

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОЛИЛИНЕЙНЫХ МОДЕЛЕЙ МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ПЛОСКИХ ОБРАЗЦОВ

А.В. Омелюсик

А.В. Шмелев

А.Г. Кононов

alexlifting@mail.ru

shmeliov.alexei@gmail.com

a\_g\_kononov@mail.ru

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

---

### Аннотация

Рассмотрены подходы к определению параметров полилинейных моделей упругопластического деформирования металлов, используемые при расчете напряженно-деформированного состояния и прогнозировании разрушений машиностроительных конструкций. Предложена методика идентификации параметров полилинейных моделей металлов, включающая в себя переход от условных (инженерных) значений напряжений и деформаций к истинным. Отличительные особенности методики — учет напряженно-деформированного состояния в шейке образца и рекомендации по определению промежуточных параметров моделей материалов. В программном комплексе ANSYS LS-DYNA проведено компьютерное моделирование испытаний плоских образцов на растяжение. В расчете использованы параметры моделей для сталей марок 20 и S235JRG2, применяемых в конструкциях пассажирских транспортных средств. Погрешность расчета относительного удлинения образца в момент разрушения составила не более 2,8 %

### Ключевые слова

Компьютерное моделирование,  
модель материала, идентификация,  
механические характеристики,  
испытание, метод конечных  
элементов, LS-DYNA

Поступила в редакцию 17.11.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

---

**Введение.** Все более широкое практическое применение при разработке и совершенствовании несущих конструкций машин по критериям прочности и жесткости получают программные средства компьютерного моделирования процессов, основанные на применении метода конечных элементов, как в явной, так и неявной постановке. В последнем случае речь идет, как правило, о моделировании быстропротекающих динамических процессов или же о краш-тестах. Важным условием достоверного виртуального воспроизведения подобных динамических процессов является определение и применение для исследуемой модели конструкции свойств материалов, учитывающих основные особенности их упругопластического деформирования вплоть до наступления разрушения. С этой целью разрабатываются соответствующие модели материалов, описывающие на основе математических зависимостей упругопластическое по-

ведение упрочняющегося материала при приложении внешнего силового воздействия.

Одной из актуальных машиностроительных задач является обеспечение прочности каркасов пассажирских транспортных средств. В Правилах ЕЭК ООН № 66 приведен 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. Сопоставляя полученные в ходе эксперимента и допустимые значения перемещений элементов каркаса делают 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 параметрам моделей упругопластического деформирования материалов, однако, в них не приводится и не раскрывается процедура их определения по результатам натуральных испытаний образцов материала. В работах [4, 5] рассмотрены параметры на основе испытаний образцов материалов, но без учета особенностей деформации образца после достижения их временного сопротивления и с произвольным выбором промежуточных точек модели диаграммы растяжения.

Таким образом, актуальной является разработка методических рекомендаций идентификации параметров моделей металлических материалов, которые позволят упорядочить и упростить процедуру подготовки исходных данных, а также повысить достоверность проведения расчетных исследований конструкций, используя экспериментально полученные значения параметров материалов.

**Идентификация параметров моделей материала по результатам экспериментальных исследований.** В преобладающем большинстве современных программных комплексов для расчетной оценки напряженно-деформированного состояния конструкций используется метод конечных элементов [6, 7]. 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, используя инженерные или «условные» показатели, не учитывающие деформацию образца в ходе испытаний. Поэтому при обработке экспериментальных данных в целях дальнейшего их применения в расчетах необходимо перейти от условных деформаций и напряжений к истинным. В результате пересчета по методикам [4, 5] получают параметры, не учитывающие факт локального образования шейки, активное формирование которой происходит на участке от предела

прочности до момента разрушения. Для устранения данного недостатка предлагается параметры нелинейной модели материала идентифицировать по трем характерным точкам. Каждая точка определяется истинными значениями пластической деформации и напряжения. В наиболее общем виде диаграмма деформирования может быть представлена полилинейной моделью материала, состоящей из нескольких параметров истинных деформаций и соответствующих им значений истинных напряжений.

**Упругий участок диаграммы.** Параметром является точка предела текучести

$$\sigma_1 = \sigma_T, \quad \varepsilon_1 = 0. \quad (1)$$

**Участок пластического упрочнения.** Параметром является точка, значение которой соответствует временному сопротивлению и началу образования шейки. Для данного параметра определяем истинные значения напряжения и деформации [8]:

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

где  $\sigma_B$  — временное сопротивление, полученное в эксперименте;  $E$  — модуль Юнга, полученный в эксперименте;  $\delta_B$  — инженерные деформации образца, соответствующие временному сопротивлению, полученные в эксперименте.

**Участок образования шейки.** Шейка образуется вплоть до разрушения образца, поэтому параметром будет являться точка со значением, соответствующим моменту разрушения [9]:

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_K}{\left[ \sqrt{1 + R/h} \ln \left( \frac{\sqrt{1 + R/h} + 1}{\sqrt{1 + R/h} - 1} \right) - 1 \right]}; \quad (3)$$

$$\varepsilon_3 = \ln \left( \frac{1}{1 - \psi} \right) - \frac{\sigma_3}{E},$$

где  $\sigma_K$  — 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;  $\psi$  — относительное сужение образца.

Среднее нормальное напряжение в момент разрыва образца определяется по формуле

$$\sigma_K = \frac{P_{\text{разр}}}{A_u},$$

где  $P_{\text{разр}}$  — нагрузка в момент разрушения;  $A_u$  — площадь наименьшего сечения образца в момент разрушения.

