

В. Г. Баженов, М. С. Баранова, Д. Л. Осетров

ВЛИЯНИЕ ТРЕНИЯ НА УСИЛИЯ УДАРНОГО СЖАТИЯ И ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ-ТАБЛЕТОК

*Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского
Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского,
г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. Приводятся обзор состояния проблемы построения динамических диаграмм деформирования с учетом трения и радиальной инерции методом прямого удара и результаты численного исследования влияния трения на напряженно-деформированное состояние образцов-таблеток и их формоизменения в процессе нагружения при больших деформациях. Оцениваются погрешности неучета сил трения в зависимости от величины коэффициента трения, степени деформации, упрочнения и чувствительности к скорости деформации материалов (сталей 12Х18Н10Т, 09Г2С и свинца С1).

Ключевые слова: численное моделирование, ударное сжатие, образцы-таблетки, упруговязкопластические материалы, динамические диаграммы деформирования, метод прямого удара, трение по Кулону.

УДК: 539.3

Введение. Для моделирования динамических процессов в конструкциях необходимо знание динамических диаграмм деформирования, которое можно получить экспериментально методом прямого удара или разрезного стержня Гопкинсона [1]. При

© Баженов В. Г., Баранова М. С., Осетров Д. Л., 2016

Баженов Валентин Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией, Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия.

Баранова Мария Сергеевна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия.

Осетров Дмитрий Львович, младший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ (16-38-60107 мол_а_дк, 16-38-00462 мол_а, 14-08-01129-а).

Поступила 20.06.2016

этом необходимо правильно оценивать роль трения на контактных поверхностях, испытываемый образец – ударник (мерный стержень). Трение играет важную роль в процессах высокоскоростного деформирования. Чтобы достаточно полно охарактеризовать явление трения, необходимо проведение многочисленных экспериментов, в которых исследовалось бы влияние различных факторов: давления, скорости относительного движения и шероховатости поверхностей, температуры.

В статических условиях разработано достаточно много эффективных методов определения характеристик трения. Динамические характеристики трения мало изучены в силу сложности методик их определения.

В настоящее время экспериментальные методы достаточно развиты, чтобы испытывать материалы при скоростях деформаций до 10^7 1/с. Поскольку с помощью стандартного разрезного стержня Гопкинсона невозможно достичь скоростей деформаций выше 10^4 1/с, был разработан ряд методов испытаний по принципу прямого удара, где имеется только один стержень Гопкинсона или труба, применяемые для передачи информации о деформациях с помощью измерения продольных упругих волн, что позволяет расшифровать поведение материала. Концепция прямого удара очень полезна в различных приложениях, при сжатии, сдвиге и при растяжении [1]. В работах [2], [3], [4] эффекты инерции были исследованы в испытаниях на ударное сжатие. Анализ данных для алюминия, представленный в работах [5], [6], показал, что инерционные поправки являются наиболее важными при высоких скоростях деформации (более 10^4 с⁻¹). Хорошо известно, что эффекты трения могут внести существенные ошибки при интерпретации результатов эксперимента. По результатам теоретических и экспериментальных исследований [4] для четырех материалов (свинец, алюминий, сталь и титан) сделаны выводы, что оптимальное отношение высоты к радиусу таблетки – S_{opt} может существенно меняться в зависимости от условий эксперимента и испытанного материала. Рабочий диапазон определяется неравенством $0,3 < S_{opt} < 1,5$. Отметим, что в отмеченных выше работах численно-аналитические методики учета сил трения и радиальной инерции предполагают однородность напряженно-деформированного состояния образцов таблеток.

При наличии в образце хорошо смазанных контактных поверхностей коэффициент трения может быть снижен значительно ниже уровня 0,1. Так называемое сухое трение быстро уменьшается в зависимости от тангенциальной скорости и давления [7].

При высоких скоростях деформации (более 10^4 1/сек) тепловое размягчение оказывает существенное влияние на чувствительность к скорости деформации и усиление вязкостных эффектов [8].

