралии и Новой Зеландии (AS/NZS 4673) [6]:

$$f_{yc} = \frac{B_c f_{yf}}{(r_i / t)^m}; \quad B_c = 1,486 \left(\frac{f_{uf}}{f_{yf}} \right) - 0,21 \left(\frac{f_{uf}}{f_{yf}} \right)^2 - 0,128; \quad m = 0,123 \left(\frac{f_{uf}}{f_{yf}} \right) - 0,068,$$

где f_{yc} – предел текучести в углах труб; f_{yf} – предел текучести плоских участков; f_{uf} – предел прочности плоских участков; r_i – внутренний радиус угла; t – толщина стенки; B_c и m – эмпирические коэффициенты.

Определив по формуле (1) значения σ_{T-i} , путем пропорционального изменения параметров напряжений разработана условная модель материала Сталь 20. Параметры деформаций остаются неизменными. По разработанной условной модели проведен повторный расчет процесса деформирования балок. Результаты расчета показали, что погрешность по максимальному усилию при нагружении вдоль узкой стороны поперечного сечения и вдоль широкой стороны для балок $50 \times 40 \times 3$ и $60 \times 40 \times 3$ составила 11,7, 8,5 и 1,1 %, 3,5 %, соответственно, по сравнению с 27,9, 28,6 и 17,0, 24,0 % при расчете без учета эффекта упрочнения. Таким образом, повышение точности моделирования за счет учета эффекта упрочнения материала в углах труб подтверждает правомерность его использования при расчете сложных каркасных конструкций.

Литература

1. Vincze-Pap, S. Applied virtual (VT) technology on bus superstructure roll-over tests / S. Vincze-Pap, A. Csiszár // Design, Fabrication and Economy of Metal Structures : International Conference Proceedings 2013, Miskolc, Hungary, April 24–26, 2013. – Pp. 551–560.
2. Guler, M. A. The influence of seat structure and passenger weight on the rollover crashworthiness of an intercity coach / M. A. Guler, K. Elitok, B. Bayram, U. Stelzmann // International Journal of Crashworthiness. – 2007. – Vol. 12, Issue 6. – Pp. 567–580.
3. Глушечков, В. А. Упрочнение металлов в обработке металлов давлением : электрон. учеб. пособие / В. А. Глушечков. – Самара, 2010. – 33 с.
4. Ashraf, M. Strength enhancement of the corner regions of stainless steel cross-sections / M. Ashraf, L. Gardner, D. A. Nethercot // Journal of Constructional Steel Research. – 2005. – Vol. 61, Issue 1. – Pp. 37–52.
5. Рогов, П. С. Разработка методики обеспечения пассивной безопасности кузовов автобусов в условиях опрокидывания при проектировании : дис. ... канд. тех. наук : 05.05.03 / Рогов Петр Сергеевич. – Н. Новгород, 2015. – 189 с.
6. Australian/New Zealand Standard of the Australia/New Zealand «Cold-formed stainless steel structures» of 2001 Volume AS/NZS 4673:2001.