Наука и Образование МГТУ им. Н.Э. Баумана

Сетевое научное издание ISSN 1994-0408

УДК 620.172.251.22.001.57

Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 06. С. 1–17.

DOI: 10.7463/0616.0842395

Представлена в редакцию: 07.05.2016 Исправлена: 21.05.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

Идентификация параметров полилинейных моделей металлов, применяемых при численном моделировании процессов пластического деформирования и разрушения конструкций

Шмелев А. В.¹, Кононов А. Г.¹, Омелюсик А. В.^{1,*}

alexlifting@mail.ru

¹Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

В статье приведен краткий обзор моделей и критериев разрушения металлов, используемых при решении прикладных задач. Рассмотрены особенности описания механических свойств материалов при расчетах на основе метода конечных элементов. Предложена методика определения основных параметров модели материала МАТ PIECEWISE LINEAR PLASTICITY (024), используемой в программном комплексе LS-DYNA, по результатам механических испытаний образов металла. Практическая апробация методики выполнена на примере идентификации параметров модели материала сталь 40Х. Сопоставление результатов натурного и виртуального вариантов механических испытаний показало удовлетворительное их соответствие.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, модели материалов, механические характеристики, испыта-ние на растяжение, МКЭ, LS-DYNA

Введение

Прогрессирующая конкуренция заставляет предприятия искать пути решения комплексной задачи, с одной стороны – минимизации времени и средств на разработку новой техники, а с другой – обеспечения заданных технических и эксплуатационных характеристик. Одним из эффективных путей решения данной задачи является применение при проектировании современных компьютерных технологий, позволяющих проводить моделирование как реальных условий эксплуатации, так и аварийных ситуаций. Особое место виртуальные испытания занимают в автомобилестроении, так как при аварийных нагрузках несущие конструкции транспортных средств испытывают значительные пластические деформации, вплоть до разрушения. К тому же компьютерное моделирование позволяет

Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана

оценивать соответствие конструкций новой техники действующим Правилам ЕЭК ООН № 66, 29, 72 и др. без проведения натурных экспериментов.

С целью поиска эффективных решений и совершенствования конструкций методами компьютерного моделирования на практике применяются программные пакеты для моделирования быстропротекающих динамических процессов: LS-DYNA, ABAQUS, MSC Dytran, AutoDyna и другие. Одним из важных условий адекватности моделирования подобных процессов является использование моделей материалов, описывающих свойства с достаточной для инженерных расчетов достоверностью. Для машиностроительной отрасли в большей степени интерес представляют модели металлических материалов. Модели металлических материалов включают в себя параметры, которые необходимо определить из-за недостаточности результатов экспериментальных данных [1, 2]. В связи с этим актуальной является задача разработки методики идентификации параметров моделей металлических материалов, обеспечивающей необходимую для инженерных расчетов достоверность и простоту использования при решении прикладных задач.

1. Условные и истинные диаграммы деформирования материалов

Зачастую в инженерной практике и в справочных данных результаты испытаний материалов приводят в виде условных диаграмм деформирования, однако при расчетах напряженно-деформированного состояния конструкций с применением численных методов расчета исходные данные материалаов должны задаваться в виде истинных значений. На рис. 1 приведены условная и истинная диаграммы деформирования материала.



Рис. 1. Диаграммы деформирования материала: 1 – условная; 2 – истинная

Согласно [3] истинная деформация учитывает непрерывное изменение размеров образца в процессе деформирования:

$$e = \int_{l_0}^{l_{\kappa}} \frac{dl}{l} = \ln(\frac{l_{\kappa}}{l_0}),$$

где l_0 – начальная длина образца; l_{κ} – конечная длина образца.

Из условия постоянства объема при пластической деформации величина *е* может быть найдена по формулам:

$$e = \ln(\frac{l_{\kappa}}{l_0}) = \ln(\frac{F_0}{F_{\kappa}}) = \ln\left(\frac{1}{1-\psi}\right),$$
$$e = \ln(1+\delta),$$

где F_0 – начальная площадь поперечного сечения образца; F_{κ} – конечная площадь поперечного сечения образца. ψ – условное относительное сужение; δ – условное относительное удлинение.

