



УДК 539.3

## ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ ОБРАЗЦОВ-ТАБЛЕТОК С УЧЕТОМ СИЛ ТРЕНИЯ

В. Г. Баженов, Д. Л. Осетров, А. А. Рябов

Баженов Валентин Георгиевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории математического моделирования и идентификации свойств материалов Научно-исследовательского института механики, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского, Россия, 603950, ГСП-1000, Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23, bazhenov@mech.unn.ru

Осетров Дмитрий Львович, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории математического моделирования и идентификации свойств материалов Научно-исследовательского института механики, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского Россия, 603950, ГСП-1000, Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23, osetrovdmity@mail.ru

Рябов Александр Алексеевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (ФГУП «РФЯЦ — ВНИИЭФ»), Россия, 607188, Нижегородская обл., Саров, просп. Мира, 37, alex.ryabov@saec.ru

Численно и экспериментально исследовано влияние сил трения на динамическое деформирование упруговязкопластических образцов-таблеток. Установлены основные закономерности их формоизменения для металлов и сплавов. Предложен критерий формоизменения образцов-таблеток. Разработан новый метод идентификации коэффициентов сухого трения на контактных поверхностях в зависимости от формоизменения образцов-таблеток, основывающийся на численном моделировании осесимметричной динамической задачи и быстро сходящемся методе последовательных приближений. Теоретически с высокой степенью достоверности обосновано разделение задачи двухпараметрической идентификации на две задачи однопараметрической параметризации: задачу определения коэффициента трения и задачу построения истинной диаграммы динамического деформирования в данном эксперименте при найденном ранее коэффициенте трения. В итоге итерационным методом строятся динамические диаграммы деформирования с учетом сил трения и радиальной инерции. В известных приближенных методиках построения диаграмм деформирования с учётом сил трения и радиальной инерции коэффициенты трения предполагаются известными, тогда как способы их определения в экспериментах на ударное сжатие практически отсутствуют.

*Ключевые слова:* истинная диаграмма деформирования, коэффициент трения, силы трения, краевой эффект, ударное сжатие образцов-таблеток, формоизменение образцов-таблеток, численное моделирование.

DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2018-18-4-381-389>

### ВВЕДЕНИЕ

Для моделирования динамических процессов в конструкциях необходимо знание динамических диаграмм деформирования, которое можно получить экспериментально методом прямого удара, или разрезного стержня Гопкинсона [1]. Динамические характеристики трения мало изучены ввиду сложности методик их определения.



Известно, что так называемое сухое трение быстро уменьшается в зависимости от тангенциальной скорости и давления. Обзор теоретических и экспериментальных исследований трения и его учета при ударном сжатии образцов-таблеток представлен в [1]. В итоге сделаны выводы, что оптимальное отношение высоты к радиусу таблетки  $S_{opt}$  может существенно меняться в зависимости от условий эксперимента и испытываемого материала. Рекомендованный рабочий диапазон определяется неравенством  $0,6 < S_{opt} < 3$ . Отметим, что известные численно-аналитические методики учёта сил трения и радиальной инерции предполагают знание коэффициента сухого трения (по Кулону) и однородность напряженно-деформированного состояния образцов - таблеток, что существенно ограничивает их применимость при построении динамических диаграмм деформирования [1].

В данной статье в результате численного и экспериментального исследования влияния сил трения на динамическое деформирование упруговязкопластических образцов-таблеток установлены основные закономерности их формоизменения для металлов и сплавов (09Г2С, 12Х18Н10Т, Свинца С1) в зависимости от отношения их высоты к радиусу. Предложен новый метод идентификации коэффициентов сухого трения (по Кулону) на каждой из контактных поверхностей в зависимости от формоизменений боковой поверхности образцов-таблеток, основывающийся на численном моделировании осесимметричной динамической задачи и быстро сходящемся методе последовательных приближений. Затем предложенным ранее [2] итерационным методом строятся динамические диаграммы деформирования с учетом сил трения и радиальной инерции.

