

УДК 539.3

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕДИ
ДЛЯ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ УДАРА**

© 2014 г.

А.Ю. КонстантиновНижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского
ОАО «ГосНИИмаш», г. Дзержинск

constantinov.al@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.09.2013

На примере меди осуществлено математическое моделирование поведения материала при высокоскоростном деформировании, при этом особое внимание уделяется адиабатичности этого процесса. Описана процедура подготовки динамических экспериментальных диаграмм деформирования для идентификации математических моделей, описывающих упруго-пластические свойства конструкционных материалов. В качестве примера проводится идентификация модели Джонсона–Кука для меди М1. Полученная модель верифицируется с использованием результатов специального натурального эксперимента, показано хорошее качественное и количественное совпадение результатов испытания и расчетов.

Ключевые слова: динамическое деформирование, напряжение течения, адиабатический разогрев, модель материала, скоростное упрочнение, температурное разупрочнение, пластическая деформация, идентификация, верификация.

Введение

В настоящее время численное моделирование стало неотъемлемой частью проектирования новых изделий. Для решения задач динамики удара и анализа быстропотекающих процессов широко используются такие программные продукты как LS-DYNA, ABAQUS, AUTODYN, «Динамика-2», «Динамика-3». Каждый из этих комплексов имеет в своем арсенале несколько численных методов, что позволяет решать достаточно широкий спектр проблем. Следует, однако, понимать, что достоверность полученного с использованием компьютерного моделирования решения во многом определяется математическими моделями, описывающими поведение материалов, поэтому задача построения качественных определяющих соотношений является актуальной и обоснованной.

Необходимо отметить следующие особенности деформирования металлов при высокоскоростном нагружении: влияние скорости деформации на диаграмму и локальный адиабатический разогрев материала. Известно [1], что динамические диаграммы деформирования могут существенно отличаться от статических, поэтому для получения достоверных результатов численного моделирования необходимо использовать математические модели, учитывающие влияние скорости деформации на деформационные и прочностные характеристики материала.

Так, для теории течения, широко используемой во многих расчетных комплексах, необходимо вводить зависимость радиуса поверхности текучести, кроме всего прочего, от скорости деформации. Кроме того, процессы ударного или взрывного нагружения происходят так быстро и сопровождаются такими интенсивными локализованными деформациями, что тепло, выделяемое за счет работы пластического деформирования, не успевает отводиться, что приводит к температурному разупрочнению материала в зоне активного деформирования и еще большей локализации деформаций. Следовательно, математическая модель должна учитывать и температурные эффекты разупрочнения. Для получения достоверных моделей поведения материалов в настоящее время широко используется экспериментально-теоретический подход [2].

**Математические модели
динамического деформирования**

В практике численного моделирования наибольшей популярностью пользуются эмпирические определяющие соотношения, в которых радиус поверхности текучести представляется некоей функцией деформации ε , скорости деформации $\dot{\varepsilon}$ и температуры T :

$$\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T).$$

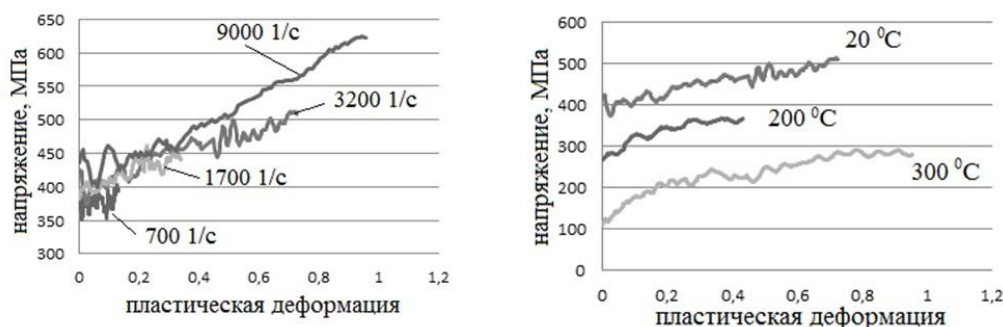


Рис. 1. Полученные с использованием метода Кольского диаграммы деформирования меди

Чаще всего используют упрощенную аддитивную или мультипликативную форму этой функции:

$$\sigma = f_1(\varepsilon, T),$$

$$\sigma = f_1(\varepsilon, T)f_2(\dot{\varepsilon}, T)f_3(T) + f_2(\dot{\varepsilon}, T).$$

В большинстве моделей эффекты скоростного упрочнения и температурного разупрочнения считаются независимыми и представляются отдельными множителями:

$$\sigma = f_1(\varepsilon)f_2(\dot{\varepsilon})f_3(T).$$

Детальный обзор математических моделей для задач высокоскоростного деформирования приводится в работе [3]. Как правило, функция f_1 представляет собой линейную комбинацию степенных и/или экспоненциальных функций от ε [4].

