



КОМПЬЮТЕРНАЯ МЕХАНИКА

УДК 620.172.251.22.001.57

А.В. ОМЕЛЮСИК

младший научный сотрудник отдела моделирования и виртуальных испытаний Республиканского компьютерного центра машиностроительного профиля¹

E-mail: alexlifting@mail.ru

А.В. ШМЕЛЕВ, канд. техн. наук

директор Республиканского компьютерного центра машиностроительного профиля¹

E-mail: shmeliiov.alexexi@gmail.com

А.Г. КОНОНОВ, канд. физ.-мат. наук

старший научный сотрудник Центра структурных исследований и трибо-механических испытаний материалов и изделий машиностроения¹

E-mail: a_g_kononov@mail.ru

А.В. РУБЦОВ

заведующий лабораторией прочности²

E-mail: aleks_rubtsov@mail.ru

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

²ОАО «МАЗ» — управляющая компания холдинга «БЕЛАВТОМАЗ», г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 03.05.2017.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОЛИЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ МАТЕРИАЛА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ БАЛОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МАШИН

Статья посвящена определению параметров полилинейной модели упруго-пластического деформирования металлов, используемой при расчете напряженно-деформированного состояния и прогнозировании разрушений машиностроительных конструкций. Предложенная методика идентификации параметров полилинейной модели металлов включает переход от условных (инженерных) значений напряжений и деформаций к истинным. Отличительной особенностью методики является учет напряженно-деформированного состояния в шейке образца и рекомендации к определению промежуточных параметров модели материала. С целью апробации разработанной методики в программном комплексе ANSYS LS-DYNA проведено компьютерное моделирование испытаний плоских образцов на растяжение. В расчете использованы идентифицированные параметры модели для стали 20. Погрешность моделирования, вычисленная по величине относительного удлинения образца в момент разрушения, составила 1,8 %. Полученные параметры модели были также использованы при моделировании трехточечного изгиба балок прямоугольного сечения 60×40×3 мм из стали 20. Сопоставление результатов расчета с данными эксперимента показали отличие контрольных значений изгибающих усилий до 17 %. Такое отличие вызвано упрочнением материала в углах поперечного сечения балок. Предложен способ учета данного эффекта на основе пересчета инерционных характеристик поперечного сечения. Это позволило снизить различие расчетных результатов от экспериментальных до 1,1 %.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, модель материала, идентификация, механические характеристики, испытание, метод конечных элементов, LS-DYNA

Введение. При разработке и совершенствовании несущих конструкций машин по критериям прочности и жесткости все более широкое применение на практике получают программные средства компьютерного моделирования процессов, основанные на применении метода конечных элементов как в явной, так и в неявной постановке. В последнем случае речь идет, как правило, о моделировании быстропротекающих динамических процессов или же так называемых краш-тестов. Важным условием достоверного виртуального воспроизведения подобных динамических процессов является определение и присвоение для исследуемой модели конструкции свойств материалов, учитывающих основные особенности упруго-пластического деформирования, вплоть до наступления разрушения. С этой целью разрабатываются соответствующие модели материалов, описывающие на основе математических зависимостей упруго-пластическое поведение упрочняющегося материала при приложении внешнего силового воздействия.

Одной из актуальных машиностроительных задач является обеспечение прочности каркасов пассажирских транспортных средств. Правилами ЕЭК ООН № 66 описывается режим испытаний таких конструкций, который включает опрокидывание полнокомплектного транспортного средства с высоты 0,8 м. В результате динамического нагружения происходит пластическое деформирование элементов конструкции каркаса (оконных стоек), представленных, как правило, металлическими балками прямоугольного сечения. По результатам испытаний на основании измерений величины перемещения элементов каркаса делается заключение о соответствии его конструкции нормативным требованиям. При этом нормативом допускается замена натуральных испытаний виртуальными при выполнении ряда условий, оговоренных в документе.

Для эффективного применения компьютерного моделирования таких процессов на практике необходимо наличие методического обеспечения, описывающего процедуры идентификации параметров модели конкретного исследуемого материала по результатам традиционных экспериментов по определению механических свойств материала с применением универсального испытательного оборудования. Например, работы [1–3] посвящены определению параметров моделей упруго-пластического деформирования материалов, однако в них не приводится и не раскрывается процедура определения параметров по результатам натуральных испытаний образцов материала. В работах [4, 5] проводится определение параметров на основе испытаний образцов материалов, но без учета особенностей деформации образца после достижения их временного сопротивления и с произвольным выбором промежуточных точек модели из диаграммы растяжения. Кроме того, исследо-

вания процессов пластического деформирования элементов конструкций, например металлических балок при изгибе [5–8], показывают необходимость учета технологии изготовления, вызывающей упрочнение металла в углах сечения балок.

