

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТАНТ МОДЕЛИ ДЖОНСОНА-КУКА НА ОСНОВЕ ТЕСТА ТЕЙЛОРА

Зелепугин С.А.^{1,2}, Черепанов Р.О.¹, Зелепугин А.С.²

¹*Томский научный центр СО РАН, Томск;*

²*Томский государственный университет, Томск*

Ключевые слова: тест Тейлора, модель Джонсона-Кука, деформации, константы модели Джонсона-Кука, метод градиентного спуска Нестерова, метод конечных элементов.

Аннотация. При моделировании высокоскоростного деформирования металлов широкое распространение имеет модель упрочнения Джонсона-Кука. Эта модель учитывает деформационное упрочнение (рост предела текучести при деформировании материала), динамическое упрочнение (эффективное повышение предела текучести при высоких скоростях деформирования) и влияние температуры. В работе проводится оценка констант модели для бескислородной меди и исследуется влияние условий проведения эксперимента на эти константы. Показано, что при росте скорости соударения оптимальные константы модели демонстрируют разное поведение – часть констант демонстрирует тенденцию к завышению, а часть - наоборот, к занижению.

CALIBRATION OF JOHNSON-COOK MODEL CONSTANTS USING THE TAYLOR IMPACT TEST

Zelepugin S.A.^{1,2}, Cherepanov R.O.¹, Zelepugin A.S.²

¹*Tomsk Scientific Center SB RAS, Tomsk;*

²*National Research Tomsk State University, Tomsk*

Keywords: Taylor impact test, Johnson-Cook constitutive model, high strain-rates, Johnson-Cook model constants, Nesterov gradient-descent optimization method, finite element simulation.

Abstract. The Johnson-Cook hardening model is widely used in simulations of high-speed metal deformation. This model accounts for strain hardening (increase in yield strength under deformation), strain rate hardening (effective yield strength enhancement at high deformation rates), and thermal softening effects. The study focuses on determining the model constants for oxygen-free copper and analyzes how experimental conditions affect these constants. It is demonstrated that at higher impact velocities, the optimal model constants exhibit divergent trends: some constants tend to be overestimated, while others show underestimation tendencies.

При численном моделировании высокоскоростного взаимодействия твердых тел важно использовать модели материалов, которые точно описывают поведение в экстремальных условиях. С увеличением скорости удара устоявшиеся модели материалов, такие как классическая эмпирическая модель Джонсона-Кука (JC) [1], которая описывает эволюцию предела текучести (включая стадии упрочнения и размягчения) как функцию пластической деформации, скорости пластической деформации и температуры, демонстрируют рост несоответствия расчетных и экспериментальных данных.

Хотя классические модели материалов широко используются для оценки надежности конструктивных элементов или целых систем при высокоскоростном ударе, они могут давать критически ошибочные результаты. Потребность в точном численном описании поведения материалов при динамическом

нагрузении привела к многочисленным модификациям существующих эмпирических моделей, увеличению подгоночных параметров и, как следствие, к усложнению и снижению практичности для инженерных приложений. Более того, поскольку подавляющее большинство исследователей полагаются на коммерческое программное обеспечение (например, ANSYS/LS-DYNA) со встроенными реализациями стандартных моделей материалов и фиксированными наборами параметров, возникают естественные ограничения для надежного моделирования высокоскоростных ударно-волновых явлений.

Несмотря на простоту, модель JC остаётся одной из самых востребованных в научно-технических задачах. Её используют, в том числе, для:

- моделирования деформации и разрушения композитов (включая армированные полимеры) при разных температурах;
- анализа поведения взрывчатых веществ и анизотропных материалов;
- исследования магниевых и титановых сплавов;
- оценки остаточных напряжений в лопатках авиадвигателей;
- моделирования высокоскоростной обработки титана, алюминия и стали.