В перечисленных выше работах отсутствуют методики оценки сил трения в каждом конкретном эксперименте на ударное сжатие методом Гопкинсона или прямого удара, поэтому невозможно учесть вклад сил трения при построении динамических диаграмм деформирования испытываемых материалов.

Численное моделирование процесса деформирования в системе ударник – образец – мерный стержень в осесимметричной постановке. Осуществим численное моделирование процесса деформирования в системе ударник – образец – мерный стержень в осесимметричной постановке. Поскольку в методике Кольского и методе прямого удара предполагается однородность процесса деформирования после стационарирования переходного волнового процесса, вызванного ударным нагружением,

будем рассматривать установившуюся стадию процесса деформирования при заданной скорости сжатия образца-таблетки.

Геометрические размеры таблетки: диаметр – 2 см, высота – 2 см.

Ударник и мерный стержень заменялись круглыми дисками. Вертикальная скорость прикладывалась на верхней границе диска-ударника.

Размеры дисков: диаметр – $3.64 \cdot 10^{-2}$ м, высота – $0,125 \cdot 10^{-2}$ м. Материал дисков – сталь 20, механические характеристики: $K = 1,7667 \cdot 10^5$ МПа, $G = 8,15385 \cdot 10^4$ МПа, $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³. Диски полагались идеально-упругими. Рассматривалось деформирование двух материалов – 12Х18Н10Т и 09Г2С.

Между контактными границами дисков и образцов-таблеток задавались условия контактного одностороннего взаимодействия с учетом сухого трения по закону Кулона с коэффициентами трения 0, 0.1, 0.2, 0.3. На нижней границе опорного диска (мерного стержня) задавались нулевые граничные условия во времени – жесткая заделка. На верхней границе диска-ударника задавались нулевые тангенциальные перемещения и нормальная скорость, которая определяется из экспериментов на ударное сжатие по методике, описанной в [9], [10]. Эта методика предполагает известную из эксперимента сжимающую осевую силу в мерном стержне. Для простоты анализа результатов исследований будем предполагать скорость удара постоянной в процессе нагружения и равной 20 м/с. Заменим физический эксперимент математическим, т. е. будем предполагать известной динамическую диаграмму деформирования материала. Сначала зависимость диаграммы деформирования от скорости деформации не будем учитывать. Для математического моделирования процесса деформирования образцов-таблеток при больших деформациях воспользуемся средствами вычислительной системы LS-DYNA. Как показали вычислительные эксперименты, при осевых деформациях более 0.3 конечно-элементная сетка при учете трения с коэффициентом 0.3 сильно искажается и аппроксимация нарушается. Поэтому пришлось применить процедуру коррекции лагранжевой сетки в процессе деформирования, причем многократно. В противном случае искомые сжимающие силы и напряжения сильно осциллировали, что недопустимо при решении контактных задач. В результате ряда численных экспериментов была подобрана конечно-элементная сетка: по образцу – 9x10 ячеек, по дискам – 1x128 ячеек. Эта сетка обеспечила приемлемую точность расчетов при всех коэффициентах трения (0.1–0.3) и степенях деформации до 0.6.

Сначала проводились исследования роли коэффициента трения и степени деформации на напряженно-деформированное состояние образцов-таблеток из сталей 12Х18Н10Т и 09Г2С без учета зависимости от скорости деформации, а затем из свинца С1 с учетом зависимости от скорости деформации.

Механические характеристики сталей: $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, $\nu = 0.3$, $\rho = 7800$ кг/м³. Истинные диаграммы деформирования приведены на рис. 1 для материалов 12Х18Н10Т (обозначено цифрой 1) и 09Г2С (обозначено цифрой 2). Истинные динамические диаграммы деформирования свинца задавались в виде

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = \sigma_T(\dot{\varepsilon}) + \sigma(\varepsilon), \sigma_T(\dot{\varepsilon}) = 4 \cdot 10^{-6} \dot{\varepsilon}^2 - 0,0004 \dot{\varepsilon}, \quad \sigma(\varepsilon) = 5,5849\varepsilon + 2,063.$$

Скорость перемещений на ударяемой поверхности образца-таблетки принималась в виде

$$\dot{u} = H_0 C_0 e^{-C_0 t}, \text{ где } C_0 = \dot{\varepsilon}_0 = 10^3 \text{1/сек, } H_0 = 2 \text{ см,}$$

что обеспечивало постоянную скорость деформирования 10^3 1/сек.