Таким образом, актуальной является разработка методики идентификации параметров моделей металлических материалов и подходов к моделированию процессов пластического деформирования балок, которые позволят упорядочить и упростить процедуру подготовки исходных данных, а также повысить достоверность проведения расчетных исследований конструкций с использованием экспериментально определенных характеристик материалов и элементов конструкций.

Идентификация параметров полилинейной модели материала по результатам экспериментальных исследований. В современных программных комплексах для расчетной оценки напряженно-деформированного состояния конструкций в большинстве случаев используется метод конечных элементов [9, 10]. Таким образом результаты расчетов представляются в виде распределения по конструкции истинных значений напряжений и деформаций. Результаты же испытаний образцов материалов и элементов конструкций принято описывать с использованием инженерных или «условных» показателей. Поэтому при обработке экспериментальных данных с целью дальнейшего их применения в расчетах необходимо перейти от условных деформаций и напряжений к истинным. В результате пересчета по методикам [4, 5] получаются параметры, не учитывающие факт локального образования шейки, активное формирование которой происходит на участке от предела прочности до момента разрушения. Для устранения данного недостатка предлагаются параметры для нелинейной модели материала идентифицировать по трем характерным точкам. Каждая точка определяется величинами пластической деформации и напряжения, представленных истинными значениями. В наиболее общем виде диаграмма деформирования может быть представлена полилинейной моделью материала, состоящей из нескольких параметров истинных деформаций и соответствующих им значений истинных напряжений.

1. Упругий участок диаграммы. Первым параметром является точка, соответствующая значению предела текучести материала:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_T; \\ \varepsilon_1 &= 0.\end{aligned}\quad (1)$$

2. Участок пластического упрочнения. Определяемым параметром предлагается использовать значение, соответствующее временному сопротивлению и началу образования шейки. Для данного параметра определяют истинные значения напряжения и деформации [11]:

$$\begin{aligned} \sigma_2 &= \sigma_B (1 + \delta_B); \\ \varepsilon_2 &= \ln(1 + \delta_B) - \frac{\sigma_2}{E}, \end{aligned} \quad (2)$$

где σ_B — временное сопротивление, полученное в эксперименте; E — Модуль Юнга, полученный в эксперименте; δ_B — инженерные деформации образца, соответствующие временному сопротивлению, полученные в эксперименте.

3. Участок образования шейки. Шейка образуется вплоть до разрушения образца, поэтому в качестве третьего параметра рекомендуется использовать точку диаграммы со значением рассматриваемых величин в момент разрушения [12]:

$$\begin{aligned} \sigma_3 &= \frac{\sigma_k}{\left[\sqrt{1 + \frac{R}{h}} \ln \left(\frac{\sqrt{1 + \frac{R}{h}} + 1}{\sqrt{1 + \frac{R}{h}} - 1} \right) - 1 \right]}; \\ \varepsilon_3 &= \ln \left(\frac{1}{1 - \psi} \right) - \frac{\sigma_3}{E}, \end{aligned} \quad (3)$$

где σ_k — среднее нормальное напряжение в наименьшем сечении образца при разрушении; h — половина ширины в наименьшем поперечном сечении шейки; R — радиус кривизны контура шейки в точке наименьшего поперечного сечения.

Среднее нормальное напряжение в момент разрыва образца определяется по формуле:

$$\sigma_k = \frac{P_{\max}}{A_k},$$

где P_{\max} — нагрузка в момент разрушения; A_k — площадь наименьшего сечения образца в момент разрушения.

Радиус кривизны контура шейки в точке наименьшего поперечного сечения R может быть определен графическим способом. Для этого фото разрушившегося образца (вид сбоку), сделанное в достаточно хорошем качестве (рекомендуемое значение точек на дюйм не менее 96, сделанное в режиме макросъемки), обрабатывается в редакторе изображений с целью получения более контрастного изображения, на котором будут четко видны конуры образца. Полученное таким образом фотоизображение образца импортируется в компьютерную программу для определения относительных геометрических размеров образца. Абсолютная величина одного из размеров, например ширина наименьшего поперечного сечения шейки, находится путем прямого измерения при помощи измерительного инструмента. Незвестный параметр, которым является радиус кривизны шейки, находится на основании составленной пропорциональной зависимости.

Для создания сглаженной кривой растяжения на участке от предела текучести до временного сопротивления определяются промежуточные

точки. Предлагается использовать следующую формулу для определения промежуточных точек диаграммы:

$$\delta_i = \frac{\delta_B - \delta_T}{n + 1} + \delta_{i-1} \quad \text{при } \delta_0 = \delta_T, \quad (4)$$

где δ_i — значение деформации i -й промежуточной точки диаграммы; δ_{i-1} — значение деформации для точки, предшествующей i -й; δ_T — значение деформации образца при достижении предела текучести; n — количество промежуточных точек.