Предложены разные формы температурного множителя f_3 [4]:

$$1 - C(T - T_0), \quad 1 - \left[\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right]^m, \quad \exp \left[-C \frac{(T - T_0)}{T_m} \right].$$

Самой распространенной моделью, применяемой в динамических расчетах, является модель Джонсона–Кука [5]:

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n) \left(1 + C \ln \dot{\varepsilon} \right) \left(1 - T^{*m} \right), \quad T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0}. \quad (1)$$

Здесь σ – мгновенный радиус поверхности текучести, T_m – температура плавления, T_0 – начальная температура, T – текущая температура, ε_p – пластическая деформация, $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации. Предложено несколько вариантов множителя модели Джонсона–Кука, отвечающего за влияние скорости деформации:

$$1 + C \ln(\dot{\varepsilon}^*) + C_2 \ln(\dot{\varepsilon}^*)^2, \quad (\dot{\varepsilon}^*)^C, \quad 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}^*}{C} \right)^p$$

(см. [6], [7], [8] соответственно).

Для оценки разогрева материала при пластическом деформировании используется зависимость [1]

$$\Delta T = \frac{\beta W_p}{\rho c_p}, \quad (2)$$

где ΔT – приращение температуры материала, W_p – работа пластического деформирования, ρ – плотность, c_p – удельная теплоемкость материала, β – доля механической энергии, переходящей в тепло ($\beta = 0.9$ в условиях адиабатического деформирования, $\beta = 0$ в изотермических условиях). Переход изотермического режима деформирования в адиабатический для разных материалов происходит при разных скоростях деформации, однако, анализируя работы [3, 4], можно сделать вывод, что начиная со скорости деформации 10 с^{-1} материал деформируется в адиабатических условиях. Математические модели для коэффициента β как функции скорости деформации $\beta = f(\dot{\varepsilon})$ предложены в работах [9, 10].

Экспериментальное исследование высокоскоростного деформирования меди М1

В предлагаемой работе для определения динамических диаграмм деформирования меди М1 в условиях высокоскоростного сжатия для нескольких скоростей деформаций и температур 20, 200 и 300 °C использовался известный метод Кольского [11]. Образцы в форме таблеток $\varnothing 7.5 \text{ мм}$ изготавливались из прутка $\varnothing 20 \text{ мм}$. На рисунке 1 слева показаны кривые, полученные при разных скоростях деформации и при комнатной температуре, справа – диаграммы, полученные при скорости деформации $\sim 4000 \text{ с}^{-1}$ и разных температурах.

Видно, что в исследованном диапазоне скорость деформации слабо влияет на напряжение течения, в то время как увеличение температуры до 300 °C уменьшает предел текучести практически в четыре раза.

Для описания экспериментальных данных была выбрана модель Джонсона–Кука в форме

Таблица 1

Механические характеристики меди

Характеристика	Значение	Размерность		Характеристика	Значение	Размерность
T_m	1355	К		E	110	ГПа
ρ	8930	кг/м ³		ν	0.31	
C_p	384.2	Дж/(кг К)				

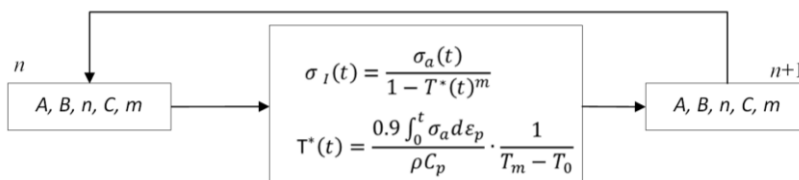


Рис. 2. Итерационная схема корректировки диаграмм деформирования

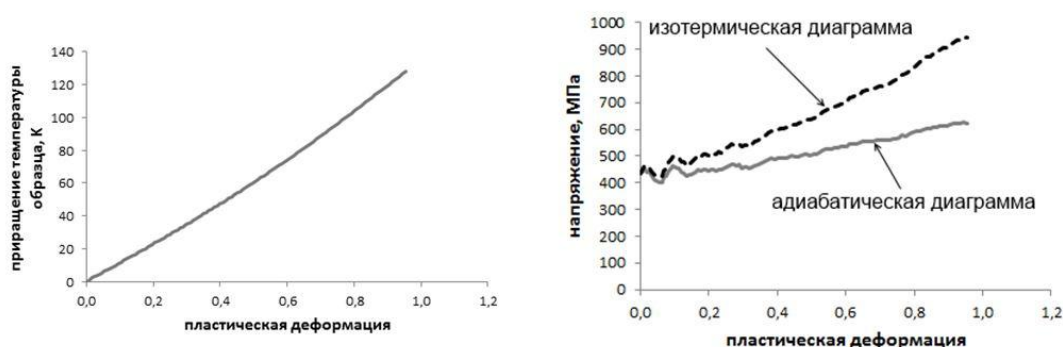


Рис. 3. Изменение температуры образца в процессе высокоскоростного сжатия (слева). Адиабатическая и изотермическая кривые деформирования (справа)

