

УДК 620.172.251.22.001.57

А. В. Шмелев, А. В. Омелюсик, А. Г. Кононов

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЛИЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТАЛИ EN 1.4003 ДЛЯ РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ И ЖЕСТКОСТИ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

UDC 620.172.251.22.001.57

A. V. Shmeliyov, A. V. Omelusik, A. G. Kononov

IDENTIFICATION OF THE PARAMETERS OF PIECEWISE LINEAR MODEL OF ELASTIC-PLASTIC DEFORMATION OF STEEL EN 1.4003 FOR CALCULATING THE STRENGTH AND HARDNESS OF HEAVY LOADED CONSTRUCTIONS BY THE FINITE ELEMENT METHOD

Аннотация

Проведены экспериментальные исследования механических характеристик материала сталь EN 1.4003, применяемого в конструкции городского автобуса средней вместимости. На базе результатов испытаний выполнена идентификация основных параметров полилинейной модели материала, используемой в программном комплексе LS-DYNA при численном моделировании процессов деформирования и разрушения конструкций. Произведено сопоставление результатов натурного и виртуального вариантов механических испытаний. Результаты сопоставления показали удовлетворительное соответствие.

Ключевые слова:

компьютерное моделирование, испытание на растяжение, модель материала, механические характеристики, МКЭ, LS-DYNA.

Abstract

Experimental studies of the mechanical characteristics of the steel EN 1.4003, applied in the design of the city bus of medium capacity were conducted. Based on the results of the tests, the identification of the main parameters of the MPLP (024) material model used in the LS-DYNA software for numerical modeling of deformation and structural destruction processes was performed. The results of the full-scale and virtual versions of mechanical tests were compared. The results of the comparison showed satisfactory agreement.

Key words:

computer modeling, tensile tests, material model, mechanical properties, FEA, LS-DYNA.

Введение

При разработке и совершенствовании несущих конструкций машин по критериям прочности и жесткости широкое применение на практике получили программные средства компьютерного моделирования процессов, основанные на методе конечных элементов,

как в неявной, так и явной постановке. При решении задач в явной постановке 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 использование в исследу-



емой модели конструкции свойств материалов, учитывающих основные особенности процесса их упруго-пластического деформирования, вплоть до наступления разрушения. С этой целью разрабатываются соответствующие модели материалов, описывающие на базе математических зависимостей упруго-пластическое поведение материала с учетом его упрочнения при приложении внешнего силового воздействия. Такие модели материалов включают в себя параметры, которые необходимо идентифицировать на основе результатов экспериментальных данных [1, 2].

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. Вследствие динамического нагружения происходит пластическое деформирование элементов конструкции каркаса, 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.

Таким образом, актуальной является задача идентификации параметров моделей металлических материалов, используемых в описании свойств материала в конструкции модели каркаса. Это позволит повысить достоверность проведения расчетных исследований конструкций с учетом экспериментально определенных характеристик материалов.

Экспериментальные исследования механических характеристик материалов

Механические испытания плоских стальных образцов на растяжение проводились на универсальной испытательной гидравлической машине INSTRON Satec 300LX (рис. 1), в которой реализовано автоматизированное управление процессом испытаний от ЭВМ.

Погрешность измерения нагрузки составляет не более 0,5 % от измеряемого значения. Для регистрации деформаций использовался экстензометр INSTRON 2630-107 GL25MM, погрешность измерения которого не превышает 0,1 %.

Испытания образцов на растяжение проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 1497–84. Форма и размеры головок и переходных частей плоских образцов определялись по ГОСТ 1497–84. Способ крепления на гидравлической машине INSTRON Satec 300LX предупреждает проскальзывание образцов в захватах, смятие рабочих поверхностей, деформацию головок и разрушение образца в местах перехода от рабочей части к головкам и в головках. Схема установки исследуемого образца в захваты испытательной машины представлена на рис. 2.

В качестве стандартного программного обеспечения для обработки данных, получаемых в процессе испытаний, использовалась программа BluehillLite.

Испытаниям подвергались плоские образцы материала сталь EN 1.4003, полученные из балок профилей сечениями $80 \times 40 \times 3$ и $50 \times 40 \times 2$ мм (рис. 3).

Размеры поперечных сечений образцов составляют 20×3 и 20×2 мм для балок сечениями $80 \times 40 \times 3$ и $50 \times 40 \times 2$ мм соответственно. Химический состав исследуемой стали представлен в табл. 1.