Значения напряжений, соответствующие конкретным δ_i , определяются по экспериментальной диаграмме растяжения, представленной условными значениями. На рисунке 1 представлено пояснение к определению промежуточных точек диаграммы с использованием зависимости (4), где параметром a определено одинаковое значение разности между параметрами.

Пересчет инженерных значений напряжения и деформации в истинные производится по формулам (2). Зависимость (4) обеспечивает равноудаленность промежуточных точек друг от друга на кривой растяжения, тем самым способствуя повышению точности результатов расчета путем учета характера изгиба кривой деформирования.

Идентификация параметров полилинейной модели для стали 20. С целью определения фактической диаграммы деформирования материала были проведены испытания плоских образцов стали 20, полученных из балок профиля 50×40×3 (ГОСТ 8645-68). Выбор стали 20 в качестве исследуемого материала обусловлен тем, что балки данного типоразмера и материала получили широкое распространение при изготовлении каркасов автобусов.

Испытания по определению механических свойств проводились на универсальной гидравлической испытательной машине INSTRON Satec 300LX. Погрешность измерения нагрузки не превышает 0,5 % от измеряемого значения. Для регистрации деформаций образца использовался экстензометр INSTRON 2630-107 GL25MM, погрешность измерения которого не более 0,1 %. Фрагмент процесса испытаний приведен на рисунке 2.

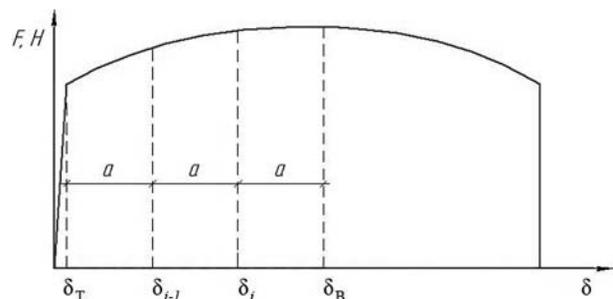


Рисунок 1 — Схема определения промежуточных параметров модели деформирования материала

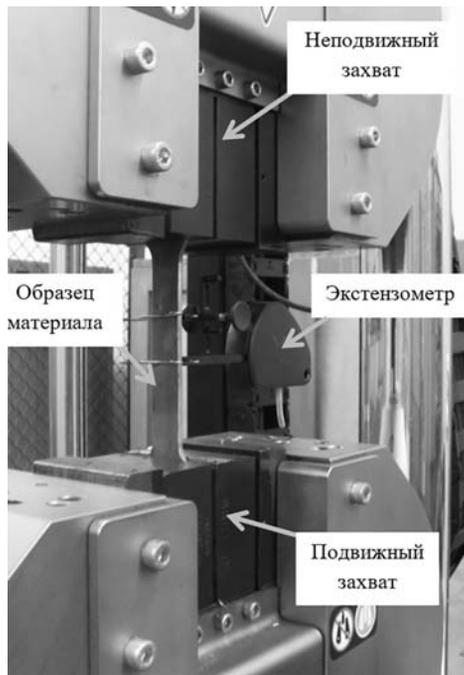


Рисунок 2 — Процесс испытаний по определению механических характеристик стали 20 (приложение нагрузки, измерение деформаций)

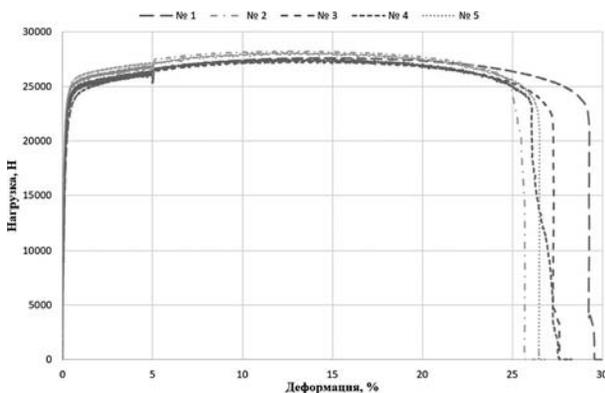


Рисунок 3 — Результаты механических испытаний образцов стали 20

Результаты испытаний в виде диаграмм растяжения образцов представлены на рисунке 3. Номер кривой на диаграмме соответствует номеру испытанного образца.