## 1. ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СИЛ ТРЕНИЯ НА ДИНАМИЧЕСКОЕ СЖАТИЕ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ-ТАБЛЕТОК

Проведено численное моделирование процессов деформирования в системе ударник – образец – мерный стержень в осесимметричной постановке. 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 [3, 4]. Между контактными границами дисков и образцов-таблеток задавались условия одностороннего контактного взаимодействия с учетом сухого трения по закону Кулона с коэффициентами трения 0, 0.1, 0.2, 0.3. При больших деформациях из-за искажения конечно-элементной сетки вблизи границ контактной области необходимо применять процедуру коррекции сетки в процессе деформирования, причем многократно. С этой целью воспользуемся средствами вычислительной системы LS-DYNA [5], в которой реализован лагранжев конечно-элементный метод для упруговязкопластической среды с применением теории течения с изотропным упрочнением. Сначала исследовалась роль коэффициента трения и степени деформации на напряженно-деформированное состояние образцов-таблеток из сталей 12Х18Н10Т и 09Г2С мало-чувствительных к скорости деформации, а затем свинца С1 сильно чувствительного к скорости деформации в диапазоне геометрических параметров образцов-таблеток  $0,6 < S_{opt} < 3$ . Диаграммы деформирования сталей 12Х18Н10Т и 09Г2С представлены в [6].

Истинные динамические диаграммы деформирования свинца задавались в виде  $\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = \sigma_T(\dot{\varepsilon}) + \sigma(\varepsilon)$ , (т/см<sup>2</sup>), где  $\sigma_T(\dot{\varepsilon}) = 4 \cdot 10^{-6} \dot{\varepsilon}^2 - 0,0004 \dot{\varepsilon}$ ,  $\sigma(\varepsilon) = 5,5849\varepsilon + 2,063$ .



Скорость перемещений на ударяемой поверхности задавалась таким образом, чтобы скорость осевых деформаций  $\dot{\epsilon}_0 = \dot{u}/L$  в образце-таблетке без учета трения была постоянной ( $\dot{u} = L_0 \dot{\epsilon}_0 e^{-\dot{\epsilon}_0 t}$ ,  $L_0, L$  — начальная и текущая высота образца-таблетки).

На рис. 1 представлены формоизменения и распределения интенсивностей истинных пластических деформаций в образце-таблетке ( $L_0/R_0 = 2$ ,  $R_0$  — начальный радиус образца) при условных деформациях осадки 50% и коэффициенте трения 0.3 для мало чувствительных к скорости деформаций материалов 09Г2С (рис. 1, а) и 12Х18Н10Т (рис. 1, б), а также вязкопластического свинца при средних скоростях осевых деформаций  $\dot{\epsilon}_0 = 500$  1/с (рис. 1, в) и  $\dot{\epsilon}_0 = 1000$  1/с (рис. 1, г).