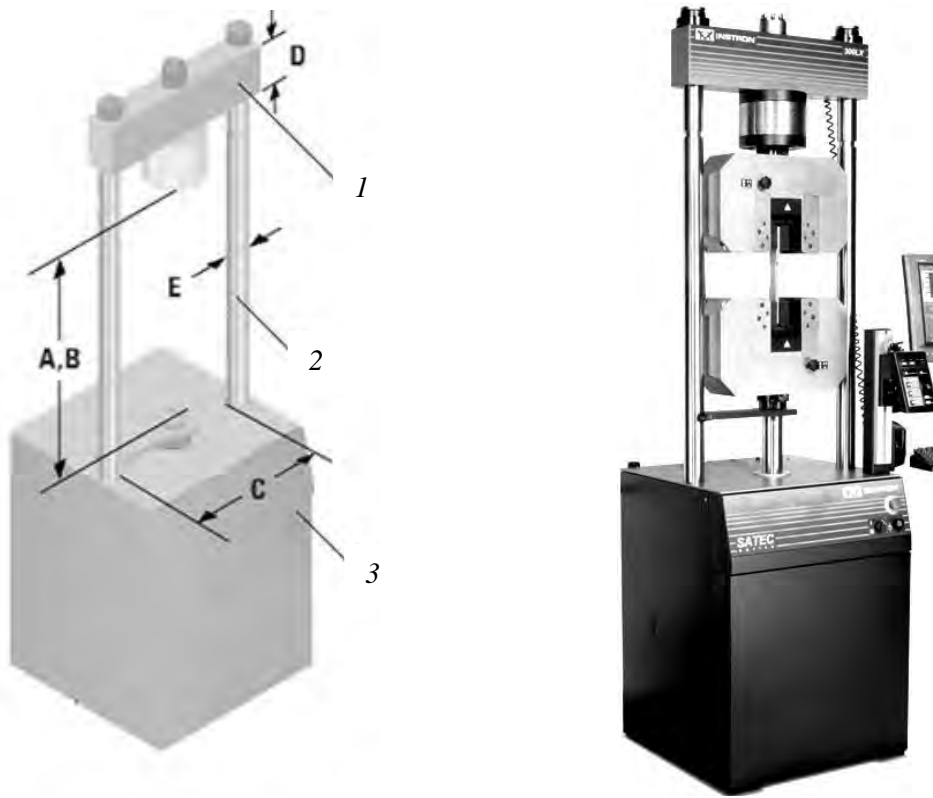


Рис. 1. Универсальная гидравлическая испытательная машина INSTRON Satec 300LX: 1 – траверса; 2 – направляющая колонна; 3 – рабочий стол