Измеренные значения механических характеристик материала, среднее значение \bar{x} и сред-

Таблица 1 — Результаты обработки измеренных значений механических характеристик стали 20

№ образца	Модуль Юнга, МПа	Предел текучести 0,2 %, МПа	Предел прочности, МПа	Деформация при пределе прочности, %	Удлинение при разрыве, %
1	210388	362	445	14,3	29,3
2	212388	410	463	13,1	25,7
3	211900	388	455	13,8	27,3
4	213642	396	461	13,0	26,5
5	213974	403	469	11,9	26,5
\bar{x}	212458	392	459	13,2	27,1
S	1440,6	18,6	9,1	0,9	1,4

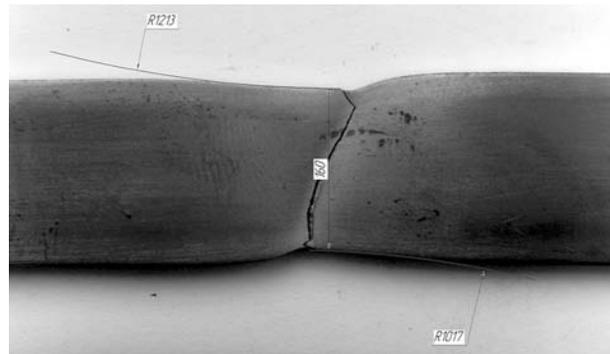


Рисунок 4 — Пример графического определения радиуса кривизны контура шейки образца № 5

неквадратичное отклонение S измеренных величин представлены в таблице 1.

Таким образом, по результатам эксперимента были получены значения изменения усилий, условной деформации, условных напряжений и перемещений.

Параметры модели материала определялись с использованием предложенных методических рекомендаций по зависимостям (1)–(4). На рисунке 4 приведен пример процедуры определения относительного значения радиуса кривизны контура шейки с применением вышеописанного графического способа. Так как линия разрыва образцов проходит под углом к перпендикуляру продольной оси образцов, то замер радиуса проводится с обеих сторон образца на явно выраженной зоне сужения большего радиуса.

Абсолютное среднее значение определено с помощью составленной пропорциональной зависимости:

$$\frac{2h}{160} = \frac{R}{\left(\frac{1213+1017}{2}\right)}; R = \frac{1117,5}{160} \cdot 2h = 6,984 \cdot 2h.$$

Обозначение h принято из формулы (3) как половина ширины образца в наименьшем поперечном сечении шейки, следовательно, $2h$ — полная ширина поперечного сечения шейки.

Результаты идентификации параметров модели материала для стали 20 представлены в таблице 2.

Компьютерное моделирование натурального эксперимента. В программном комплексе конечно-

Таблица 2 — Идентифицированные параметры стали 20

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8*
ϵ_i	0	0,026	0,047	0,071	0,094	0,122	0,712	0,8
σ_p , МПа	392	442	463	485	501	519	759	759

Примечания: * — восьмая точка задавалась для возможности продолжения решения по достижению предельной деформации



Рисунок 5 — Конечно-элементная модель образца

элементного анализа ANSYS LS-DYNA PC была разработана объемная конечно-элементная модель реального образца, которая приведена на рисунке 5. Геометрические размеры модели соответствуют номинальным значениям размеров образца.

Модель образца разрабатывалась с использованием системного компонента ANSYS Explicit Dynamics (LS-DYNA Export). Конечно-элементная сетка на захватных участках и рабочей части генерировалась гексогональными элементами с размером грани порядка 1 мм. Сетка на переходных участках, имеющих закругления, состоит преимущественно из гексогональных элементов с тетрагональными в переходных зонах. Конечно-элементная модель образца из ANSYS Explicit Dynamics (LS-DYNA Export) в формате *k*-файла передавалась в программу пре/пост-процессор LS-PrePost. В приложении LS-PrePost модели образца присваивалась модель материала *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (024) с параметрами, приведенными в таблице 2. В качестве критерия разрушения принималась эквивалентная пластическая деформация величиной 0,712, значение которой определено по формуле (3).

Начальные и граничные условия соответствовали проведенным натурным испытаниям. Одна из захватных частей образца фиксировалась, а другой задавалось перемещение вдоль оси образца, тем самым вызывая его растяжение. В качестве регистрируемого параметра выступала реактивная составляющая усилий в узлах заделки в зависимости от перемещения захватной части образца.

Сопоставление результатов эксперимента и моделирования испытаний образцов. Оценка достоверности определения параметров модели материала выполняется по соответствию зависимости нагрузки, возникающей в результате реактивного действия, от относительной деформации образца,

т. е. выполняется переход к условным характеристикам материала, регистрируемым в ходе эксперимента. Полученные в результате расчета усилия соответствуют номинальным размерам образца. В связи с этим для учета фактических размеров конкретного образца предлагается умножить их на коэффициент площади поперечного сечения k_A , определяемый по формуле:

$$k_A = \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_n}{A_{ном}}$$

где A_i — фактическая площадь поперечного сечения i -го образца до испытаний; $A_{ном}$ — номинальная площадь сечения, принятая в расчете.

На рисунке 6 приведено графическое сопоставление экспериментальных и расчетных данных для модели образца. Для наглядности сравнения отображены только диаграммы для образцов с наиболее отличающимися значениями относительного удлинения в момент разрушения.

В расчетной модели в ходе эксперимента разрушение образца происходит с середины наименьшего поперечного сечения шейки, что говорит о качественном соответствии процесса деформирования, корректности выбора критерия разрушения материала и возможности достоверного описания моделируемых физических процессов программным комплексом ANSYS LS-DYNA.