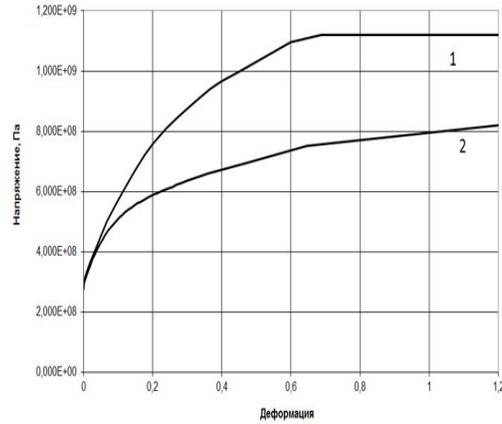


Рис. 1

На рис. 2 графиками 1, 2 представлены зависимости осевых сил на контактной поверхности ударника-образца от времени для сталей 12Х18Н10Т(1а, 2а) и 09Г2С(1б, 2б) при коэффициентах трения 0, 0.3 соответственно.

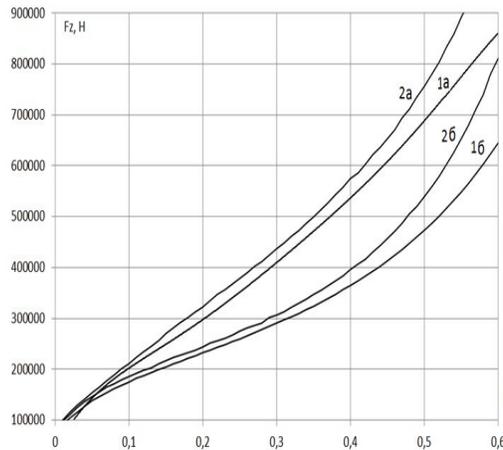


Рис. 2

На рис. 3 представлены графики 1, 2, 3, характеризующие относительные различия осевых сил $\Delta F_z / F_z$, рассчитанных с учетом и без учета трения при коэффициентах трения 0.1, 0.2, 0.3 соответственно.

Пунктиром обозначен материал 12Х18Н10Т, сплошной линией – свинец.

На рис. 4 (а, б, в) представлены распределения интенсивностей истинных пластических деформаций при условных деформациях осадки образцов 30 %, 50 %, 70 % при коэффициенте трения 0.3 для материала 12Х18Н10Т. Для остальных материалов имеет место подобное распределение пластических деформаций.

Анализ результатов. При учете трения НДС таблеток неоднородно, и неоднородность существенно возрастает при увеличении силы трения и степени деформации. Максимальные пластические деформации и осевые напряжения имеют место в