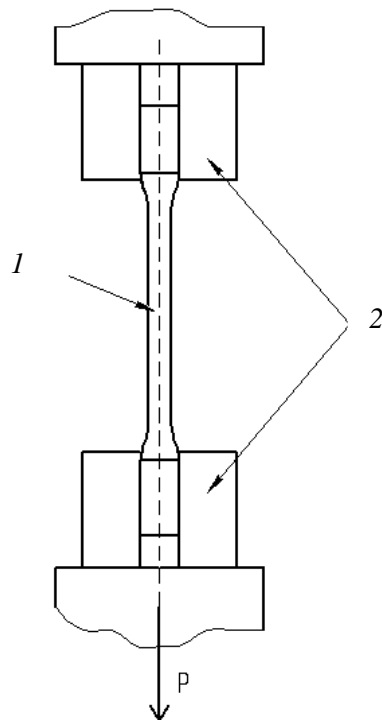


Рис. 2. Образец 1, установленный в захваты 2



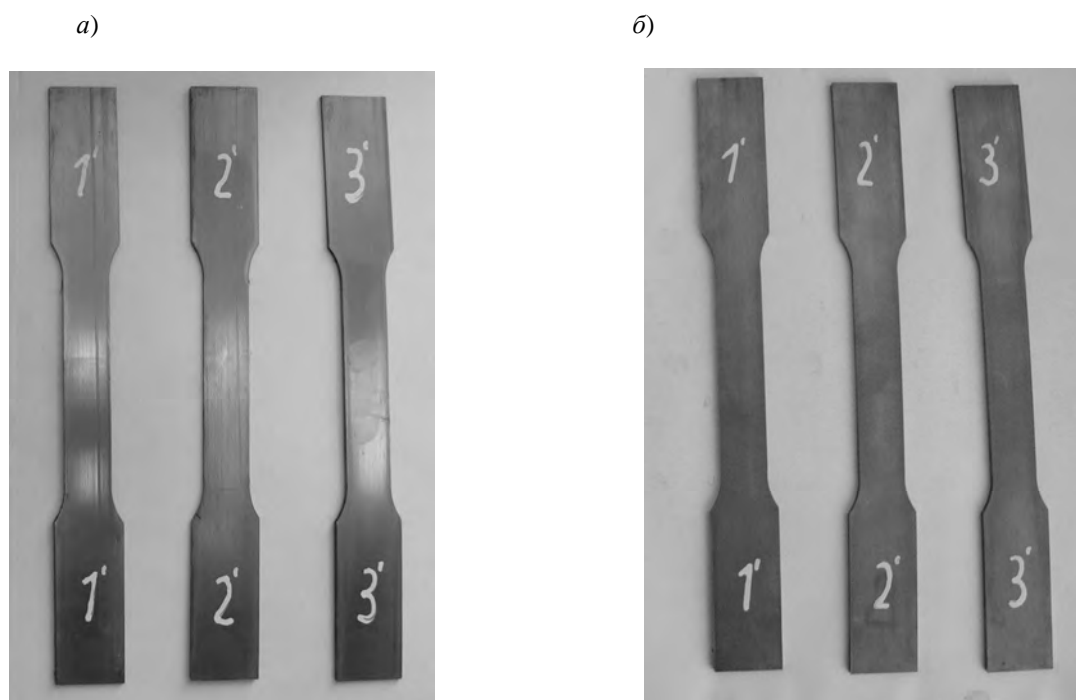


Рис. 3. Образцы материала сталь EN 1.4003: а – из балок сечением $50 \times 40 \times 2$ мм; б – из балок сечением $80 \times 40 \times 3$ мм

Табл. 1. Химический состав стали EN 1.4003

Химический элемент	C	Mn	P	Ni	Cr	Si	S	N
Содержание, %	0,03	1,50	0,04	0,3...1,0	10,5...12,5	1,00	0,015	0,03

Согласно сертификату завода-изготовителя материал имеет следующие механические характеристики: предел текучести $\sigma_{0,2}$ не менее 400 МПа; предел прочности σ_b не менее 450 МПа; удлинение при разрыве не менее 10 %.

Исследуемые образцы каждой партии испытывались до разрушения. Механические характеристики, такие как предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа, предел прочности σ_b , МПа, и относительное удлинение δ , %, плоских стальных образцов определялись в автоматизированном режиме с использованием программного обеспечения BluehillLite после завершения испытаний. На рис. 4 представлены образцы после испытаний.

Результаты испытаний в виде диаграмм деформирования отображены на рис. 5 и 6. Номер кривой на диаграмме

соответствует номеру испытанного образца.

Среднее значение полученных механических характеристик материалов определялось по формуле

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

где n – количество измерений; x_i – величина отдельного измерения.

Для определения истинных значений измеренных величин необходимо найти среднеквадратичное отклонение по формуле

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



Результаты обработки установленных механических характеристик

испытанных материалов приведены в табл. 2 и 3.

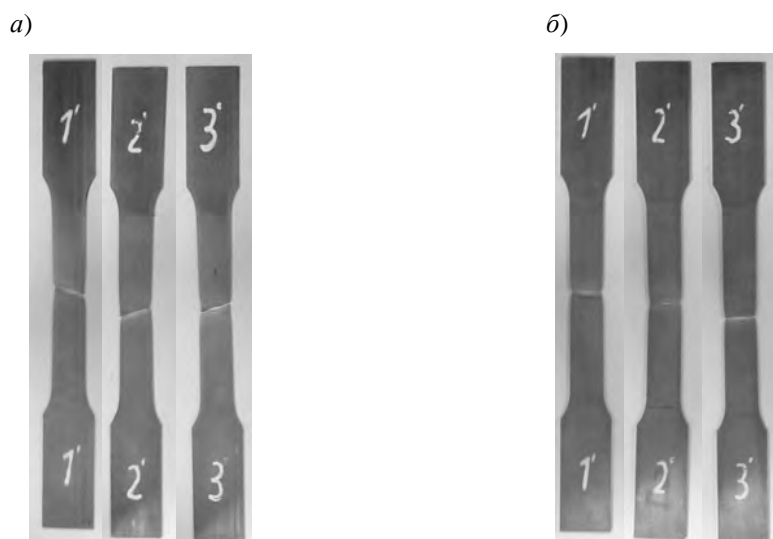


Рис. 4. Образцы после испытаний: а – из балок сечением $50 \times 40 \times 2$ мм; б – из балок сечением $80 \times 40 \times 3$ мм