Истинное напряжение может быть найдено по величине условного напряжения σ_δ также при допущении неизменности объема деформируемого материала:

$$\sigma_{\varepsilon} = \frac{P}{F} = \sigma_{\delta}(1+\delta),$$

где *P* – нагрузка; σ_{δ} – условное (инженерное) напряжение.

2. Основные модели материалов

В расчетных исследованиях, в зависимости от поставленных задач, используются модели различной сложности. В наиболее традиционных расчетах конструкций, требующих учета пластического поведения материала и допускающие наиболее упрощенное описание свойств, используется линейная аппроксимация диаграмм деформирования [4, 5]:

$$\sigma = \sigma_{\rm T} + E_{\rm T}(\varepsilon - \varepsilon_{\rm T}), \tag{1}$$

где $\sigma_{\rm T}$, $\varepsilon_{\rm T}$ – напряжение и деформация в начале текучести (предел текучести и деформация, соответствующая пределу текучести); $E_{\rm T}$ – модуль упрочнения в упруго-пластической области ($0 \le E_{\rm T} \le E$).

При ярко выраженном прогибе участка диаграммы вне упругой области (особенно для материалов со значительным упрочнением и с площадкой текучести) используется полигональная аппроксимация. Для этого случая (с равными интервалами по деформации) в интервале деформаций $\varepsilon_n \le \varepsilon \le \varepsilon_{n+1}$ получается [4, 6]:

$$\sigma = \sigma_{n} + \frac{\sigma_{n+1} - \sigma_{n}}{\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_{n}} (\varepsilon - \varepsilon_{n}) = a_{n} - b_{n} \varepsilon_{n}$$

где *a*_n, *b*_n – параметры диаграммы деформирования.

Наряду с линейной моделью описания свойств материала в неупругой области широкое распространение получила степенная аппроксимация диаграммы деформирования [5, 7]:

$$\sigma = \sigma_{\rm T} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\rm T}}\right)^m,\tag{2}$$

где *m* – характеристика упрочнения материала в упругопластической области (0≤*m*≤1).

Степенное уравнение Рамберга-Осгуда [4]:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + K \sigma^n,$$

где *К* и n – постоянные материала ($n \ge 1$).

Наряду с использованием абсолютных значений напряжений и деформаций в расчетах применяются относительные значения:

$$\overline{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_{\rm T}}; \quad \overline{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\rm T}}$$

Уравнения (1) и (2) принимают вид [4]:

$$\overline{\sigma} = 1 + \overline{E}_{\mathrm{T}}(\overline{\varepsilon} - 1),$$
$$\overline{\sigma} = \overline{\varepsilon}^{m},$$

где \overline{E}_{T} – относительный модуль упрочнения $\overline{E}_{T} = \frac{E_{T}}{E}$.

При решении более комплексных прикладных задач механики деформируемого твердого тела, таких как определение высокотемпературного напряженного состояния режущих элементов, деформации тел при соударении на околозвуковых скоростях и т.д., используются модели, учитывающие дополнительные факторы. В основу таких моделей положены соотношения теории течения, для которых принимается условие совпадения пластического потенциала с критерием пластичности (ассоциированные теории упругопластического течения). Ниже представлены наиболее распространенные модели такого типа [1, 2, 8, 9]:

Модель Джонсона-Кука (Johnson-Cook):

$$\sigma_{i} = (C_{1} + C_{2}(\varepsilon^{p})^{n}) \left(1 + C_{3} \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{0}}\right)\right) \left(1 - \frac{T}{T_{\Pi \Pi}}\right)^{m},$$
(3)

где σ_i – интенсивность напряжений на поверхности текучести; ε^p – интенсивность накопленной пластической деформации; $\dot{\varepsilon}_0$ – скорость деформации, при которой определены параметры модели C_1 , C_2 , n, C_3 ; T – текущая температура, рассчитываемая из условия перехода энергии, рассеянной при пластическом деформировании, в тепловую энергию; $T_{пл}$ – температура плавления; m – параметр модели.