Таблица 2

Постоянные модели Джонсона–Кука для нескольких итераций

итерация	A, МПа	B, МПа	n	C	m
0 (адиаб.)	265	106	1.065	0.0645	0.64
1	285	269	1.284	0.057	0.58
2	300	318	1.27	0.049	0.576
3	302	326	1.27	0.047	0.574

(1). Механические свойства меди приводятся в таблице 1.

Диаграммы деформирования, полученные при высоких скоростях деформации, являются адиабатическими, поэтому для описания этих данных моделью, в которой эффект температурного разупрочнения выделен в явном виде, требуется проводить корректировку. Слева на рис. 3 представлено рассчитанное по формуле (2) приращение температуры образца в процессе высокоскоростного сжатия. Видно, что образец при испытании нагревается более чем на 120°C. Для восстановления изотермических кривых в работе применяется итерационная процедура, схема которой показана на рисунке 2.

Суть процедуры состоит в следующем: вначале определяются параметры модели для адиабатических кривых. Множитель, характеризующий температурное разупрочнение, использу-

ется для исключения температурной составляющей из диаграмм деформирования, полученных в адиабатических условиях (рис. 3, справа).

Кривые первой итерации позволяют уточнить константы математической модели. Затем процедура повторяется с использованием нового температурного множителя, и так далее до тех пор, пока параметр m , отвечающий за температурное разупрочнение, с определенной точностью перестает меняться при переходе к следующей итерации. Константы модели Джонсона–Кука, полученные на разных итерациях процедуры корректировки, приводятся в таблице 2.

Сравнение полученной в итоге модели (сплошная линия) с экспериментальными кривыми деформирования (точки) для разных скоростей деформаций (слева) и температур (справа) приводится на рисунке 4.

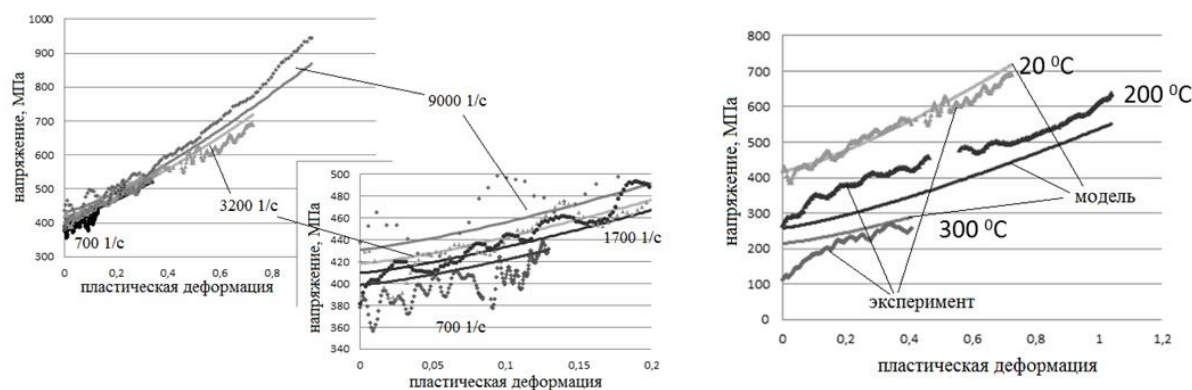


Рис. 4. Сравнение экспериментальных диаграмм с математической моделью (слева – влияние скорости деформации, справа – температуры)

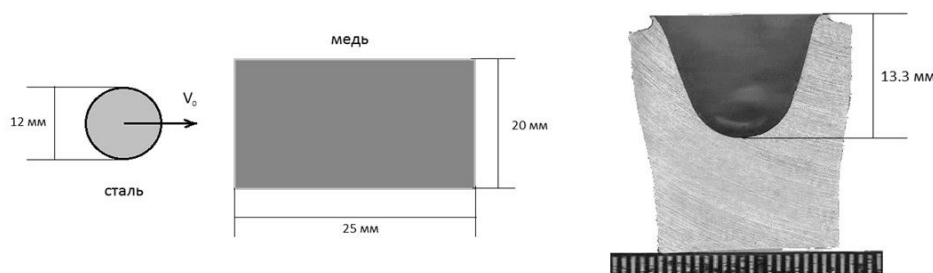


Рис. 5. Постановка верификационного эксперимента (слева) и образец-мишень после удара (справа)