Так как в расчете принимались средние значения механических характеристик материалов, то результаты сопоставления расчетной и экспериментальных диаграмм деформирования оценивались по объективным параметрам: предел прочности и удлинение образца в момент разрушения. Расчетное значение предела прочности составило 459 МПа, что соответствует среднему экспериментальному значению. Удлинение в момент разрушения составило 26,6 %, погрешность по сравнению со средним экспериментальным значением — 1,8 %.

Следует отметить, что расчетная кривая деформирования проходит по середине образованной группы экспериментальных кривых. Этот факт подтверждает принятые средние значения

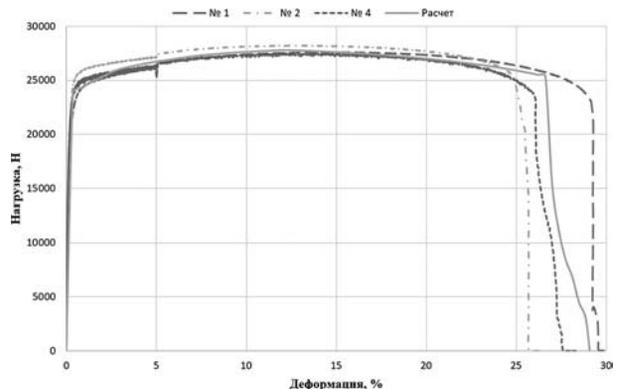


Рисунок 6 — Расчетные и экспериментальные диаграммы растяжения образцов стали 20

механических характеристик и достаточную точность расчета. Согласно разработанному подходу могут быть определены параметры модели материала, соответствующие заданной вероятности обеспечения интересующих характеристик.

Результаты виртуального моделирования испытаний плоских образцов стали 20 показывают высокую сходимость с результатами натурных экспериментов. Погрешность расчета по удлинению образца в момент разрушения не превышает 1,8 %, предел прочности имеет полное совпадение с экспериментом с точностью до 1 МПа. Предложенный подход отбора значений деформаций и напряжений для определения промежуточных параметров модели материала от предела текучести до временного сопротивления позволил синтезировать более сглаженную расчетную диаграмму деформирования.

Применение полученных параметров модели материала при моделировании пластического деформирования балок прямоугольного сечения. Основная цель определения параметров модели материала — применение полученных данных при расчете проектируемых и совершенствуемых конструкций и, в частности, каркаса автобуса. Поэтому далее проведем апробацию разрабатываемых подходов на более сложных конструкциях. Подобные дополнительные исследования необходимы для подтверждения достоверности использования предлагаемых методических рекомендаций при оценке прочностных свойств полнокомплектных несущих конструкций автотранспортных средств. С этой целью были проведены испытания на трехточечный изгиб балок прямоугольного сечения $60 \times 40 \times 3$ (ГОСТ 8645-68), изготовленных из стали 20, с последующим компьютерным моделированием испытаний.

Нагружение проводилось с помощью силового гидроцилиндра PL63M с точностью измерения перемещения не менее 0,1 мм. Скорость перемещения штока 1 мм/с. В качестве регистрируемого параметра выступало усилие на штоке гидроцилиндра. Точность измерения усилия не менее 0,1 кН. Экспериментальная установка изображена на рисунке 7. Нагружение осуществлялось до достижения перемещения штока силового гидроцилиндра 100 мм.

Компьютерное моделирование процесса деформирования балок проведено в программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS LS-DYNA. Параметры модели материала балки соответствуют идентифицированным параметрам модели стали 20 (см. таблицу 2). Для упрощения виртуального эксперимента опоры и силовой 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 вели-

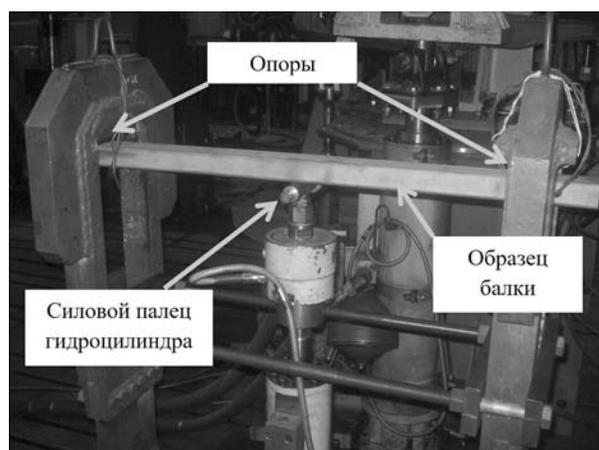


Рисунок 7 — Установка для проведения испытаний балок на трехточечный изгиб



Рисунок 8 — Расчетная объемная модель балки $60 \times 40 \times 3$ с элементами установки перед нагружением

чиной 0,1. На рисунке 8 представлена расчетная твердотельная модель балки $60 \times 40 \times 3$ с элементами установки перед началом нагружения.