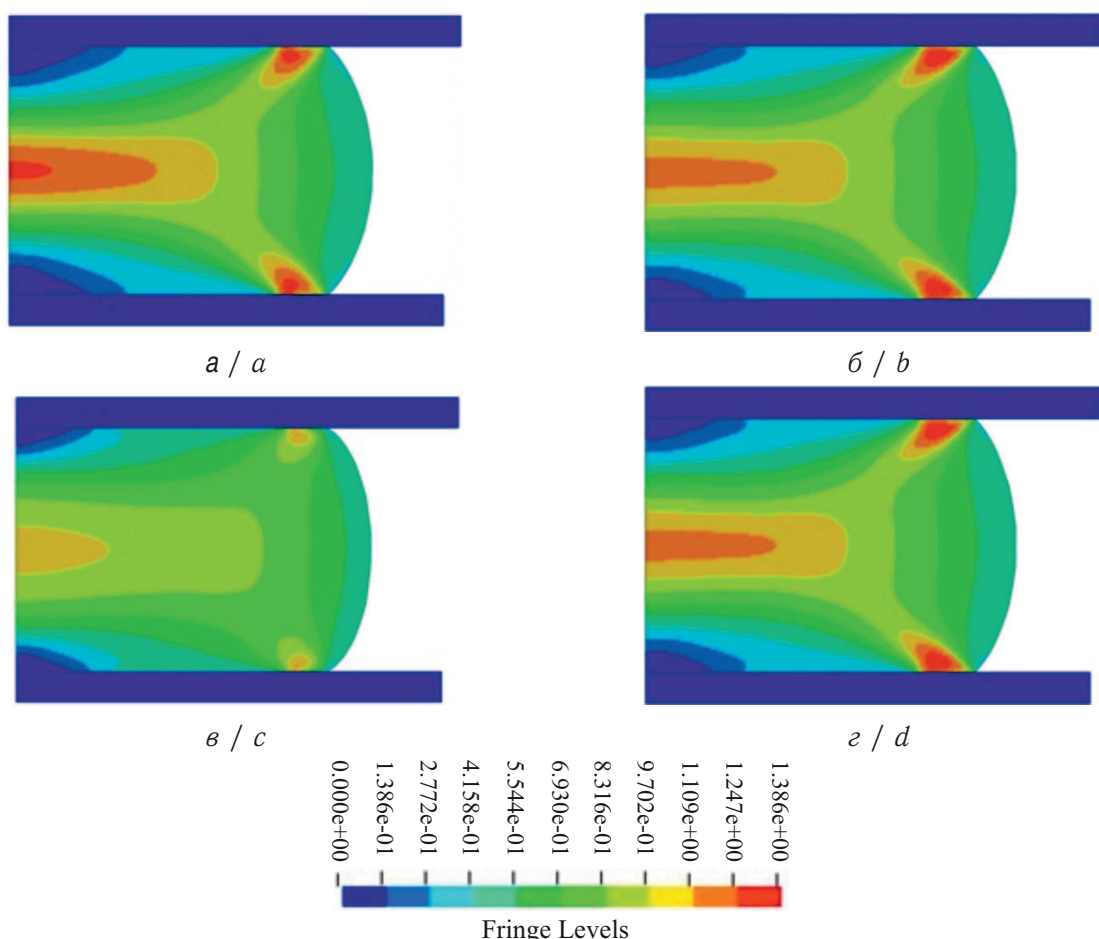


Рис. 1. Формоизменения образцов-таблеток ( $L_0/R_0 = 2$ ) при осадке  $u/L_0 = 0.5$  и соответствующие им распределения интенсивностей истинных деформаций для сталей 09Г2С (а), 12Х18Н10Т (б) и свинца при скоростях осевых деформаций  $\dot{\epsilon}_0 = 500$  1/с (в) и  $\dot{\epsilon}_0 = 1000$  1/с (г)

Fig. 1. The shape changing of the rablet specimens ( $L_0/R_0 = 2$ ) at settlement  $u/L_0 = 0.5$  and their corresponding distributions of true strain intensities for steels 09G2S (a), 12KH18N10T (b) and plumbum at axial strain rates  $\dot{\epsilon}_0 = 500$  1/c (c) and  $\dot{\epsilon}_0 = 1000$  1/c (d)

При учете трения НДС таблеток неоднородно. Неоднородность существенно возрастает при увеличении сил трения и степеней деформаций. Максимальные пластические деформации и осевые напряжения возникают в 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 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 при коэффициенте трения 0.3 превышают 100% при осадке 50%. Для вязкопластических материалов, чувствительных к скорости деформации, например свинца, с увеличением скорости удара и соответственно скорости деформаций роль трения возрастает из-за существенной неоднородности скоростей деформаций в образце-таблетке.