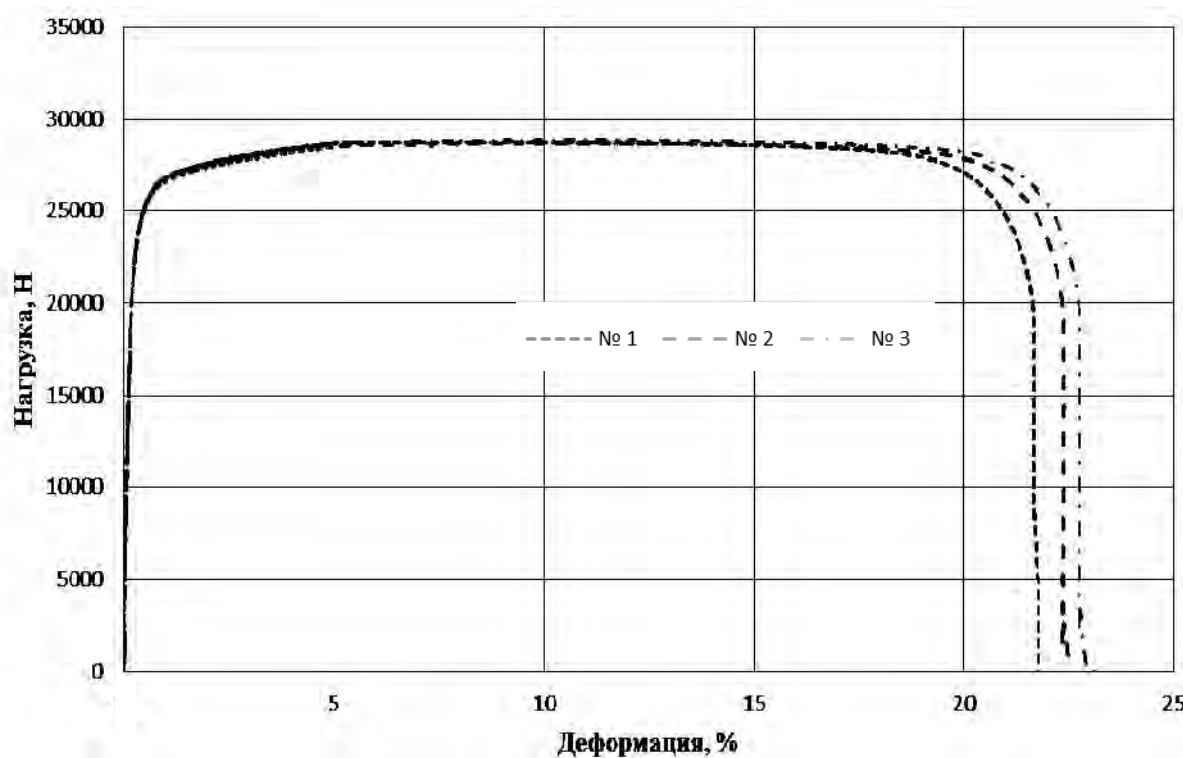


Рис. 5. Результаты испытаний образцов материала сталь EN 1.4003 из балок сечением $80 \times 40 \times 3$ мм