Радиус кривизны контура шейки в точке наименьшего поперечного сечения  $R$  может быть определен графическим способом. Контрастное фотоизображе-

ние образца после испытаний импортируется в графический редактор, позволяющий выполнить измерение соответствующих параметров. По фотоизображению определяют относительные геометрические параметры образца. Абсолютную величину одного из параметров (ширину наименьшего поперечного сечения шейки) находят путем прямого измерения с помощью измерительного инструмента (например, микрометра), а неизвестный параметр — на основании составленной пропорциональной зависимости.

Для создания сглаженной кривой растяжения на участке от предела текучести до временного сопротивления находят промежуточные точки, для определения промежуточных параметров используют следующую формулу:

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

где  $\delta_i$  — значение деформации  $i$ -го промежуточного параметра;  $\delta_{i-1}$  — значение деформации промежуточного параметра, предшествующего  $i$ -му;  $n$  — число промежуточных параметров.

Значения напряжений определяются по экспериментальной диаграмме растяжения. Пересчет инженерных значений в истинные проводится по формулам (2). Формула (4) обеспечивает равноудаленность промежуточных параметров друг от друга на кривой растяжения, тем самым способствуя повышению точности результатов расчета.

**Пример апробации предложенных методических рекомендаций для плоских образцов.** Были проведены испытания плоских образцов материалов — сталей марок 20 и S235JRG2, полученных из балок профиля 50×40×3 ГОСТ 8645–68 и Г-образного профиля крыши.

На рис. 1 приведены образцы материалов для испытаний, в табл. 1 — номинальные значения основных геометрических параметров образцов.



**Рис. 1.** Образцы материалов для испытаний:

1 — сталь S235JRG2; 2 — сталь марки 20

**Геометрические параметры образцов материалов**

Материал образца — сталь марки	Толщина, мм	Длина, мм	Ширина рабочей части, мм	Ширина захватной части, мм	Длина захватной части, мм
20	3	220	20	30	50
S235JRG2	2	220	20	30	50

Номинальное значение длины рабочей части, относительно которой определялось удлинение, составляло 100 и 90 мм для образцов сталей марок 20 и S235JRG2.

Механические свойства образцов определяли на универсальной гидравлической испытательной машине INSTRON Satec 300LX, погрешность измерения нагрузки составляла не более 0,5 % измеряемого значения. Для регистрации деформаций использовали экстензометр INSTRON 2630-107 GL25MM с погрешностью измерения деформации не более 0,1 %.

На рис. 2 приведено фото образца в ходе испытаний.



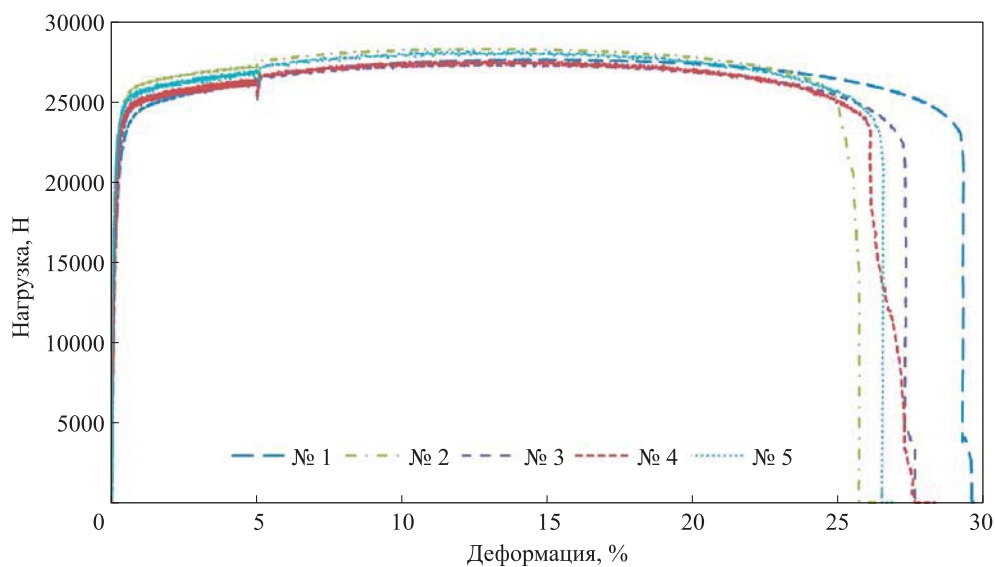
**Рис. 2.** Процесс испытаний образца материала — сталь марки 20 (приложение нагрузки, измерение деформаций)

На рис. 3 приведено фото образцов после испытаний.

Результаты испытаний в виде диаграмм растяжения представлены на рис. 4 и 5. Номер кривой на диаграмме соответствует номеру испытанного образца.



**Рис. 3.** Образцы после испытаний:  
1 — сталь марки 20; 2 — сталь S235JRG2



**Рис. 4.** Кривые деформирования образцов стали марки 20

Среднее значение (СЗ) механических характеристик материалов определяли по формуле [10]

$$\tilde{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

где  $n$  — число измерений;  $x_i$  — значение отдельного измерения.