Модель Стейнберга-Гунана (Steinberg-Guinan):

$$\sigma_{i} = \sigma_{i0} \left(1 - \frac{T - T_{0}}{T_{\Pi \pi} - T_{0}} \right)^{\alpha} \left(1 + C_{1} \varepsilon^{p} \right)^{\frac{1}{n}} \left(1 + C_{2} \dot{\varepsilon}_{p} \right)^{\frac{1}{m}},\tag{4}$$

где σ_{i0} – интенсивность напряжений на поверхности текучести при температуре T_0 ; α , C_1 , C_2 , n, m – параметры модели.

Модель Зерилли–Армстронга (Zerilli-Armstrong):

Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана

$$\sigma_i = C_0 + C_1 \exp(-C_2 T + C_3 T \ln \dot{\varepsilon}) + (C_4 \varepsilon^p)^n,$$
(5)

где *C*₀, *C*₁, *C*₂, *C*₃, *C*₄, *n* – параметры модели; *ἑ* – скорость деформации.

Модель Купера–Саймондса (Cowper-Symonds):

$$\sigma_i = k(\varepsilon^{\rm p})^n \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{c}\right)^{\frac{1}{q}} \right],\tag{6}$$

где σ_i – напряжение на динамической поверхности текучести; *k*, *n*, *C*, *q* – константы материала.

Модель Гурсона-Твергарда (Gurson-Tvergaard):

$$\left(\frac{\sigma_{i}(\varepsilon^{p})}{\sigma_{i0}}\right)^{2} + 2q_{1}f^{*}ch\left[\frac{q_{2}(\sigma_{1}+\sigma_{2}+\sigma_{3})}{2\sigma_{i}\varepsilon^{p}}\right] - 1 - (q_{1}f^{*})^{2} = 0.$$
(7)

Ассоциированный закон течения для потенциала в форме (7) формулируется в полном пространстве напряжений. В этом заключается отличие от потенциалов (3) – (6), в которых для закона течения использовалось девиаторное подпространство напряжений и, следовательно, тензор скорости пластических деформаций являлся девиатором.

В качестве параметров разрушения материала используются скалярные величины, представляющие собой эквивалентные напряжения, либо эквивалентные деформации, либо комбинации величин. Условием наступления разрушения является достижение указанными параметрами критических значений, которым на диаграмме деформирования соответствует состояние разрушения.

Критические значения эквивалентного напряжения, либо эквивалентной деформации, характеризующие состояние разрушения на диаграмме деформирования зависят от величины скорости деформаций и параметра жесткости напряженного состояния. Следовательно, корректные, то есть согласующиеся с экспериментальными фактами, критерии нарушения прочности (разрушения) материала должны зависеть от двух или трех параметров. Такие двух или трехпараметрические математические модели динамического разрушения являются наиболее перспективными для использования в прикладных расчетах в составе современных расчетных комплексов. Однако для большинства инженерных расчетов в качестве скалярного параметра, контролирующего состояние разрушения, рекомендуется использовать эквивалентную деформацию ε_3 [10, 11].

В программных комплексах при расчете несущих конструкций автомобилей указываются основные характеристики металлов – это модуль упругости, предел текучести, модуль упрочнения при необходимости, значения деформаций и соответствующие им напряжения.

На сегодняшний день, благодаря своей широкой базе встроенных моделей материалов, большую популярность в области явного моделирования приобрел программный комплекс LS-DYNA (компания LSTC, США). В нем используются модели материалов различной сложности. Простые модели, типа билинейной, требуют минимального количества параметров, но являются наименее достоверными. Сложные модели, в том числе и основанные на уравнениях (3) – (7), включают в себя параметры, определить которые затруднительно из-за необходимости проведения специализированных, трудоемких и дорогостоящих экспериментов. Результаты наблюдений [2] показывают, что при динамическом нагружении конструкций транспортных средств можно допустить независимость деформации материала от скорости и температуры. В связи с этим, для решения данного типа задач целесообразным является использование распространенной полилинейной модели материала *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (024), основными параметрами которой являются [12]: плотность, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, предел текучести, критерий разрушения, значения эффективной пластической деформации и соответствующие им напряжения.