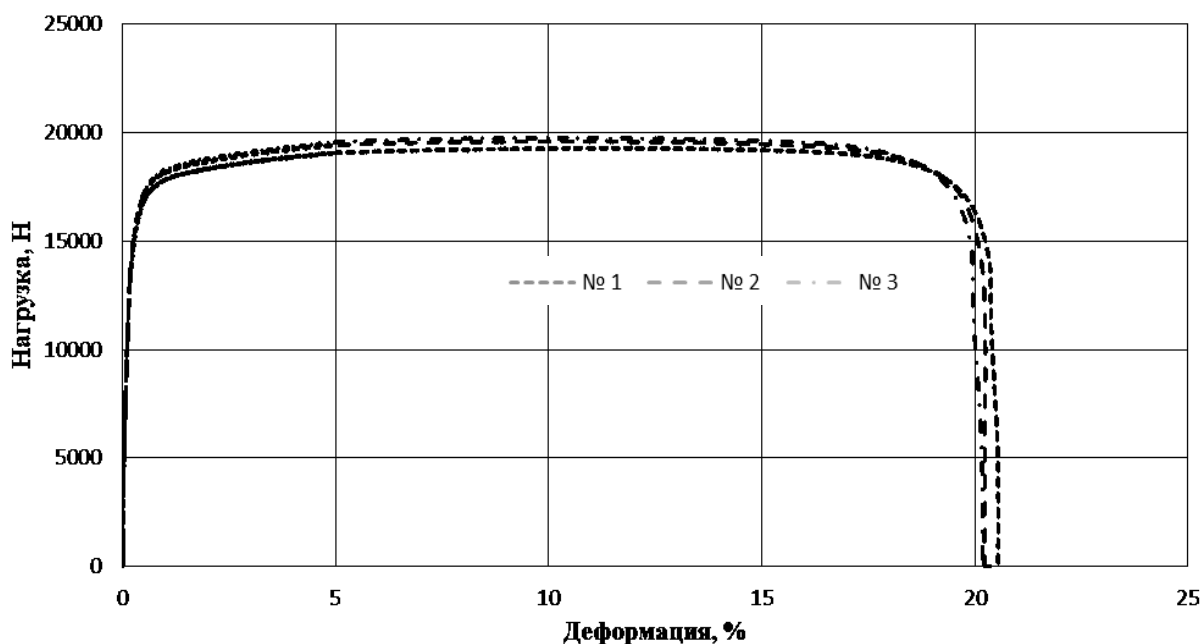


Рис. 6. Результаты испытаний образцов материала сталь EN 1.4003 из балок сечением 50 × 40 × 2 мм

Табл. 2. Результаты обработки измеренных значений механических характеристик материала сталь EN 1.4003 из балок сечением 80 × 40 × 3 мм

Номер образца	Модуль Юнга, МПа	Предел текучести 0,2 %, МПа	Предел прочности, МПа	Деформация при пределе прочности, %	Удлинение при разрыве, %
1	211504	433	459	11,8	21,6
2	212177	427	459	11,2	22,4
3	214010	419	462	13,0	22,8
\bar{x}	212564	426	460	12,0	22,3
S	1297,0	7,0	1,7	0,9	0,6

Табл. 3. Результаты обработки измеренных значений механических характеристик материала сталь EN 1.4003 из балок сечением 50 × 40 × 2 мм

Номер образца	Модуль Юнга, МПа	Предел текучести 0,2 %, МПа	Предел прочности, МПа	Деформация при пределе прочности, %	Удлинение при разрыве, %
1	213800	461	486	11,9	20,5
2	211432	456	492	11,4	20,2
3	210937	452	497	10,6	20,1
\bar{x}	212056	456	492	11,3	20,3
S	1530,2	4,5	5,5	0,7	0,2

Таким образом, по результатам эксперимента были получены значения условной деформации и условных напряжений. Механические характеристики балок сечением $50 \times 40 \times 2$ мм оказались выше, чем у балок сечением $80 \times 40 \times 3$ мм. Возможно, это связано с разными партиями поставки, из которых были получены балки, либо с особенностями технологии изготовления балок различного сечения. Так как согласно сертификату завода-изготовителя предел текучести стали EN 1.4003 составляет не менее 400 МПа, а предел прочности не менее 450 МПа, то результаты испытаний можно считать достоверными и использовать для дальнейших исследований.

Несущими балками каркаса автобуса являются балки сечением $80 \times 40 \times 3$ мм, поэтому идентификацию параметров следует выполнять для материала сталь EN 1.4003 по результатам испытаний образцов, полученных из балок данного сечения.

Идентификация параметров полилинейных моделей материалов каркаса автобуса

При моделировании пластического деформирования в программном комплексе LS-DYNA, реализующем метод конечных элементов, задаются истинные значения напряжений и остаточных пластических деформаций. Поэтому при обработке экспериментальных данных необходимо перейти от условных деформаций и напряжений к истинным. В результате пересчета следует учитывать факт локального образования шейки, активное формирование которой происходит на участке от предела прочности до момента разрушения. В этих целях предлагается использовать методику [3], где параметры для полилинейной модели материала идентифицируются по трем характерным точкам.

1. Упругий участок диаграммы.

Параметром является точка предела текучести:

$$\varepsilon_1 = \delta_T; \quad \sigma_1 = \sigma_T. \quad (1)$$

2. Участок пластического упрочнения. Параметром является точка, значение которой соответствует временному сопротивлению и началу образования шейки. Для данного параметра определяются истинные значения напряжения и деформации:

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

где σ_B – временное сопротивление, полученное в эксперименте; E – модуль Юнга, полученный в эксперименте; δ_B – условные деформации образца, соответствующие временному сопротивлению, полученные в эксперименте.

3. Участок образования шейки. Шейка образуется вплоть до разрушения образца, поэтому искомым параметром для этой стадии процесса деформирования будет являться точка со значением, соответствующим моменту разрушения:

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

$$\varepsilon_3 = \ln \left(\frac{1}{1 - \psi} \right) - \frac{\sigma_3}{E}, \quad (3)$$

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; ψ – относительное сужение образца.