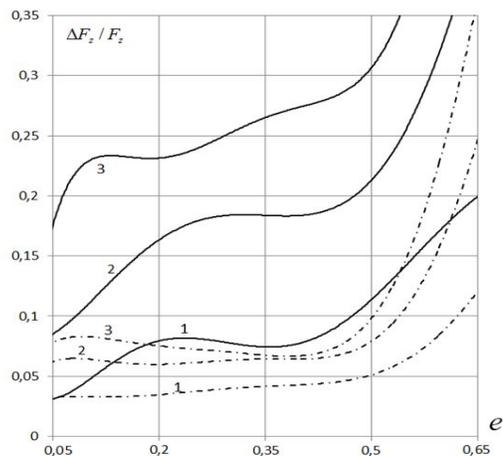


Рис. 3

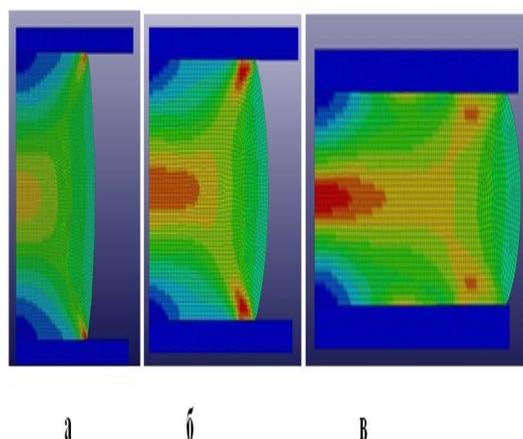


Рис. 4

области, примыкающей к центру таблетки. По мере деформации эти области расширяются. Уровень осевых напряжений здесь в разы больше, чем вблизи границ таблетки. Максимальные сдвиговые напряжения и деформации возникают в области обрыва границ контакта “образец – ударник” и “образец – опорный стержень”. Их уровень значительно меньше максимальных осевых деформаций и напряжений. Максимальные радиальные напряжения развиваются вблизи оси таблетки и достигают значений одного порядка с осевыми напряжениями. Истинные пластические деформации в таблетке при коэффициенте трения 0.3 достигают 100 % при осадке 50 %. Осевые силы при учете сил трения достигают больших значений, чем без их учета. Относительные различия увеличиваются при увеличении коэффициента трения, степени деформации, упрочнения и чувствительности материала к скорости деформации. Формоизменение образцов зависит от величины коэффициента трения и степени сжатия. Бочкообразование становится заметным при коэффициенте трения и степени осадки более 0.1. Этот параметр может быть использован для оценки величины коэффициента трения.

Для вязкопластических материалов, чувствительных к скорости деформации, например свинца, с увеличением скорости удара и, соответственно, скорости деформаций роль трения и радиальных сил инерции существенно возрастает.

Заключение.

1. Изложен обзор состояния проблемы построения динамических диаграмм деформирования упруговязкопластических материалов с учетом сил трения и радиальной инерции методом прямого удара.

2. Приведены результаты численного исследования влияния трения на напряженно-деформированное состояние упруговязкопластических образцов-таблеток и их формоизменения в процессе нагружения при больших деформациях.

3. Известные численно-аналитические методики учета сил трения по Кулону и радиальной инерции предполагают однородность напряженно-деформированного состояния образцов таблеток, что обосновано только при деформациях и коэффициентах трения менее 0.1.

4. Отсутствуют методики оценки сил трения в конкретных экспериментах на ударное сжатие методом прямого удара.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Nowacki W. K., Klepaczko J. R. New experimental methods in material dynamics and impact // INB ZTUREK. 2001. P. 223–266.

[2] Klepaczko J. R. Lateral inertia corrections in impact experiments // Technical Report № 17, Institute of Fundamental Technological Research, 1969. Warsaw.

[3] Klepaczko J. R., Hauser F. E. Radial inertia in compression testing of materials // Division of inorganic materials, Technical Report (Internal) UC-Berkeley, California, 1970.

[4] Malinowski J. Z., Klepaczko J. R. A unified analytic and numerical approach to specimen behaviour in split-Hopkinson pressure bar // International Journal of Mechanical Sciences. 1986. 28. P. 381.

[5] Malatynski M. Tests on plasticity of lad within wide range of strain rates and study of inertia effects // Ph. D. Thesis, Institute of Fundamental Technological Research, Polish Academy of Sciences. 1980.

[6] Dharan C. K. H., Hauser F. E. Determination of stress-strain characteristics at very high strain rates // Experimental Mechanics. 1970. № 10. P. 370.

[7] Montgomery R. S. Friction and wear at high sliding speeds // Wear. 1976. 36. P. 275.

[8] Ostwaldt D., Klepaczko J. R., Klimanek P. Compression tests of polycrystalline iron up to large strains over a large range of strain rates // Proceedings of International Conference DYMAT 97. Les editions de physique. 1997. P. 3–385.