Как было упомянуто выше, при расчете напряженно-деформированного состояния конструкций для модели *MAT_024 характеристики материала в пластической области должны задаваться в виде истинных значений, которым соответствуют эквивалентные напряжения по Мизесу и эфективная пластическая деформация. Следует помнить, что экспериментальные данные всегда включают в себя некоторую степень ошибки и, следовательно, имеют тенденцию к зашумленности или неустойчивости. Поэтому при использовании модели *MAT_024 необходимо задавать сглаженную зависимость напряжение-деформация с минимальным количеством точек.

3. Идентификация параметров моделей материала по результатам экспериментальных исследовавний

В LS-DYNA задаются истинные значения напряжений и остаточных пластических деформаций. Поэтому при обработке эксперементальных данных сначала необходимо перейти от условных деформаций и напряжений к истинным. В результате пересчета получается зависимость, не учитывающая факт локального образования шейки, активное формирование которой происходит на участке от предела прочности до момента разрушения. Для устраннеия данного недостатка предлагается кривую деформирования разбить на три характерных участка, и для каждого участка определить ключевые точки.

1. Упругий участок диаграммы. Оканчивается в точке, значение которой соотствуют пределу текучести:

$$\epsilon_1 = \sigma_T,$$
(8)

 $\sigma_1 = \sigma_T.$

2. Участок пластического упрочнения. Заканчивается в точке, значение которой соответствуют временному сопротивлению и началу образование шейки. Для данной точки определяем истинные значения напряжения и деформации [3]:

$$\sigma_{2} = \sigma_{B}(1 + \delta_{B}), \qquad (9)$$
$$\varepsilon_{2} = \ln(1 + \delta_{B} - \frac{\sigma_{B}}{F}),$$

где $\sigma_{\rm B}$ – временное сопротивление, полученное в эксперименте; *E* – Модуль Юнга, полученный в эксперименте; $\delta_{\rm B}$ – инженерные деформации образца, соответствующие временному сопротивлению, полученные в эксперименте.

3. Участок образования шейки. Шейка образуется вплоть до разрушения образца, поэтому окончанием данного участка будет точка со значениями, соответсвующими моменту разрушения [5]:

$$\sigma_{3} = \frac{P_{\kappa}}{\pi r_{1}^{2} \left(1 + \frac{r_{1}}{4R}\right)},$$

$$\epsilon_{3} = \ln\left(\frac{1}{1 - \psi} - \frac{\sigma_{\kappa}}{E}\right),$$
(10)

где $P\kappa$ – значение нагрузки в момент разрушения; r1 — радиус наименьшего поперечного сечения шейки; R — радиус кривизны контура шейки в точке наименьшего поперечного сечения В случае испытаний плоских образцов σ_3 можно определить по уравнению Остсемина [13].

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 (диаметр рабочей части) находится путем прямого измерения при помощи штангенциркуля, а неизвестный параметр находится на основании составленной пропорциональной зависимости.

4. Пример апробации предложенной методики для образцов стали 40Х

Были проведены испытания круглых обрацов стали 40Х, изготовленных согласно ГОСТ 1497-84 Методы испытаний на растяжение. Апорбация предложенной методики проводилась для одного образца, диаметр и длина рабочей части которого 9,90 и 75,00 мм. соответственно.

Испытания по определению механических свойств проводилось на универсальной гидравлической испытательной машине INSTRON Satec 300LX. Точность измерения нагрузки составляла не менее 0,5% от измеряемого значения. Для регистрации деформаций использовался экстензометр INSTRON 2630-107 GL25MM.

На рис. 2 приведено фото образца в ходе испытаний.



Рис. 2. Процесс испытаний (приложение нагрузки, измерение деформаций)

На рис. 3 приведено фото испытанного образца.



Рис. 3. Образец после испытаний

Значения установленных механических свойств приведены в табл. 1.

Модуль	Предел	Предел	Деформация при	Удлинение при	Относитель-
Юнга	текучести	прочности	пределе прочности	разрыве (%)	ное сужение
(GPa)	0,2% (MPa)	(MPa)	(%)		(%)
214	481	804	9,6	15,9	57,1

Таблица 1. Мехнические характеристики образца стали 4	40X
---	-----

По результатам эксперимента были получены значения изменения усилий, условной деформации, условных напряжений и перемещений.