По результатам экспериментальных и расчетных исследований получены зависимости усилий на штоке гидроцилиндра от его перемещения в процессе деформирования балок. Однако при обработке полученных данных следует учитывать технологию изготовления труб. При проведении холодной прокатки в углах труб возникает эффект упрочнения материала [6], так называемый наклеп. Эффект упрочнения происходит непосредственно в углах с охватом области плоских участков в размере двойной толщины стенки трубы [7]. На рисунке 9 представлена схема распределения значений предела текучести по контуру сечения, где f_{yc} — предел текучести в углах, f_{yf} — предел текучести плоских участков.

В программных комплексах конечно-элементного анализа балки моделируются как цельные детали с определенными механическими свойствами материала. Назначить другие свойства материала только в углах балки является проблематичным и трудоемким процессом, а значит, усложняет процесс исследования сложных многокомпонентных конструкций. Поэтому возникает необходимость разработки эффективной методики учета данного эффекта при моделировании. Для учета эффекта упрочнения материала в углах балок предлагается использовать условный предел

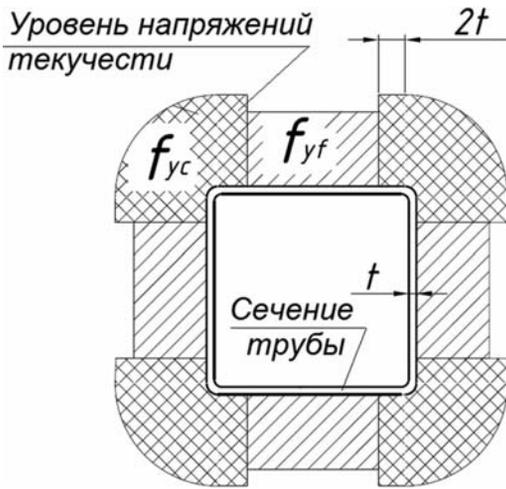


Рисунок 9 — Картина распределения значений предела текучести по контуру сечения [5]

текучести для всей балки, определяемый следующим выражением:

$$\sigma_{T-i} = i_{yf-i} \cdot \sigma_{yf} + i_{пл-i} \cdot \sigma_{пл}, \quad (5)$$

где σ_{T-i} — условный предел текучести балки, используемый при моделировании изгиба относительно оси сечения i ; i_{yf-i} — доля момента инерции углов в общем моменте инерции поперечного сечения относительно оси i ; σ_{yf} — 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 σ_{yf} используем уравнения, регламентированные государственным стандартом Австралии и Новой Зеландии (AS/NZS 4673) [13]:

$$f_{yc} = \frac{B_c f_{yf}}{(r_i/t)^m}; \quad (6)$$

$$B_c = 1,486 \left(\frac{f_{uf}}{f_{yf}} \right) - 0,21 \left(\frac{f_{uf}}{f_{yf}} \right)^2 - 0,128; \quad (7)$$

$$m = 0,123 \left(\frac{f_{uf}}{f_{yf}} \right) - 0,068, \quad (8)$$

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.

Определение момента инерции поперечного сечения исследуемых балок выполнено в программе для работы с геометрией модели (CAD-приложение). Определив по формуле (5) значения σ_{T-i} , путем пропорционального изменения параметров напряжений определены условные параметры модели для стали 20. Параметры деформаций остаются неизменными. По установленным условным

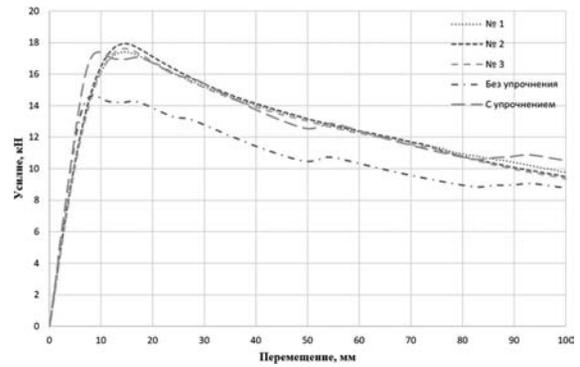


Рисунок 10 — Зависимости усилия от перемещения при натуральных и виртуальных испытаниях балки 60×40×3 из стали 20

параметрам модели проведен повторный расчет процесса деформирования балок. На рисунке 10 представлены зависимости усилий от перемещений для исследуемых балок, полученных в результате эксперимента и расчета с учетом эффекта упрочнения в углах и без него. Номер кривой соответствует номеру испытанной балки.

При максимальном значении усилия в эксперименте, равном 17,6 кН, погрешность расчета без учета эффекта упрочнения составила 17,0 %, с учетом эффекта — 1,1 %. При сопоставлении экспериментальное значение усилия принималось по образцу, занимающему промежуточное значение между двумя другими образцами.