Среднее нормальное напряжение в момент разрыва образца можно найти по формуле

$$\sigma_{\kappa} = \frac{P_{\max}}{A_u},$$

где P_{\max} – 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 фотоизображение образца после испытаний импортируется в графический редактор, позволяющий получить измерения соответствующих параметров. По фотоизображению определяются относительные геометрические параметры образца. Абсолютная величина одного из параметров (ширина наименьшего поперечного сечения шейки) находится путем прямого измерения при помощи измерительного инструмента (например, штангенциркуля), а неизвестный параметр – на основании составленной пропорциональной зависимости.

Для создания сглаженной кривой растяжения на участке от предела текучести до временного сопротивления определяются промежуточные точки. Согласно [3] для этого предлагается использовать следующую формулу при $\delta_0 = \delta_T$:

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

где δ_i – значение деформации i -го промежуточного параметра; δ_{i-1} – значение деформации промежуточного параметра, предшествующего i -му; n – количество промежуточных параметров.

Значения напряжений можно найти по экспериментальной диаграмме растяжения.

На рис. 7 представлена схематизация действий, задаваемых зависимостью (4). Обозначение a указывает на одинаковую разность между соседними величинами деформаций.

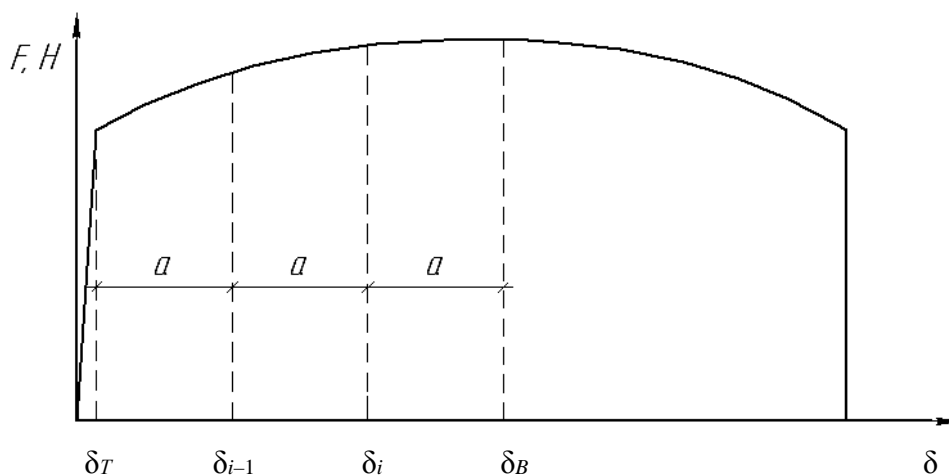


Рис. 7. Схема определения промежуточных параметров

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.

Параметры моделей материалов можно найти по зависимостям (1)–(4) вышеизложенной методики. На рис. 8 отображена процедура определения относительного значения радиуса кри-



визны контура шейки. Так как в данном случае линия разрыва образца проходит под углом к перпендикуляру продоль-

ной оси образца, то замер радиуса проводится с обеих сторон на явно выраженной зоне сужения.