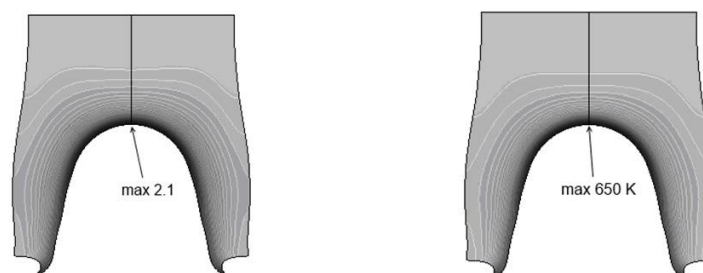


Рис. 6. Поля пластических деформаций (слева) и температур (справа), полученные при численном моделировании

Верификация математической модели

Для верификации математической модели был проведен эксперимент на высокоскоростной удар. В испытании ударник в виде шарика диаметром 10 мм с большой скоростью (порядка 650 м/с) выстреливался в цилиндр из исследуемого материала (рис. 5, слева). Образец-мишень изготавливался из того же прутка, что и образцы-таблетки на сжатие, используемые в базовых экспериментах для идентификации модели. Справа на рисунке 5 приводится кратер в образце-мишени, сформировавшийся в процессе соударения.

Соответствующий виртуальный эксперимент проводился с использованием коммерческого комплекса «LS-DYNA». Задача решалась в осесимметричной постановке с применением методов ALE и Эйлера [12]. Ударник считался недеформируемым жестким телом, поведение ми-

шени описывалось идентифицированной в настоящей работе математической моделью Джонсона–Кука. Следует отметить, что решения, полученные при использовании двух методов, оказались достаточно близки.

Результаты расчетов приводятся на рисунке 6. Слева показаны поля пластических деформаций в мишени, справа – поля температур. Видно, что интенсивные пластические деформации (температуры) локализованы в очень узкой области, и как по деформациям, так и по температурам расчетные значения далеко вышли за рамки диапазона, в котором экспериментально исследованы свойства материала.

Тем не менее, как видно из сравнения кратера, образовавшегося при ударе в образце-мишени в натурном испытании и его численном аналоге (рис. 7), экстраполяция моделью экспериментальных диаграмм на более широкую область температур и пластических деформаций

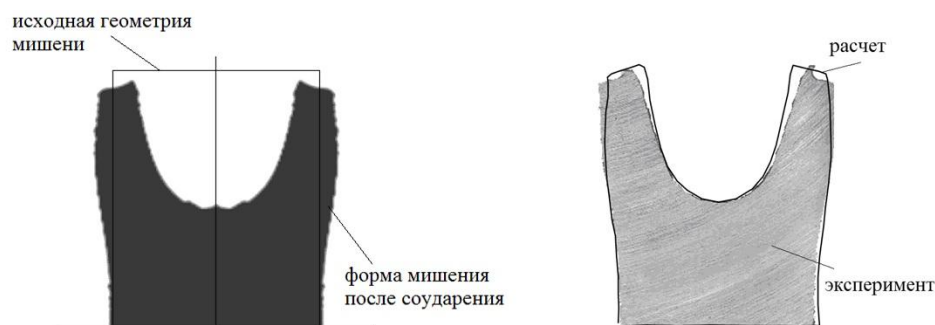


Рис. 7. Полученная в расчете форма образца-мишени (слева) и сравнение результатов натурного и вычислительного экспериментов (справа)

позволила получить приемлемый результат численного моделирования.

Автор выражает благодарность Баландину В.В. за помощь в проведении верификационных экспериментов, Мелехину Н. за предоставленные образцы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты 12-01-31082 мол_а, 12-08-31337 мол_а, 13-08-00862_а, 13-01-90406).