Предварительные параметры модели материала определялись по зависимостям (8) – (10) вышеизложенной методики. На рис. 4 приведена процедура определения относительного значения радиуса кривизны контура шейки.



Рис. 4. Графическое определение радиуса кривизны контура шейки

Абсолютное значение определено с помощью составленной пропорциональной зависимости:

$$\frac{D_1}{479,21} = \frac{R}{168,56},$$

$$R = \frac{168,56}{479,21} \cdot D_1 = 0,352D_1$$

Результаты идентификации представлены в табл. 2.

Таблица 2. Предварительные параметры модели материала стали 40Х

№ точки	Пластическая деформация	Эквивалентное напряжение, МПа
1	0,0000	480
2	0,0898	882
3	0,8340	1020
4 ¹	1,0000	1020

1 – четвертая точка задавалась для возможности продолжения решения по достижению предварительной предельной деформации.

5. Компьютерное моделирование натурного эксперимента

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

параметры которой соответвуют испытанному образцу. На рис. 5 приведена конечноэлементная модель образца материала.



Рис. 5. Конечно-элементная модель образца материала

Конечно-элементная модель образца в формате k-файла передавалась для задания свойств материала и расчетных параметров в программу пре/постпроцессор LS-PrePost. Графическое отображение заданных предварительных параметров модели материала приведено на рис. 6



Рис. 6. Графическое отображение заданных предварительных параметров модели материала

Далее к образцу прикладывались граничные условия и нагрузки, соответствующие экспериментальным.

6. Сопоставление результатов эксперимента и моделирования

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 характеристи-

кам материала, регистрируемым в ходе эксперимента. На рис. 7 приведено графическое сопоставление экспериментальных и расчетных данных.



Рис. 7. Диаграмма деформирования образца Стали 40Х: 1 – экспериментальные данные образца; 2 – расчет в LS-DYNA по сформированным параметрам модели материала *Mat 024

Результаты сопоставления расчетной и экспериментальной диаграммы деформирования стали 40Х, выполненного по оценке базовых показателей, приведены в табл. 3.

Нанманаранна нараматра	Значение		Относительная
паименование параметра	эксперимент	расчет	погрешность, %
Максимальная нагрузка, Н	61919	61469	0,7
Нагрузка в момент разрушения, Н	43200	42905	0,7
Удлинение при разрыве, %	15,91	16,3	2,4

Таблица 3. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных

При этом из рис. 7 видно, что до деформации, соответствующей временному сопротивлению, значения расчетных и экспериментальных существенно отличаются. С целью исключения этого нежелательного факта проводилось уточнение исходных данных модели путем указания дополнительных точек зависимости напряжение-деформация. Значение дополнительных точек определялось по уравнениям (9). Уточненные параметры модели материала стали 40Х приведены в табл. 4.

№ точки	Пластическая деформация	Эквивалентное напряжение, МПа
1	0,0000	480
2	0,0230	720
3	0,0359	780
4	0,0650	860
5	0,0900	882
6	0,5000	980
7	0,9000	1000
8	1,0000	1020

Таблица 4. Уточненные параметры модели материала стали 40Х

На рис. 8 представлено графического отображение заданных уточненных параметров модели материала.



Рис. 8. Графическое отображение заданных уточненных параметров модели материала

На рис. 9 приведена диагармма деформирования образца Стали 40Х, полученная после уточнения параметов модели материала.



Рис. 9. Диаграмма деформирования образца Стали 40Х: 1 – экспериментальные данные образца; 2 – расчет в LS-DYNA по уточненным параметрам модели материала *Mat_024

Как видно из рисунка 9, результат моделирования характеристик стали 40Х показывает высокую сходимость с результатами натурных экспериментов. Погрешность максимальной нагрузки, нагрузки в момент разрушения и относительного удлинения составила 0,7, 0,7 и 2,4 % соответственно, а уточнение параметров модели на участке от предела текучести до временного сопротивления позволило сделать кривую деформирования более пологой и повысить точность расчетов.