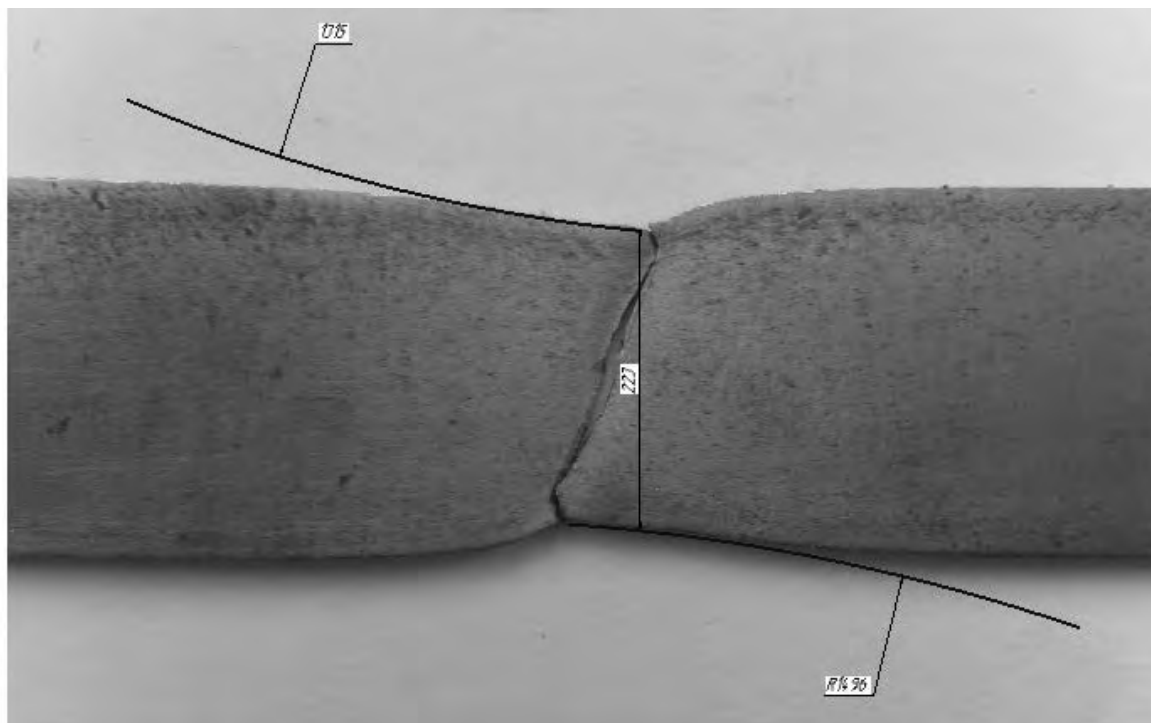


Рис. 8. Графическое определение радиуса кривизны контура шейки образца материала сталь EN 1.4003

Абсолютное среднее значение определено с помощью составленной пропорциональной зависимости.

$$R = \frac{900,5}{173} \cdot 2h = 5,205 \cdot 2h,$$

Для материала сталь EN 1.4003

где $2h$ – ширина образца в зоне шейки после испытаний.

Результаты идентификации представлены в табл. 4.

$$\frac{2h}{223} = \frac{R}{\left(\frac{1315+1496}{2}\right)};$$

Табл. 4. Идентифицированные параметры модели материала сталь EN 1.4003

Номер точки	1	2	3	4	5	6	7	8*
ϵ_i	0	0,030	0,051	0,071	0,091	0,111	0,718	0,8
σ_i , МПа	426	462	482	493	504	515	837	837

Примечание – * – восьмая точка задавалась для возможности продолжения решения по достижению предельной деформации



В программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS LS-DYNA PC (R800) была разработана твердотельная конечно-элементная модель образца материала, геометрические размеры ко-

торого соответствуют номинальным размерам образца. На рис. 9 приведена твердотельная конечно-элементная модель образца материала сталь EN 1.4003.



Рис. 9. Конечно-элементная модель образца материала сталь EN 1.4003

Разработанная в геометрическом редакторе ANSYS модель образца является составной. Конечно-элементная сетка на захватных участках и рабочей части генерировалась гексогональными элементами в размере 1 мм. Сетка на переходных участках с закруглениями имеет преимущественно гексогональные элементы с тетрагональными в проблемных зонах. Далее конечно-элементная модель образца из модуля ANSYS Explicit Dynamics (LS-DYNA Export) в формате *k*-файла передавалась в программу пре/постпроцессор LS-PrePost, где ей задавались свойства материала, расчетные параметры, прикладывались граничные условия и нагрузки, соответствующие экспериментальным.

Оценка достоверности определения параметров модели материала выполняется по соответствию зависимости нагрузки, возникающей в результате реактивного действия, от относительной

деформации образца, т. е. осуществляется переход к условным характеристикам материала, регистрируемым в ходе эксперимента. Так как полученные посредством расчета усилия соответствуют номинальным размерам образца, то их необходимо умножить на коэффициент площади поперечного сечения k_A , определяемый по формуле

$$k_A = \frac{A_{cp}}{A_{ном}}$$

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

Среднюю площадь поперечных сечений A_{cp} можно найти по выражению

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



где A_i – действительная площадь поперечного сечения i -го образца до испытаний; n – количество образцов.

На рис. 10 приведено графическое

сопоставление экспериментальных и расчетных данных для твердотельной модели образца.