Для определения истинных значений необходимо найти среднеквадратическое отклонение (СКО)

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{x})^2}{n-1}},$$

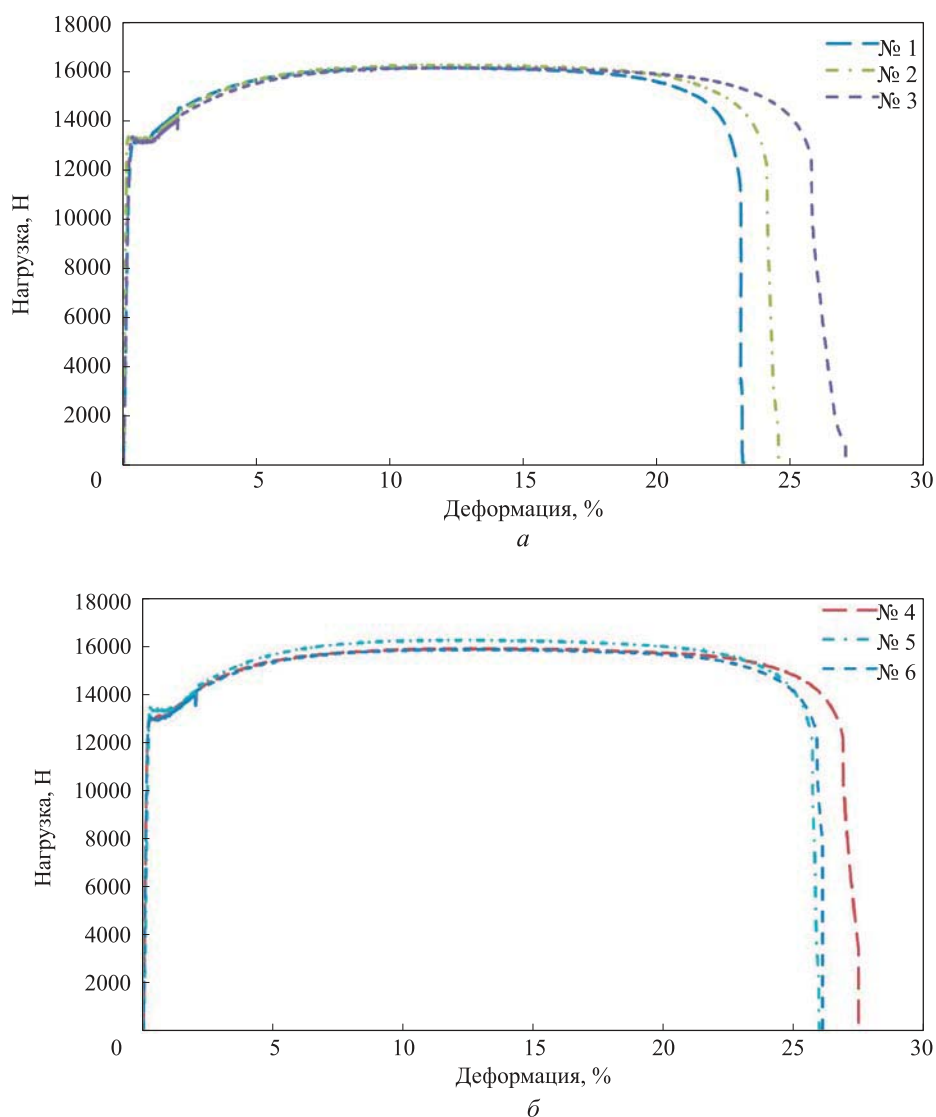


Рис. 5. Кривые деформирования образцов стали S235JRG2, образцы № 1–№ 3 (а) и № 4–№ 6 (б)

Результаты обработки установленных механических характеристик испытанных материалов приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

**Результаты обработки измеренных значений механических характеристик стали марки 20**

Номер образца	Предел текучести 0,2 %, МПа	Предел прочности, МПа	Деформация при пределе прочности, %	Удлинение при разрыве, %
1	362	445	14,3	29,3
2	410	463	13,1	25,7

Номер образца	Предел текучести 0,2 %, МПа	Предел прочности, МПа	Деформация при пределе прочности, %	Удлинение при разрыве, %
3	388	455	13,8	27,3
4	396	461	13,0	26,5
5	403	469	11,9	26,5
СЗ $\bar{x}$	392	459	13,2	27,1
СКО S	18,6	9,1	0,9	1,4

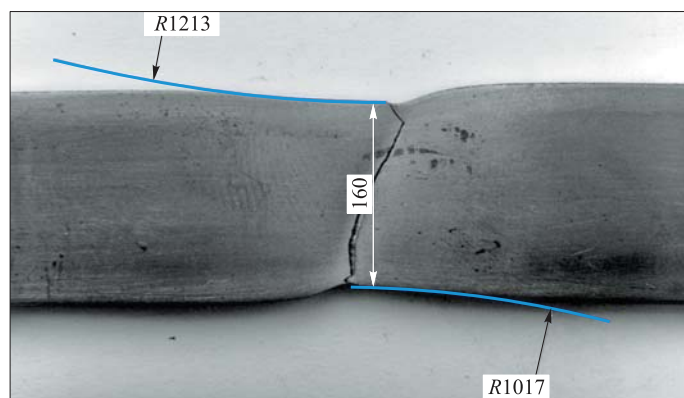
Таблица 3

**Результаты обработки измеренных значений механических характеристик стали S235JRG2**

Номер образца	Предел текучести 0,2 %, МПа	Предел прочности, МПа	Деформация при пределе прочности, %	Удлинение при разрыве, %
1	329	407	11,8	23,1
2	339	417	12,2	24,2
3	331	406	12,6	25,9
4	333	409	12,6	27,1
5	342	418	11,5	25,8
6	333	408	14,3	26,2
СЗ $\bar{x}$	335	411	12,5	25,4
СКО S	5,0	5,3	1,0	1,5

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

Параметры моделей материалов определяли по зависимостям (1)–(4) методики. На рис. 6 и 7 приведена процедура определения относительного значения радиуса кривизны контура шейки. Поскольку линия разрыва образцов проходит под углом к перпендикуляру продольной оси образцов, то замер радиуса проводится с обеих сторон образца на явно выраженной зоне сужения.