Формоизменение боковой поверхности образцов главным образом зависит от отношения  $L_0/R_0$ , величины коэффициента трения и степени сжатия. Эти формоизменения можно охарактеризовать отношением  $h/L$ , где  $h = R - (R_n + R_b)/2$ , а  $R(z)$  — радиус контура арки деформированного образца,  $R_n, R_b, L$  — минимальные нижний и верхний радиусы контура арки и высота деформированного образца соответственно.

На рис. 2 приведено относительное формоизменение арки  $h/L$  по высоте образца  $z/L$  ( $z$  — ось образца) при условных деформациях осадки 50% при коэффициенте трения 0.3 для образцов-таблеток  $L_0/R_0 = 1, L_0/R_0 = 2$  и  $L_0/R_0 = 3$ . Там же приведены изменения максимальной высоты арки  $h_{max} = R_{max} - (R_n + R_b)/2$  ( $R_{max}$  — максимальный радиус деформированного образца) от осадки образцов-таблеток (отношения изменения высоты деформированного образца  $u$  к первоначальной высоте недеформированного образца —  $L_0$ ).

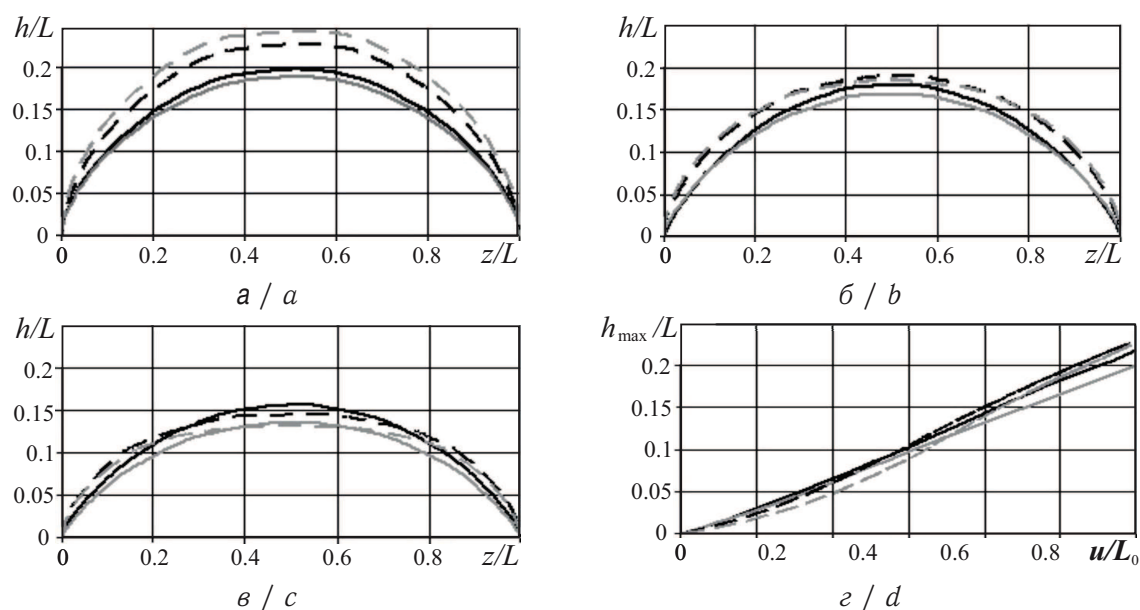


Рис. 2. Формоизменение боковой поверхности образцов (арок)  $L_0/R_0 = 1$  (а),  $L_0/R_0 = 2$  (б) и  $L_0/R_0 = 3$  (в) от высоты образца  $z/L$  при условных деформациях осадки 50% и изменение максимальной высоты арки  $L_0/R_0 = 2$  от осадки образца-таблетки  $u/L_0$  (д) при коэффициенте трения 0.3 для сталей 09Г2С, 12Х18Н10Т (сплошные линии, черная и серая соответственно) и свинца при  $\dot{\epsilon}_0 = 500$  1/с и  $\dot{\epsilon}_0 = 1000$  1/с (пунктирные линии, черная и серая соответственно)