Список литературы

1. Николас Т. Поведение материалов при высоких скоростях деформации // В сб.: Динамика удара / Под ред. Дж. Зукаса и др. (Пер. с англ.). М.: Мир, 1985. С. 198–256.
2. Константинов А.Ю. Экспериментально-расчетное исследование поведения конструкционных материалов под действием динамических нагрузок: Дисс... канд. техн. наук. Нижний Новгород, 2007.
3. Stark-Seuken D. Ermittlung und Beschreibung der Fließkurven von Karosserie-werkstoffen bei hohen Dehnraten. Dr.-Ing. Thesis. RWTH Aachen University, 2000.
4. Patrick L. Strain rate sensitivity of automotive sheet steels: influence of plastic strain, strain rate, temperature, microstructure, bake hardening and pre-strain. Genehmigte Dissertation, April 2010.
5. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistic. Hague, Netherlands, 1983. P. 541–547.
6. Huh H., Kang W.J. Crash-Worthiness Assessment of Thin-Walled Structures with the High-Strength Steel Sheet // Int. J. of Vehicle Design. 2002. Vol. 30. № 1/2.
7. Allen D.J., Rule W.K., Jones S.E. Optimizing Material Strength Constants Numerically Extracted from Taylor Impact Data // Experimental Mechanics. 1997. Vol. 37. № 3.
8. Cowper G.R., Symonds P.S. Strain Hardening and Strain Rate Effects in the Impact Loading of Cantilever Beams. Brown University, Applied Mathematics Report, 1958.
9. Chwalik P., Klepaczko J.R., Rusinek A. Impact shear-numerical analyses of ASB evolution and failure for Ti-6Al-4V alloy // J. Phys. 2003. № 110. P. 257–263.
10. El-Magd E., Gese H., Tham R., et al. Fracture criteria for automobile crashworthiness simulation of wrought aluminum alloy components // Materialwiss. Werkstofftech. 2001. № 32–9. P. 712–724.
11. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of material at very high rates of loading // Proc. Phys. Soc. 1949. Vol. 62B. P. 676–700.
12. LSTC, «LS-DYNA Theory Manual». Livermore Software Technology Corporation, 2006.

IDENTIFICATION OF THE COPPER DEFORMATION MODEL FOR IMPACT DYNAMICS PROBLEMS

A.Yu. Konstantinov

Using the example of copper, we consider the specific features of high strain rate deformation of structural metals and alloys, with special attention to the adiabatic nature of such processes. A correction procedure is described for preparing dynamic stress-strain curves to be used in model identification of elasto-plastic mathematical models. As an example, the Johnson-Cook equation of state is identified for M1 copper. This model was verified using special experimental procedures with good qualitative and quantitative agreement between the experimental and numerical results.

Keywords: dynamic deformation, flow stress, adiabatic heating, equation of state, strain rate hardening, thermal softening, plastic strain, identification, verification.

References

1. Nikolas T. Povedenie materialov pri vysokih skorostjah deformacii // V sb.: Dinamika udara / Pod red. Dzh. Zukasa i dr. (Per. s angl.). M.: Mir, 1985. S. 198–256.
2. Konstantinov A.Ju. Jeksperimental'no-raschetnoe issledovanie povedenija konstrukcionnyh materialov pod dejstviem dinamicheskikh nagruzok: Diss... kand. tehn. nauk. Nizhnij Novgo-rod, 2007.
3. Stark-Seuken D. Ermittlung und Beschreibung der Fließkurven von Karosserie-werkstoffen bei hohen Dehnraten. Dr.-Ing. Thesis. RWTH Aachen University, 2000.
4. Patrick L. Strain rate sensitivity of automotive sheet steels: influence of plastic strain, strain rate, temperature, microstructure, bake hardening and pre-strain. Genehmigte Dissertation, April 2010.
5. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistic. Hague, Netherlands, 1983. P. 541–547.
6. Huh H., Kang W.J. Crash-Worthiness Assessment of Thin-Walled Structures with the High-Strength Steel Sheet // Int. J. of Vehicle Design. 2002. Vol. 30. № 1/2.
7. Allen D.J., Rule W.K., Jones S.E. Optimizing Material Strength Constants Numerically Extracted from Taylor Impact Data // Experimental Mechanics. 1997. Vol. 37. № 3.
8. Cowper G.R., Symonds P.S. Strain Hardening and Strain Rate Effects in the Impact Loading of Cantilever Beams. Brown University, Applied Mathematics Report, 1958.
9. Chwalik P., Klepaczko J.R., Rusinek A. Impact shear-numerical analyses of ASB evolution and failure for Ti-6Al-4V alloy // J. Phys. 2003. № 110. P. 257–263.
10. El-Magd E., Gese H., Tham R., et al. Fracture criteria for automobile crashworthiness simulation of wrought aluminum alloy components // Materialwiss. Werkstofftech. 2001. № 32–9. P. 712–724.
11. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of material at very high rates of loading // Proc. Phys. Soc. 1949. Vol. 62B. P. 676–700.
12. LSTC, «LS-DYNA Theory Manual». Livermore Software Technology Corporation, 2006.