**Рис. 6.** Графическое определение радиуса кривизны контура шейки образца № 5 стали марки 20



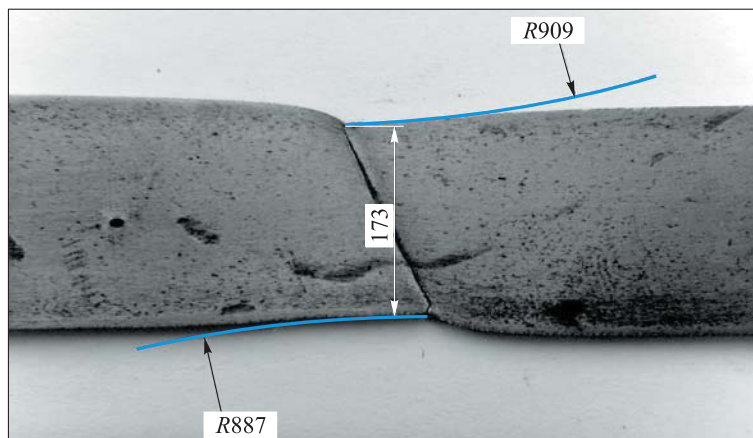


Рис. 7. Графическое определение радиуса кривизны контура шейки образца № 1 стали S235JRG2

Абсолютное среднее значение определено с помощью составленной пропорциональной зависимости:

$$\frac{2h}{160} = \frac{R}{\left(\frac{1139+1098}{2}\right)};$$

$$R = \frac{1115}{160} \cdot 2h = 0,984 \cdot 2h$$

— для стали марки 20;

$$\frac{2h}{173} = \frac{R}{\left(\frac{909+887}{2}\right)};$$

$$R = \frac{898}{173} \cdot 2h = 5,191 \cdot 2h$$

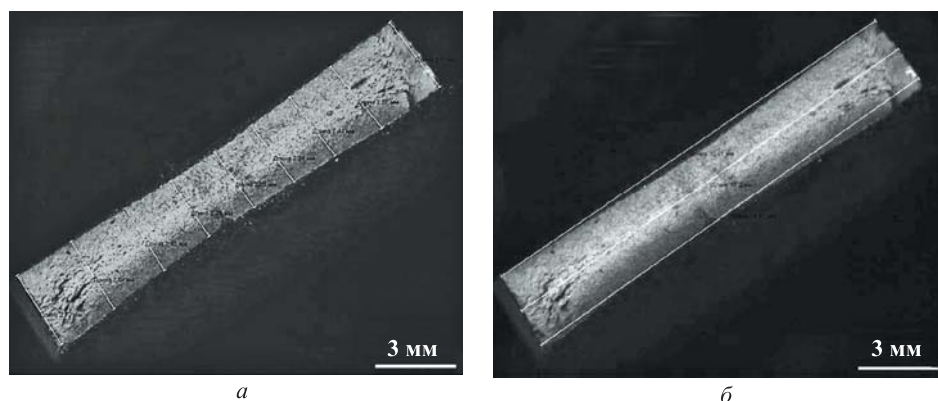
— для стали S235JRG2, где  $2h$  — ширина образца в зоне шейки после испытаний.

Относительное сужение  $\psi$  определялось по формуле

$$\psi = \frac{(F_0 - F_k)}{F_0},$$

где  $F_0$  и  $F_k$  — начальная и конечная площади поперечного сечения исследуемых образцов.

Для получения высокой точности значения конечной площади  $F_k$  использовались средства измерения программного обеспечения Altami Studio 2.1. На рис. 8 показаны фрагменты процедуры измерения геометрических размеров (ширины и толщины) локальной зоны сужения образца № 3 стали марки 20.



**Рис. 8.** Измерение толщины (а) и ширины (б) локальной зоны сужения образца № 3 стали марки 20

На основании полученных значений геометрических размеров определяли конечную площадь поперечного сечения  $F_k$ . Результаты идентификации представлены в табл. 4 и 5 (восьмая точка задавалась для возможности продолжения решения по достижении предельной деформации).

Таблица 4

**Идентифицированные параметры модели материала сталь марки 20**

Параметры образца	Номер точки							
	1	2	3	4	5	6	7	8*
$\epsilon_i$	0	0,026	0,047	0,071	0,094	0,122	0,712	0,8
$\sigma_i$ , МПа	392	442	463	485	501	519	759	759

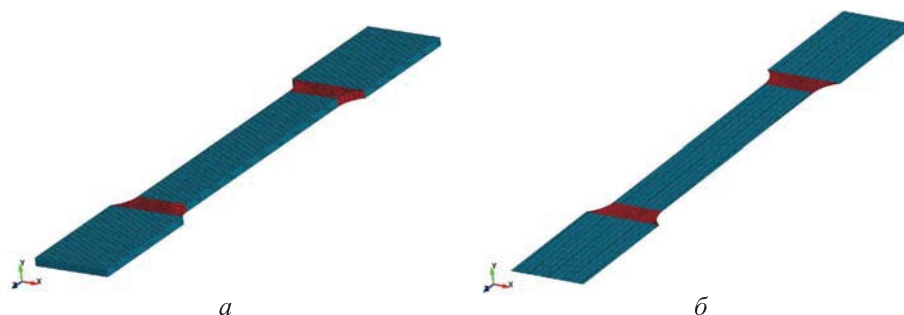
Таблица 5

**Идентифицированные параметры модели материала сталь S235JRG2**

Параметры образца	Номер точки							
	1	2	3	4	5	6	7	8*
$\epsilon_i$	0	0,030	0,052	0,074	0,095	0,116	0,819	0,9
$\sigma_i$ , МПа	335	393	421	439	451	462	787	787

**Компьютерное моделирование натурального эксперимента.** В программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS LS-DYNA PC (R800) были разработаны твердотельные и оболочечные конечно-элементные модели образцов материалов, геометрические размеры которых соответствуют номинальным размерам образцов. На рис. 9 приведены твердотельная и оболочечная конечно-элементные модели образца с заданными по результатам идентификации параметрами для стали марки 20.