Fig. 2. The shape changing of the lateral surface of the specimens (arches)  $L_0/R_0 = 1$  (a),  $L_0/R_0 = 2$  (b) and  $L_0/R_0 = 3$  (c) from the height of the specimen  $z/L$  with conditional strain of the draft 50% and change in the maximum arch height  $L_0/R_0 = 2$  from tablet specimen settlement  $u/L_0$  (d) at a coefficient of friction of 0.3 for steels 09G2S, 12KH18N10T (solid lines, black and gray respectively) and plumbum at  $\dot{\epsilon}_0 = 500$  1/s and  $\dot{\epsilon}_0 = 1000$  1/s (dashed lines, black and gray respectively)



Путем математического моделирования было исследовано влияние краевых эффектов на построение диаграмм деформирования по результатам испытания образцов-таблеток при отношениях  $L_0/R_0 = 1$ ,  $L_0/R_0 = 2$  и  $L_0/R_0 = 3$  при коэффициентах трения 0.1 и 0.3. Построенные диаграммы деформирования представлены на рис. 3, а–г. На рис. 3, а, б изображены диаграммы для сталей 09Г2С при коэффициентах трения 0.1 и 0.3, а на рис. 3, в, г — для свинца ( $\dot{\epsilon}_0 = 500$  1/с) при коэффициентах трения 0.1 и 0.3, соответственно. Сплошными черными линиями изображены истинные диаграммы деформирования для стали 09Г2С (рис. 3, а, б) и свинца (рис. 3, в, г), а сплошными серыми, штриховыми и штрихпунктирными линиями — диаграммы, полученные для образцов  $L_0/R_0 = 1$ ,  $L_0/R_0 = 2$  и  $L_0/R_0 = 3$  без учета сил трения.