Заключение

Разработанная методика идентификации параметров моделей материалов может успешно использоваться при компьютерном моделировании процессов пластического деформирования и разрушения машиностроительных конструкций. Дальнейшее ее совершенствование может быть достигнуто путем разработки статистического подхода к обработке результатов серий испытаний, что позволит получать некую условную диаграмму растяжения материала, обеспечивающую запас прочности или гарантии требуемых прочностных свойств изделий и конструкций.

Планируются дальнейшие работы по развитию методики в части применения более сложных моделей, учитывающих температуру, скорость деформации и другие факторы.

Список литературы

- 1. Садырин А.И. Компьютерные модели динамического разрушения конструкционных материалов: Учебно-методическое пособие. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2010. 35 с.
- 2. Форенталь М.В. Динамика деформирования и разрушения пластин при высокоскоростном нагружении ударником со сложной структурой: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 2010. 174 с.
- Лопатина Е.С., Ковалева А.А., Аникина В.И. Механические свойства металлов: Конспект лекций. Красноярск, 2008. 192 с. Режим доступа: <u>http://files.lib.sfukras.ru/ebibl/umkd/1822/u lectures.pdf</u> (дата обращения 12.11.2015).
- 4. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник / под. ред. К.В. Фролова. М.: Машиностроение, 1985. 224 с.
- 5. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести: Учебник / под. ред. В.Л. Данилова. М.: Машиностроение, 1975. 400 с.
- 6. Биргер И.А. Сопротивление материалов: Учебник / под. ред. Н.П. Рябенькой. М.: Наука, 1986. 560 с.
- 7. Потапова Л.Б., Ярцев В.П. Механика материалов при сложном напряженном состоянии. М.: Издательство Машиностроение – 1, 2005. 244 с.
- Su Hao, Wing Kam Liu, Chin Tang Chang Computer implementation of damage models by finite element and meshfree methods // Computer methods in applied mechanics and engineering. 2000. № 187. P. 401-440. DOI: 10.1016/S0045-7825(00)80003-1
- 9. Кузькин В.А., Михалюк Д.С. Применение численного моделирования для идентификации параметров модели Джонсона-Кука при высокоскоростном деформировании алюминия // Вычислительная механика сплошных сред, 2010. Т. 3. № 1. С. 32-43.
- 10. Лебедев А.А., Чаусов Н.Г., Богданович А.З. Оценка предельных повреждений в материалах при статическом нагружении с учетом вида напряженного состояния // Проблемы прочности. 2002. № 2. С. 35-40.
- 11. Чаусов Н.Г., Лебедев А.А., Богданович А.З. О предельной поврежденности материала в зоне концентратора // Проблемы прочности. 2002. № 6. С. 31-37.
- 12. LS-Dyna keyword user's manual. Vol.1. Livermore Software Technology Corporation, 2007. 2206 p.
- 13. Остсемин А.А. К анализу напряженного состояния в эллиптической шейке образца при растяжении // Проблемы прочности. 2009. № 4. С. 19-28.

Science Education

Electronic journal

Science and Education of the Bauman MSTU, 2016, no. 06, pp. 1–17.

DOI: 10.7463/0616.0842395

Received:	07.05.2016
Revised:	21.05.2016

© Bauman Moscow State Technical Unversity

Parameter Identification of Piecewise Linear Plasticity Metal Models Used in Numerical Modeling of Structures Under Plastic Deformation and Failure

A.V. Shmeliov¹, A.G. Kononov¹, A.V. Omelusik^{1,*}

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

Keywords: computer modeling, materials model, mechanical properties, tensile tests, FEA, LS-DYNA

The article describes the models of metallic materials used in the calculation of deformation and destruction of engineering structures. The reliability of material models can adequately assess the strength characteristics of the designs of new technology in its designing and certification.

The article deals with contingencies and true mechanical properties of materials and presents equations of their relationship. It notes that in the software systems mechanical characteristics of materials are given in the true sense.

The paper considers the linear and exponential models of materials, their characteristics, and methods to implement them. It considers the models of Johnson-Cook Steinberg-Guinan, Zerilli-Armstrong, Cowper-Symonds, Gurson-Tvergaard that take into account the strain rate and temperature of the material. Describes their applications, advantages and disadvantages. Considers single- and multi-parameter criteria of materials fracture, the prospects for their use. Gives a rational justification for using a piecewise linear plasticity material model *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (024), LS-DYNA software package for the engineering industry, and presents its main parameters.