[9] Баженов В. Г., Баранова М. С., Павленкова Е. В. Развитие и верификация метода прямого удара для идентификации вязкопластических характеристик материалов в экспериментах на газодинамической копровой установке // Проблемы прочности и пластичности. 2009. Вып. 71. С. 184–192.

[10] Баженов В. Г., Баранова М. С., Павленкова Е. В. Методика исследования упругопластических характеристик материалов на газодинамической копровой установке по показаниям двух датчиков деформаций // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2011. № 6 (1). С. 154–157.

V. G. Bazhenov, M. S. Baranova, D. L. Osetrov

INFLUENCE OF FRICTION ON THE SHOCK COMPRESSION FORCES AND FORMING OF VISCOELASTICPLASTIC TABLETS-SPECIMENS

National Research Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Nizhni Novgorod, Russia

Abstract. Overview of the problem of constructing of dynamic stress-deformation diagrams considering friction and radial inertia by the direct impact method and results of a numerical study of friction influence on the strain – stress state of tablets-specimens and forming in the process of loading for large deformations are presented. The inaccuracies of neglect frictional forces depending on the friction coefficient, the degree of strain, hardening and sensitivity to rate of material deformation (12X18H10T steels, 09G2S and C1 lead) are estimated.

Keywords: numerical simulation, shock compression, tablets-specimens, elastoviscoplastic materials, the dynamic stress-strain diagram, direct impact method, friction.

REFERENCES

- [1] Nowacki W. K., Klepaczko J. R. New experimental methods in material dynamics and impact // INB ZTUREK. 2001. P. 223–266.
- [2] Klepaczko J. R. Lateral inertia corrections in impact experiments. Technical Report № 17, Institute of Fundamental Technological Research, 1969. Warsaw.
- [3] Klepaczko J. R., Hauser, F. E. Radial inertia in compression testing of materials // Division of inorganic materials, Technical Report (Internal) UC- Berkeley, California, 1970.
- [4] Malinowski J. Z., Klepaczko J. R. A unified analytic and numerical approach to specimen behaviour in split-Hopkinson pressure bar // International Journal of Mechanical Sciences. 1986. 28. P. 381.
- [5] Malatynski M. Tests on plasticity of lad within wide range of strain rates and study of inertia effects // Ph. D. Thesis, Institute of Fundamental Technological Research, Polish Academy of Sciences. 1980.
- [6] Dharan C. K. H., Hauser F. E. Determination of stress-strain characteristics at very high strain rates // Experimental Mechanics. 1970. № 10. P. 370.
- [7] Montgomery R. S. Friction and wear at high sliding speeds // Wear. 1976. 36. P. 275.
- [8] Ostwaldt D., Klepaczko J. R., Klimanek P. Compression tests of polycrystalline a-iron up to large strains over a large range of strain rates // Proceedings of International Conference DYMAT 97. Les editions de physique. 1997. P. 3–385.
- [9] Bazhenov V. G., Baranova M. S., Pavlenkova E. V. Razvitie i verifikacija metoda prjamogo udara dlja identifikacii vjzokoplasticheskikh harakteristik materialov

Bazhenov Valentin Georgievich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Senior Researcher, Head of Laboratory, Research Institute of Mechanics, National Research Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Nizhni Novgorod, Russia.

Baranova Maria Sergeevna, PhD in Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Research Institute of Mechanics, National Research Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Nizhni Novgorod, Russia.

Osetrov Dmitry Lvovich, Junior Researcher, Research Institute of Mechanics, National Research Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Nizhni Novgorod, Russia.

v jeksperimentah na gazodinamicheskoj koprovoj ustanovke // Problemy prochnosti i plastichnosti. 2009. Vyp. 71. С. 184–192. (in Russian).

[10] Bazhenov V. G., Baranova M. S., Pavlenkova E. V. Metodika issledovanija uprugoplasticheskikh harakteristik materialov na gazodinamicheskoj koprovoj ustanovke po pokazanijam dvuh datchikov deformacij // Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo. 2011. № 6 (1). P. 154–157. (in Russian).