Модели образцов разрабатывались с использованием системного компонента ANSYS Explicit Dynamics (LS-DYNA Export). Конечно-элементная сетка на захватных участках и рабочей части генерировалась гексагональными элемен-



**Рис. 9.** Конечно-элементные модели образца:  
*a* — твердотельная; *б* — оболочечная

тами с размером грани порядка 1 мм. Сетка на переходных участках, имеющих закругления, состояла преимущественно из гексагональных элементов с тетрагональными в переходных зонах. Общее число элементов в твердотельной модели образца стали марки 20 составило 16116, в оболочечной модели — 5319. В твердотельной модели образца стали S235JRG2 число элементов составило 10671, в оболочечной — 5182.

Конечно-элементная модель образца из ANSYS Explicit Dynamics (LS-DYNA Export) в формате *k*-файла передавалась в программу пре/постпроцессор LS-PrePost. В приложении LS-PrePost моделям образцов присваивалась модель материала \*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY (024) с параметрами, приведенными в табл. 2 и 3 для сталей марок 20 и S235JRG2. Модуль упругости для сталей марок 20 и S235JRG2 (как аналога стали СтЗпс [11]) был принят  $E = 200\,000$  МПа. В качестве критерия разрушения принята эквивалентная пластическая деформация величиной 0,712 и 0,819 соответственно исследуемым материалам. Значения эквивалентных пластических деформаций определяли 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 сил в узлах заделки в зависимости от перемещения захватной части образца.

**Сопоставление результатов эксперимента и моделирования.** Достоверность определения параметров модели материала оценивалась по соответствию зависимости нагрузки, возникающей в результате реактивного действия, от относительной деформации образца, т. е. выполнялся переход к условным характеристикам материала, регистрируемым в ходе эксперимента. Поскольку полученные в результате расчета значения сил соответствуют номинальным значениям образца, то их необходимо умножить на коэффициент площади поперечного сечения

$$k_A = \frac{A_{\text{ср}}}{A_{\text{ном}}},$$

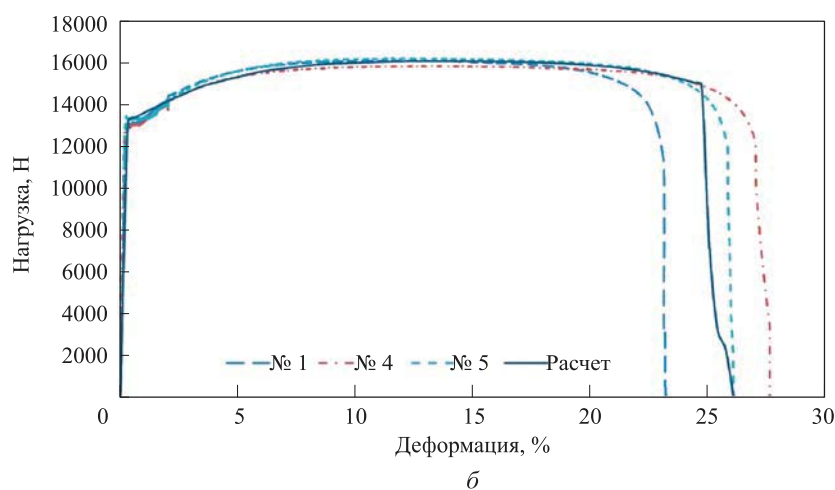
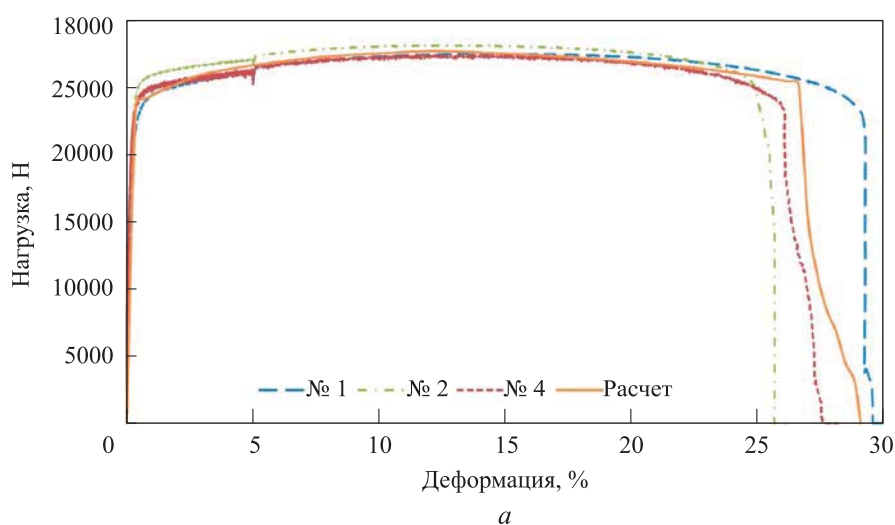
где  $A_{cp}$  — средняя площадь поперечных сечений образцов;  $A_{ном}$  — номинальная площадь сечения, принятая в расчете.