A technique to identify parameters of piecewise linear plasticity metal material models has been developed. The technique consists of the stages, based on the equations of transition from the conventional stress and strain values to the true ones. Taking into consideration the stressstrain state in the neck of the sample is a distinctive feature of the technique.

Tensile tests of the round material samples have been conducted. To test the developed technique in the software package ANSYS LS-DYNA PC have been made tensile sample modeling and results comparison to show high convergence.

alexlifting@mail.ru

Further improvement of the technique can be achieved through the development of a statistical approach to the analysis of the results of a series of tests. This will allow a kind of conditional diagram of material tension that provides a safety margin or ensures the required strength properties of products and designs. There are also plans for further work to develop techniques in terms of using the more complex models that could take into account the temperature, strain rate and other factors.

References

- 1. Sadyrin A.I. *Komp'yuternye modeli dinamicheskogo razrusheniya konstruktsionnykh materialov* [Computer models of dynamic fracture of structural materials]. Nizhny Novgorod, Nizhegorodskii gosuniversitet, 2010. 35 p. (in Russian).
- 2. Forental M.V. *Dinamika deformirovaniya i razrusheniya plastin pri vysokoskorostnom nagruzhenii udarnikom so slozhnoi strukturoi : dis. ... kand. tekhn. nauk.* [The dynamics of deformation and fracture of the plates under high loading drummer with a complex structure. Cand. diss.]. Cheliabinsk, 2010. 174 p. (in Russian).
- Lopatin E.S., Kovaleva A.A., Anikina V.I. *Mekhanicheskie svoistva metallov. Konspekt lektsii*. [Mechanical properties of metals. Lecture notes]. Krasnoyarsk, 2008, 192 p. Available at: <u>http://files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/1822/u_lectures.pdf</u>, accessed 11.12.2015. (in Russian).
- Kogaev V.P., Makhutov N.A., Gusenkov A.P. Raschety detalei mashin i konstruktsii na prochnost' i dolgovechnost': Spravochnik [The calculations of machine parts and structures for strength and durability: Directory]. Frolov K.V. ed.. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 224 p. (in Russian).
- 5. Malinin N.N. *Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti*. [Applied theory of plasticity and creep]. Danilova V.L. ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 400 p. (in Russian).
- 6. Birger I.A. *Soprotivlenie materialov*. [Strength of materials]. Ryaben'kaya N.P. ed. Moscow, Nauka Publ., 1986. 560 p. (in Russian).
- Potapova L.B., Yartsev V.P. *Mekhanika materialov pri slozhnom napryazhennom sostoyanii*. [Mechanics of materials under complex stress states]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2005. 244 p. (in Russian).
- Su Hao, Wing Kam Liu, Chin Tang Chang Computer implementation of damage models by finite element and meshfree methods. *Computer methods in applied mechanics and engineering*. 2000. no.187. pp. 401-440. DOI: 10.1016/S0045-7825(00)80003-1
- Kuzkin V.A., Mikhailyuk D.S. Application of numerical simulation for identification of Johnson-Cook material model parameters for aluminum under high-speed loading. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred=Computational Continuum Mechanics*, 2010, Vol. 3, no. 1. pp. 32-43. (in Russian).
- Lebedev A.A., Chausov N.G., Bogdanovich A.Z. Assessment of the Ultimate Damage to Statically Loaded Materials with Account of the Type of the Stress State. *Problemy prochnosti=Strength of vaterials*. 2002. no. 2. pp. 35-40. (in Russian).

- Chausov N.G., Lebedev A.A., Bogdanovich A.Z. On the Ultimate Damage to a Material in the Stress Concentrator Zone. *Problemy prochnosti=Strength of vaterials*, 2002. no. 6. pp. 31-37. (in Russian).
- LS-Dyna keyword user's manual. Vol.1. Livermore Software Technology Corporation, 2007.
 2206 p.
- 13. Ostsemin A.A. On the Stressed State Analysis in a Specimen Elliptic Neck in Tension.. *Problemy prochnosti=Strength of vaterials*, 2009, no. 4, pp. 19-28. (in Russian).