Повышение точности моделирования за счет учета эффекта упрочнения материала в углах труб подтверждает правомерность его использования при расчете сложных каркасных конструкций. Причинами погрешности расчета процесса деформирования балки 60×40×3 могут служить разброс результатов испытаний образцов стали 20 (см. таблицу 1), допуск на размеры изделия и время нахождения изделия в эксплуатации. Также в работе [9] отмечено, что зависимости (6)–(8) предполагают расхождение результатов расчета и эксперимента в пределах 15 % для различных марок сталей.

Таким образом, с учетом идентифицированных параметров полилинейной модели материала и вышеизложенной методики учета эффекта упрочнения материала в углах тонкостенных труб погрешность расчета по максимальному усилию для балки 60×40×3 составила 1,1 %, что говорит о достоверности и эффективности использования предложенного подхода.

Заключение. Разработанная методика идентификации параметров моделей материалов может успешно использоваться при компьютерном моделировании процессов пластического деформирования и разрушения машиностроительных конструкций. При расчете конструкций балочного типа дополнительно может быть использован предложенный способ учета эффекта упрочнения материала в углах труб, что существенно повышает точность их расчетов на изгиб.

Список литературы

1. Hao, S. Computer implementation of damage models by finite element and meshfree methods / Su Hao, Wing Kam Liu, Chin Tang Chang // *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* — 2000. — Vol. 187. — Pp. 401–440.
2. Nurhadi, I. Computer modeling of energy absorbing capability of bus superstructure for rollover safety / I. Nurhadi, R. Zain, S. Miharadi // *Journal of KONES Powertrain and Transport.* — 2011. — Vol. 18, No. 2. — Pp. 331–338.
3. Экспериментальная верификация моделей деформационного поведения и высокоскоростного разрушения титанового сплава ВТ6 / М.Ш. Нихамкин [и др.] // *Изв. Самарского научного центра РАН.* — 2011. — Т. 13, № 4(4). — С. 991–997.
4. Ващури, А.С. Разработка методики и оценка пассивной безопасности кузовов из многослойных панелей вахтовых автобусов: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / А.С. Ващури. — Нижний Новгород, 2014. — 225 л.
5. Рогов, П.С. Разработка методики обеспечения пассивной безопасности кузовов автобусов в условиях опрокидывания при проектировании: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / П.С. Рогов. — Нижний Новгород, 2015. — 189 с.
6. 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, Miskolc, Hungary, April 24–26.* — 2013. — Pp. 551–560.
7. Глушечков, В.А. Упрочнение металлов в обработке металлов давлением: электронное учеб. пособие / В.А. Глушечков. — Самара, 2010. — 33 с.
8. 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, Is. 1. — Pp. 37–52.
9. Садырин, А.И. Компьютерные модели динамического разрушения конструкционных материалов: учеб.-метод. пособие / А.И. Садырин. — Нижний Новгород: Нижегородский гос. ун-т, 2010. — 35 с.
10. Форенталь, М.В. Динамика деформирования и разрушения пластин при высокоскоростном нагружении ударником со сложной структурой: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / М. В. Форенталь. — Челябинск, 2010. — 174 с.
11. Лопатина Е.С. Механические свойства металлов: Конспект лекций [Электронный ресурс] / Е.С. Лопатина, А.А. Ковалева, В.И. Аникина. — Режим доступа: http://files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/1822/u_lectures.pdf. — Дата доступа: 12.11.2015.
12. Остсемин, А.А. К анализу напряженного состояния в эллиптической шейке образца при растяжении / А.А. Остсемин // *Проблемы прочности.* — 2009. — № 4. — С. 19–28.
13. Cold-formed stainless steel structures: New Zealand Standard of the Australia AS / NZS 4673:2001. — New Zealand–Australia. — 2001.

OMELUSIK Aleksey V.

Junior Researcher of the Department of Computer Modeling and Virtual Testing of the Republican Computer Center of Mechanical Engineering¹

E-mail: alexlifting@mail.ru

SHMELIOV Aleksey V., Ph.D. in Eng.

Director of the Republican Computer Center of Mechanical Engineering¹

E-mail: shmeliiov.alexei@gmail.com

KONONOV Aleksandr G., Ph. D. in Phys.-Math.

Senior Researcher of the Center for Structural Research and Tribo-Mechanical Testing of Materials and Engineering Products¹

E-mail: a_g_kononov@mail.ru

RUBCOV Aleksandr V.

Head of Strength Laboratory²

E-mail: aleks_rubtsov@mail.ru

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²JSC “Minsk Automobile Plant” — Holding Management Company of “BelavtoMAZ”

Received 03 May 2017.