Средняя площадь поперечных сечений  $A_{cp}$  определяется по выражению

$$A_{cp} = \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_n}{n},$$

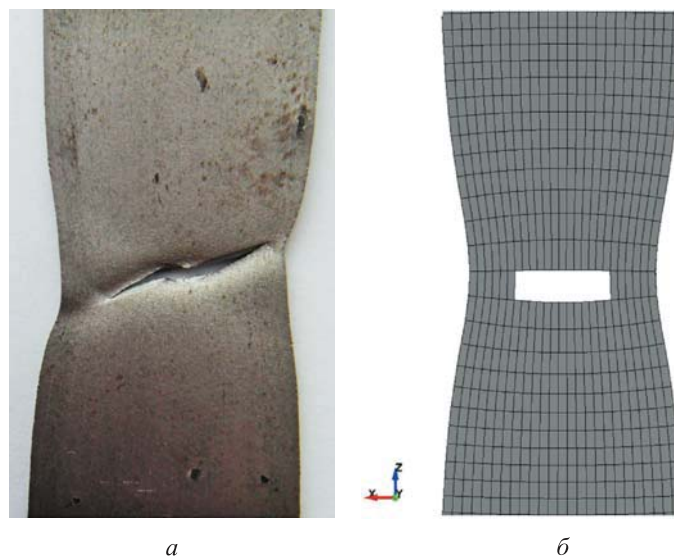
где  $A_i$  — действительная площадь поперечного сечения  $i$ -го образца до испытания;  $n$  — число образцов.

На рис. 10 приведено графическое сопоставление экспериментальных и расчетных данных для твердотельных моделей образцов.



**Рис. 10.** Диаграммы растяжения образцов стали марок 20 (а) и S235JRG2 (б)

На рис. 11 представлена сравнительная визуализация начала разрушения натурального образца из стали S235JRG2 и компьютерной модели.



**Рис. 11.** Начало разрушения образца материала сталь S235JRG2:  
*a* — эксперимент; *б* — расчет

В расчетной модели разрушение образца происходит с середины наименьшего поперечного сечения шейки, что указывает на качественное соответствие процесса деформирования и корректный выбор критерия разрушения материала в программном комплексе ANSYS LS-DYNA.

Поскольку в расчете принимались средние значения механических характеристик материалов, то сопоставление расчетной и экспериментальных диаграмм деформирования выполнялось по удлинению образца в момент разрушения как имеющего наибольший относительный разброс по результатам эксперимента (табл. 6).

Таблица 6

**Сопоставление результатов расчета и эксперимента по удлинению в момент разрыва**

Материал — сталь марки	Эксперимент, %	Расчет, %	Погрешность, %
20	27,1	26,6	1,8
S235JRG2	25,4	24,7	2,8

Погрешность значения предела прочности составляет до 1 МПа. Отметим, что расчетная кривая деформирования проходит по середине образованной группы экспериментальных кривых. Этот факт подтверждает принятые средние значения механических характеристик и высокую точность расчета.

Особый интерес представляют результаты расчета оболочечной модели и их сопоставление с результатами расчета для твердотельной модели. На рис. 12 приведены диаграммы растяжения оболочечных и твердотельных моделей для исследуемых марок стали; в табл. 7 — значения удлинений в момент разрыва оболочечной и твердотельной моделей и их отклонение от результатов эксперимента для исследуемых материалов.

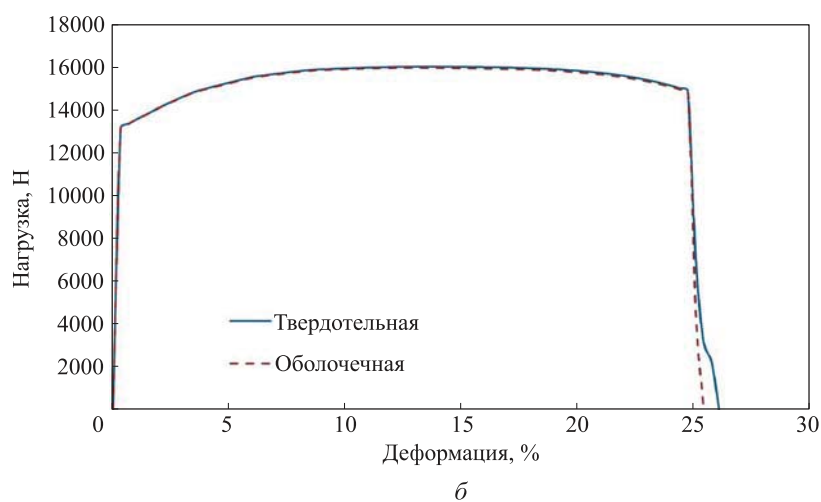
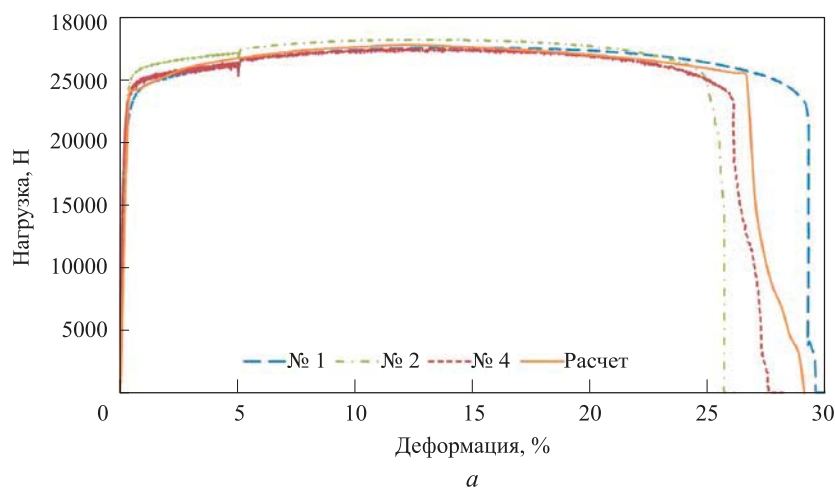


Рис. 12. Диаграммы растяжения твердотельной и оболочечной моделей образцов из стали марок 20 и S235JRG2

Таблица 7

**Результаты расчета оболочечных и твердотельных моделей образцов материалов и их отклонения от эксперимента**

Материал — сталь марки	Оболочечная модель, %	Твердотельная модель, %	Отклонение от экспериментальных значений, %	
			Оболочечная модель	Твердотельная модель
20	27,4	26,6	1,1	1,8
S235JRG2	24,7	24,7	2,8	2,8

Соответствие результатов расчета твердотельной и оболочечной моделей образца свидетельствует о корректности использования подходов к моделированию быстропротекающих процессов, создания конечно-элементных моделей

с учетом типа элементов и схемы разбиения, а также вида и размера элементов при расчете более сложных машиностроительных конструкций.