Ключевые направления работ включают калибровку параметров модели (включая методы оптимизации) и её адаптацию для сложных условий нагружения. Одним из способов такой калибровки является оценка параметров модели JC на основе сравнения расчетных и экспериментальных данных [2-5]. Для такого сравнения ранее [2] было предложено использование функционала сравнения, который в некотором обобщенном виде показывает отклонение расчетной формы взаимодействующих тел после удара от их экспериментальной формы. В данной работе используется функционал формы, предложенный [2]. Расчеты проведены методом конечных элементов [6, 7]

Для оценки вариативности параметров модели JC использована серия экспериментов по удару по жесткой стенке цилиндрическими ударниками из бескислородной меди диаметром 7,8 мм, длиной 34,5 мм при скоростях удара 162, 225 и 316 м/с. Справочные (исходные) значения параметров модели JC для бескислородной меди и полученные оптимальные оценки для различных скоростей удара приведены в таблице 1.

Таблица 1. Константы модели JC для бескислородной меди.

Параметр	Исходный [1]	162 м/с	225 м/с	316 м/с
n	0,31	-	-	-
m	1,09	-	-	-
B (МПа)	292	286	539	486
C	0,025	0,024	0,014	0,018

Параметры n и m модели JC (показатели степени при эквивалентной пластической деформации и температуре, соответственно) оказывают очень слабое влияние на итоговый функционал формы, и потому они были исключены из оптимизации, а варьировались только параметры B и C (коэффициенты деформационного и динамического упрочнения, соответственно).

Как видно из таблицы 1, при низких скоростях соударения справочные значения параметров модели JC практически не отличаются от расчетных

оптимальных, но при увеличении скорости соударения оптимальный параметр B имеет тенденцию к росту, а оптимальный параметр C , наоборот, к снижению, причем оба параметра демонстрируют сначала почти двукратное изменение при увеличении скорости удара со 162 до 225 м/с, но при дальнейшем увеличении скорости – некоторое обратное изменение. Предположительно, этот эффект объясняется тем, что модель JC допускает неограниченное деформационное упрочнение, в то время как для меди известно [3, 4], что ее предел текучести (по результатам определения микротвердости после интенсивной пластической деформации) ограничен величиной порядка 300-350 МПа, что не может быть учтено в рамках классической модели JC.

Список литературы

1. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proc. 7th Int. Symp. on Ballistics. 1983, p. 541-547.
2. Zelepugin S.A., Cherepanov R.O., Pakhnutova N.V. Optimization of Johnson–Cook constitutive model parameters using the Nesterov gradient-descent method // Materials. 2023, vol. 16, p. 5452. DOI: 10.3390/ma16155452.
3. Zelepugin S.A., Pakhnutova N.V., Shkoda O.A., Boyangin E.N. Experimental study of the microhardness and microstructure of a copper specimen using the Taylor impact test // Metals. 2023, vol. 12, p. 2186. DOI: 10.3390/met12122186.
4. Пахнутова Н.В., Боянгин Е.Н., Шкода О.А., Зелепугин С.А. Микротвердость и динамический предел текучести медных образцов при ударе по жесткой стенке // Advanced Engineering Research. – 2022. – Т. 22(3). – С. 224-231. – DOI: 10.23947/2687-1653-2022-22-3-224-231.
5. Bogomolov A.N., Gorel'skii V.A., Zelepugin S.A., Khorev I.E. Behavior of bodies of revolution in dynamic contact with a rigid wall// Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 1986, vol. 27, pp. 149-152. DOI: 10.1007/BF00911139.
6. Горельский В.А., Зелепугин С.А., Смолин А.Ю. Исследование влияния дискретизации при расчете методом конечных элементов трехмерных задач высокоскоростного удара // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1997. – Т. 37(6). – С. 742-750.
7. Gorel'skii V.A., Zelepugin S.A., Sidorov V.N. Numerical solution of three-dimensional problem of high-speed interaction of a cylinder with a rigid barrier, taking into account thermal effects// International Applied Mechanics. 1994, vol. 30, pp. 193-198. DOI: 10.1007/BF00847334.

Сведения об авторах:

Зелепугин Сергей Алексеевич – д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ТНЦ СО РАН, профессор НИ ТГУ;

Черепанов Роман Олегович – к.ф.-м.н., ведущий инженер;

Зелепугин Алексей Сергеевич – к.ф.-м.н., доцент.