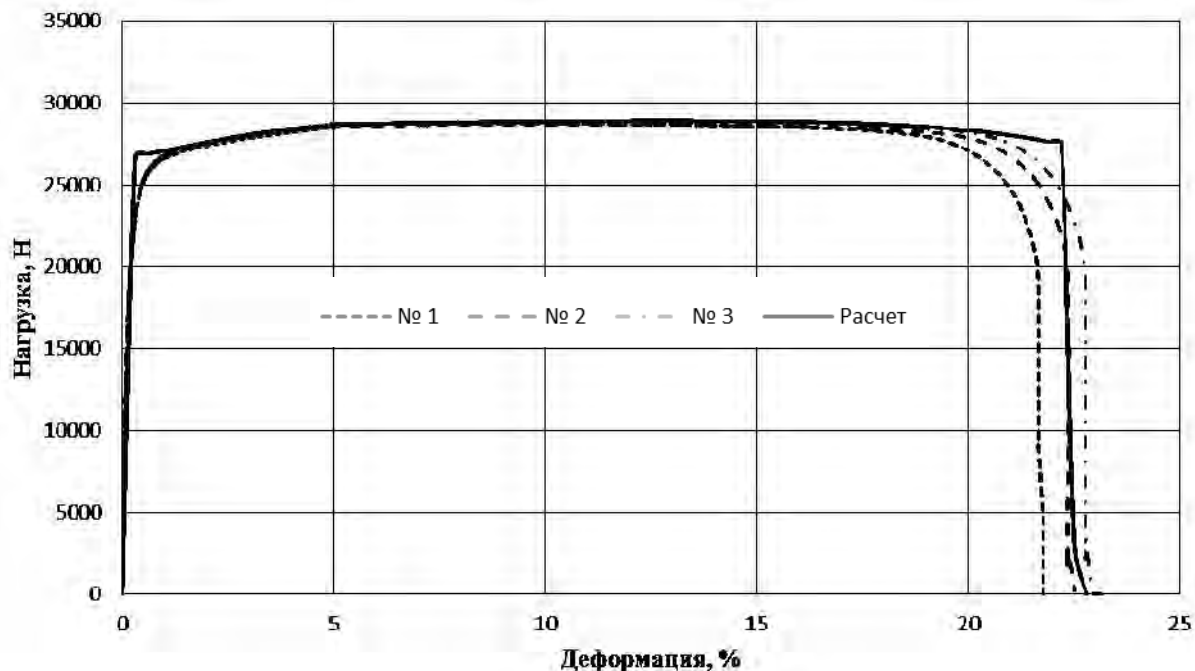


Рис. 10. Диаграммы растяжения образцов материала сталь EN 1.4003

Так как в расчете принимались средние значения механических характеристик материала, то сопоставление расчетной и экспериментальных диаграмм деформирования выполнялось по удлинению образца в момент разрушения, как имеющего наибольший относительный разброс по результатам эксперимента. Для исследуемого материала погрешность по данному критерию составила 0,4 %.

Следует отметить, что погрешность по оценке значения предела прочности находится в пределах 1 МПа, а расчетная кривая деформирования проходит по середине образованной группы экспериментальных кривых. Эти факты подтверждают принятые средние значения механических характеристик и высокую точность расчета.

Заключение

С помощью универсальной гидравлической испытательной машины INSTRON Satec 300LX и программного обеспечения BluehillLite проведены экспериментальные исследования механических характеристик образцов материала сталь EN 1.4003, применяемого в конструкции городского автобуса средней вместимости.

На основе результатов испытаний идентифицированы параметры модели материала сталь EN 1.4003. Полученные параметры модели данного материала приведены в табл. 5.

Проведена верификация полученных моделей в программном комплексе ANSYS LS-DYNA. Погрешность по относительному удлинению в момент разрыва для данной марки стали составила 0,4 %.



Табл. 5. Идентифицированные параметры полилинейной модели материала сталь EN 1.4003

Номер точки	1	2	3	4	5	6	7	8
ε_i	0	0,030	0,051	0,071	0,091	0,111	0,718	0,8
σ_i , МПа	426	462	482	493	504	515	837	837

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вашурин, А. С.** Разработка методики и оценка пассивной безопасности кузовов из многослойных панелей вахтовых автобусов : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.03 / А. С. Вашурин. – Н. Новгород, 2014. – 225 л.
2. **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. – Н. Новгород, 2015. – 189 л.
3. Определение параметров полилинейной модели материала и моделирование пластического деформирования балочных конструкций машин / А. В. Омелюсик, А. В. Шмелев, А. Г. Кононов, А. В. Рубцов // Механика машин, механизмов и материалов. – 2017. – № 2. – С. 19–27.

Статья сдана в редакцию 27 декабря 2017 года

Алексей Васильевич Шмелев, канд. техн. наук, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси. E-mail: shmeliiov.alexei@gmail.com.

Алексей Валерьевич Омелюсик, мл. науч. сотрудник, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси. E-mail: alexlifting@mail.ru.

Александр Геннадьевич Кононов, канд. физ.-мат. наук, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси. E-mail: a_g_kononov@mail.ru.

Aleksey Vasilyevich Shmeliiov, PhD (Engineering), Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: shmeliiov.alexei@gmail.com.

Aleksey Valeryevich Omelusik, junior researcher, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: alexlifting@mail.ru.

Aleksandr Gennadyevich Kononov, PhD (Physics & Mathematics), Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: a_g_kononov@mail.ru.