Результаты моделирования характеристик сталей марок 20 и S235JRG2 показывают хорошую сходимость с результатами натуральных экспериментов. Таким образом, погрешность расчета по удлинению образца стали марки 20 в момент разрыва составляет 1,8 %, S235JRG2 — 2,8 %. Погрешность расчетной оценки значения предела прочности не превысила 1 МПа, т. е. до 1 %. Отклонение результатов расчетов оболочечных моделей от твердотельных по тому же критерию составляет 3 % и 0, от экспериментальных значений 1,1 и 2,8 %. Также предложенный подход отбора значений деформаций и напряжений для определения промежуточных параметров модели материала от предела текучести до временного сопротивления позволил сделать расчетную диаграмму деформирования более плавной и повысить точность расчетов.

**Заключение.** Разработанные методические рекомендации идентификации параметров моделей материалов могут эффективно использоваться при компьютерном моделировании процессов пластического деформирования и разрушения машиностроительных конструкций. Для сокращения времени расчетов рекомендуется использовать элементы оболочечного типа, так как согласно проведенным расчетным исследованиям образцов материалов отклонение от результатов натуральных испытаний составило 1,1 и 2,8 % для сталей исследованных марок 20 и S235JRG2.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Hao S., Liu W.K., Chang Ch.T. Computer implementation of damage models by finite element and meshfree methods // *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 2000. Vol. 187. No. 3-4. P. 401–440. DOI: 10.1016/S0045-7825(00)80003-1  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045782500800031>
2. Nurhadi I., Zain R., Miharadi S. Computer modeling of energy absorbing capability of bus superstructure for rollover safety // *Journal of KONES Powertrain and Transport.* 2011. Vol. 18. No. 2. P. 331–338.
3. Нихамкин М.Ш., Воронов Л.В., Любчик О.Л., Гладкий И.Л. Экспериментальная верификация моделей деформационного поведения и высокоскоростного разрушения титанового сплава ВТ6 // *Известия Самарского научного центра РАН.* 2011. Т. 13. № 4 (4). С. 991–997.
4. Вашури А.С. Разработка методики и оценка пассивной безопасности кузовов из многослойных панелей вахтовых автобусов. Дисс. ... канд. техн. наук. Н. Новгород: НГТУ, 2014. 225 с.
5. Рогов П.С. Разработка методики обеспечения пассивной безопасности кузовов автобусов в условиях опрокидывания при проектировании. Дисс. ... канд. техн. наук. Н. Новгород: НГТУ, 2015. 189 с.
6. Садырин А.И. Компьютерные модели динамического разрушения конструкционных материалов. Н. Новгород: НГУ, 2010. 35 с.
7. Форенталь М.В. Динамика деформирования и разрушения пластин при высокоскоростном нагружении ударником со сложной структурой. Дисс. ... канд. техн. наук. Челябинск: Южно-Уральский государственный университет, 2010. 174 с.

8. Лопатина Е.С., Ковалева А.А., Аникина В.И. Механические свойства металлов. Красноярск: Изд-во СФУ, 2008. 192 с.
9. Остсемин А.А. К анализу напряженного состояния в эллиптической шейке образца при растяжении // Проблемы прочности. 2009. № 4. С. 19–28.
10. Румицкий Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. М.: Наука, 1971. 192 с.
11. Сталь конструкционная Ст3пс // Центральный металлический портал РФ: веб-сайт. URL: [http://metallichekiy-portal.ru/marki\\_metallov/stk/St3ps](http://metallichekiy-portal.ru/marki_metallov/stk/St3ps) (дата обращения: 07.12.2017).

**Омелюсик Алексей Валерьевич** — младший научный сотрудник отдела «Моделирование и виртуальные испытания» Республиканского компьютерного центра машиностроительного профиля Объединенного института машиностроения НАН Беларуси (Республика Беларусь, 220072, Минск, Академическая ул., д. 12).

**Шмелев Алексей Васильевич** — канд. техн. наук, директор Республиканского компьютерного центра машиностроительного профиля Объединенного института машиностроения НАН Беларуси (Республика Беларусь, 220072, Минск, Академическая ул., д. 12).

**Кононов Александр Геннадьевич** — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Центра структурных исследований и трибомеханических испытаний материалов и изделий машиностроения Объединенного института машиностроения НАН Беларуси (Республика Беларусь, 220072, Минск, Академическая ул., д. 12).