DETERMINING THE PARAMETERS OF A MULTILINEAR MATERIAL MODEL AND MODELING THE PLASTIC DEFORMATION OF BEAM STRUCTURES OF MACHINES

The paper is devoted to the definition of the parameters of the multilinear model of elasto-plastic deformation of metals used in calculating the stress-strain state and predicting the destruction of mechanical-engineering structures. The proposed method for identifying the parameters of a multilinear metal model involves a transition from the conditional (engineering) values of stresses and deformations to the true values. A distinctive feature of the technique is the consideration of the stress-strain state in the neck of the sample and the recommendations for determining the intermediate parameters of the material model. For the purpose of approbation of the developed technique in the software complex ANSYS LS-DYNA, a computer simulation of flat tensile tests was carried out. In the calculation, the identified parameters of the model for steel 20 were used. The simulation error, calculated from the value of the relative elongation of the sample at the time of failure, was 1,8%. The obtained parameters of

the model were also used in modeling the three-point bending of beams of rectangular section $60 \times 40 \times 3$ mm from steel 20. Comparison of the calculation results with experimental data showed a difference in the control values of bending forces up to 17%. This difference is caused by hardening of the material at the corners of the cross-section of the beams. A method is proposed for taking this effect into account on the basis of recalculation of the inertial characteristics of the cross section. This made it possible to reduce the difference in the calculated results from the experimental up to 1,1%.

Keywords: computer simulation, material model, identification, mechanical characteristics, test, finite element method, LS-DYNA

References

1. Su Hao, Wing Kam Liu, Chin Tang Chang Computer implementation of damage models by finite element and meshfree methods. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 2000, vol. 187, pp. 401–440.
2. Nurhadi I., Zain R., Mihradi S. Computer modeling of energy absorbing capability of bus superstructure for rollover safety. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 2011, vol. 18, no. 2, pp. 331–338.
3. Nihamkin M.Sh. [et al.] Jeksperimentalnaja verifikacija modelej deformacionnogo povedenija i vysokoskorostnogo razrushenija titanovogo splava VT6 [Experimental verification of models of deformation behavior and high-speed destruction of a titanium alloy VT6]. *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk* [News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2011, vol. 13, no. 4(4), pp. 991–997.
4. Vashurin A.S. *Razrabotka metodiki i ocenka passivnoj bezopasnosti kuzovov iz mnogoslojnyh panelej vahtovyh avtobusov*. Diss. kand. tehn. nauk [Development of methods and assessment of passive safety of bodies from multi-layer panels of shift buses. D. Sc. Thesis]. N. Novgorod, 2014. 225 p.
5. Rogov P.S. *Razrabotka metodiki obespechenija passivnoj bezopasnosti kuzovov avtobusov v uslovijah oprokidyvanija pri proektirovanii*. Diss. kand. tehn. nauk [Development of a technique for ensuring passive safety of coach bodies under roll-over conditions in the design. D. Sc. Thesis]. N. Novgorod, 2015. 189 p.
6. Vincze-Pap S., Csiszár A. Applied virtual (VT) technology on bus superstructure roll-over tests. *Proc. Int. Conf. "Design, Fabrication and Economy of Metal Structures"*. Miskolc, 2013, pp. 551–560.
7. Glushhenkov V.A. *Uprochnenie metallov v obrabotke metallov davleniem: jelektronnoe uchebnoe posobie* [Strengthening of metals in metal forming: electronic textbook]. Samara, 2010. 33 p.
8. Ashraf M., Gardner L., Nethercot D.A. Strength enhancement of the corner regions of stainless steel cross-sections. *Journal of Constructional Steel Research*, 2005, vol. 61, no. 1, pp. 37–52.
9. Sadyrin A.I. *Kompjuternye modeli dinamicheskogo razrushenija konstrukcionnyh materialov: ucheb.-metod. posobie* [Computer models of dynamic destruction of structural materials: teaching aid]. N. Novgorod, Nizhegorodskij gosuniversitet, 2010. 35 p.
10. Forental M.V. *Dinamika deformirovanija i razrushenija platin pri vysokoskorostnom nagruzenii udarnikom so slozhnoj strukturoj*. Diss. kand. tehn. nauk [The dynamics of deformation and fracture of the plates under high loading drummer with a complex structure. D. Sc. Thesis]. Cheliabinsk, 2010. 174 p.
11. Lopatina E.S., Kovaleva A.A., Anikina V.I. *Mehanicheckie svojstva metallov: Konspekt lekcij* [Mechanical properties of metals: Lecture notes]. Available at: http://files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/1822/u_lectures.pdf/ (accessed 12 November 2015).
12. Ostsemin A.A. K analizu naprjazhennogo sostojanija v jellipticheskoj shejke obrazca pri rastjazhenii [On the analysis of the state of stress in the elliptical neck of the sample under tension]. *Problemy prochnosti* [Problems of strength], 2009, no. 4, pp. 19–28.
13. New Zealand Standard of the Australia 4673. Cold-formed stainless steel structures, 2001.