**Просьба сослаться на эту статью следующим образом:**

Омелюсик А.В., Шмелев А.В., Кононов А.Г. Определение параметров полилинейных моделей металлов на основе результатов испытаний плоских образцов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2018. № 5. С. 65–82.  
DOI: 10.18698/0236-3941-2018-5-65-82

**DETERMINING PARAMETERS OF PIECEWISE-LINEAR METAL MODELS  
BASED ON FLAT SPECIMEN TESTING RESULTS**

A.V. Omelyusik  
A.V. Shmelev  
A.G. Kononov

alexlifting@mail.ru  
shmeliiov.alexei@gmail.com  
a\_g\_kononov@mail.ru

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

**Abstract**

The paper deals with a methodology of determining parameters in piecewise-linear plasticity models of metals, which are used for stress-strain analysis and failure prediction in mechanical engineering structures. We present a method for identifying parameters of piecewise-linear metal models that involves a transition from nominal (also known as engineering) stresses and strains to

**Keywords**

*Numerical simulation, material model, identification, mechanical properties, testing, finite element method, LS-DYNA*



the true values. Our method boasts the following distinctive features: accounting for the stress-strain state in the specimen neck and guidelines for determining intermediate parameters of material models. We simulated tensile testing of flat specimens numerically in the ANSYS LS-DYNA software package. The computation used model parameters for steels 20 and S235JRG2, which are common in passenger transport vehicles. The computational error for relative tensile strain in a specimen at the moment of failure did not exceed 2,8 %

Received 17.11.2017  
© BMSTU, 2018

---

## REFERENCES

- [1] Hao S., Liu W.K., Chang Ch.T. Computer implementation of damage models by finite element and meshfree methods. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 2000, vol. 187, no. 3-4, pp. 401–440. DOI: 10.1016/S0045-7825(00)80003-1  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045782500800031>
- [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] Nikhamkin M.Sh., Voronov L.V., Lyubchik O.L., Gladkiy I.L. Experimental verification of models of deformation behaviour and high-speed destruction of titanic alloy BT6. *Izvestiya Samar-skogo nauchnogo tsentra RAN [Izvestia RAS SamSC]*, 2011, vol. 13, no. 4 (4), pp. 991–997 (in Russ.).
- [4] Vashurin A.S. Razrabotka metodiki i otsenka passivnoy bezopasnosti kuzovov iz mnogosloynnykh paneley vakhovykh avtobusov. Diss. kand. tekhn. nauk [Method development and passive safety assessment of the bodies made from multi-layer panels for shift buses. Kand. tech. sci. diss.]. Nijniy Novgorod, NGTU Publ., 2014. 225 p.
- [5] Rogov P.S. Razrabotka metodiki obespecheniya passivnoy bezopasnosti kuzovov avtobusov v usloviyakh oprokidyvaniya pri proektirovani. Diss. kand. tekhn. nauk [Developing method for ensuring passive safety of coach bodies under roll-over conditions in process of designing. Kand. tech. sci. diss.]. Nijniy Novgorod, NGTU Publ., 2015. 189 p.
- [6] Sadyrin A.I. Komp'yuternye modeli dinamicheskogo razrusheniya konstruktsionnykh materialov [Computer models of construction materials dynamic destruction]. Nijniy Novgorod, NGU Publ., 2010. 35 p.
- [7] Forental' M.V. Dinamika deformirovaniya i razrusheniya plastin pri vysokoskorostnom nagruzhении udarnikom so slozhnoy strukturoy. Diss. kand. tekhn. nauk [Deformation and fracture dynamics of plates under loading by high-speed drummer with a complex structure. Kand. tech. sci. diss.]. Chelyabinsk, Yuzhno-Ural'skiy gosudarstvennyy universitet Publ., 2010. 174 p.
- [8] Lopatina E.S., Kovaleva A.A., Anikina V.I. Mekhanicheskie svoystva metallov [Mechanical properties of metals. Lecture notes]. Krasnoyarsk: Izdat. SFU, 2008. 192 p.
- [9] Ostsemin A.A. On the analysis of stress state in elliptical tensile neck. *Strength of Materials (Problemy prochnosti)*, 2009, vol. 41, no. 4, pp. 356–362.  
DOI: 10.1007/s11223-009-9147-y  
Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11223-009-9147-y>
- [10] Rumshiskiy L.Z. Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta [Mathematical processing of experiment results]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 192 p.

[11] Stal' konstruksionnaya St3ps [Construction steel St3ps]. Tsentral'nyy metallicheskiy portal RF: website (in Russ.). Available at: [http://metallichekiy-portal.ru/marki\\_metallov/stk/St3ps](http://metallichekiy-portal.ru/marki_metallov/stk/St3ps) (accessed: 07.12.2017).


**Omelyusik A.V.** — Research Assistant, Department of Simulation and Virtual Testing, Republican Computer Centre of Mechanical Engineering, Joint Institute of Mechanical Engineering, National Academy of Sciences of Belarus (Akademicheskaya ul. 12, Minsk, 220072 Republic of Belarus).

**Shmelev A.V.** — Cand. Sc. (Eng.), Director, Republican Computer Centre of Mechanical Engineering, Joint Institute of Mechanical Engineering, National Academy of Sciences of Belarus (Akademicheskaya ul. 12, Minsk, 220072 Republic of Belarus).

**Kononov A.G.** — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Senior Research Fellow, Centre of Structural Research and Tribo-Mechanical Testing of Materials and Mechanical Engineering Products, Joint Institute of Mechanical Engineering, National Academy of Sciences of Belarus (Akademicheskaya ul. 12, Minsk, 220072 Republic of Belarus).

**Please cite this article in English as:**

Omelyusik A.V., Shmelev A.V., Kononov A.G. Determining Parameters of Piecewise-Linear Metal Models based on Flat Specimen Testing Results. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2018, no. 5, pp. 65–82 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2018-5-65-82



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышла в свет монография авторов  
**В.М. Кашина, В.Д. Свечарника, В.Л. Солунина, А.Б. Шаповалова**

**«Исследование процессов в приводе наведения установки в упрежденную точку на траектории»**

Рассмотрены особенности работы приводов наведения установки в режиме слежения за упрежденной точкой на траектории. Исследованы статистические характеристики сигналов в системе наведения по результатам математического моделирования и по данным экспериментальных работ. Для инженеров и научных работников, занимающихся проектированием систем управления.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
+7 (499) 263-60-45  
[press@bmstu.ru](mailto:press@bmstu.ru)  
[www.baumanpress.ru](http://www.baumanpress.ru)