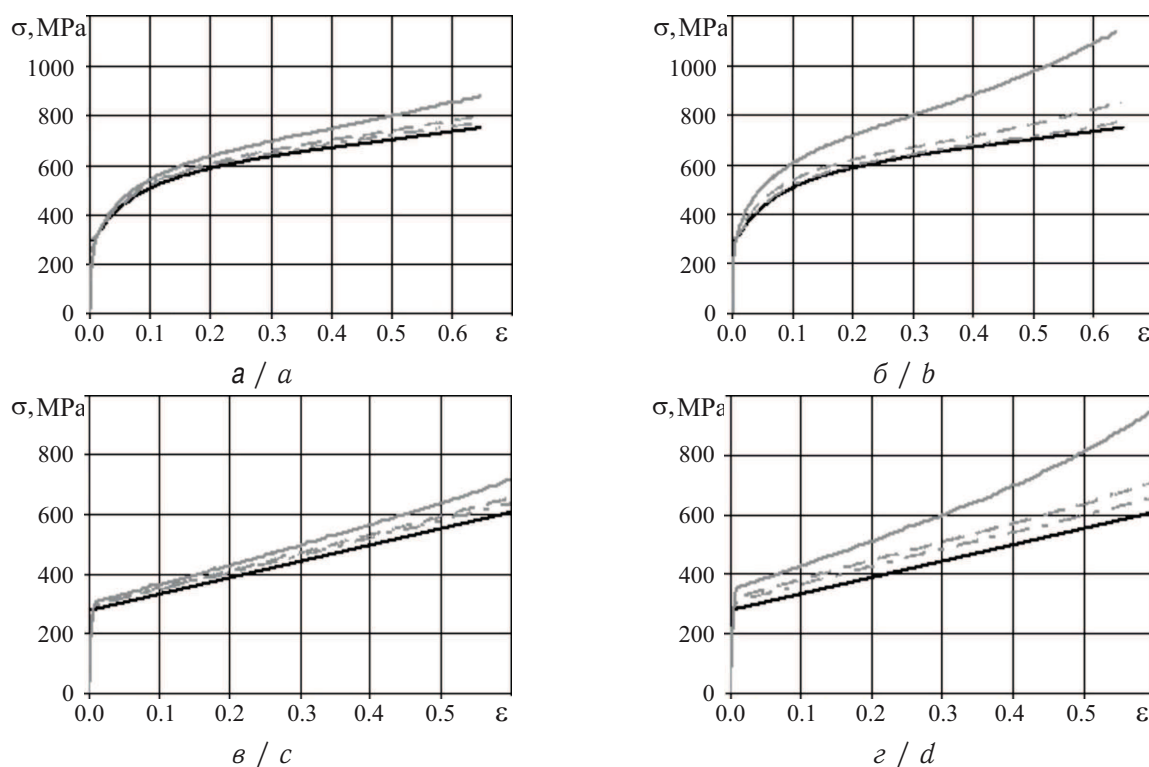


Рис. 3. Диаграммы деформирования, построенные с учетом и без учета сил трения, для стали 09Г2С (а, б) и свинца (в, г) при коэффициентах трения 0.1 (а, в) и 0.3 (б, г): сплошные черные линии — истинные диаграммы деформирования; сплошные серые линии, пунктирные и штрих-пунктирные — диаграммы, полученные без учета сил трения для образцов  $L_0/R_0 = 1$ ,  $L_0/R_0 = 2$  и  $L_0/R_0 = 3$  соответственно

Fig. 3. The deformation diagrams constructed with and without friction forces consideration for steel 09G2S (a, b) and plumbum (c, d) at friction coefficients 0.1 (a, c) and 0.3 (b, d): solid black lines — true deformation diagrams, gray solid lines, dashed lines and dash-dot lines — diagrams obtained without friction force consideration for the specimens  $L_0/R_0 = 1$ ,  $L_0/R_0 = 2$  and  $L_0/R_0 = 3$  respectively

Таким образом, неучет формоизменения образца при построении диаграмм деформирования может привести к существенным погрешностям, как это следует из анализа результатов, представленных на рис. 3. Роль краевых эффектов возрастает с увеличением коэффициента трения и уменьшением отношения  $L_0/R_0$ . При размерах образца более  $L_0/R_0 = 3$  влияние краевых эффектов незначительно при коэффициенте трения менее 0.3, что позволяет строить истинные диаграммы деформирования



с достаточной точностью без учета сил трения. Параметр бочкообразования — высота арки — мало зависит от диаграмм динамического деформирования упругопластических материалов, так как при деформациях более 1% они практически не сжимаемы, что определяет картину пластического течения и формоизменения образцов-таблеток. При использовании закона сухого трения Кулона сила трения прямо пропорциональна нормальному давлению, которое определяется диаграммой деформирования и степенью деформации. Поэтому имеет место однозначное соответствие между высотой арки и коэффициентом трения в процессе осадки образцов-таблеток из различных металлов с одинаковой первоначальной геометрией. В дальнейшем используем эту закономерность для оценки величин коэффициентов трения в динамических натуральных экспериментах при построении диаграмм деформирования.

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ СУХОГО ТРЕНИЯ И ПОСТРОЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Первоначально диаграммы деформирования строятся при коэффициенте трения равным нулю, при однородном напряженно-деформированном состоянии. Затем осуществляется итерационный процесс определения коэффициентов трения с найденной диаграммой деформирования. В процессе итераций корректируются коэффициенты трения на нижней и верхней поверхностях образцов-таблеток посредством интерполяции (экстраполяции) по разности высот арок в расчете и эксперименте до сходимости. В начальном приближении коэффициент трения задается равным 0.15. Число итераций обычно не превышает трех при погрешности в определении высоты арки менее 1%. Далее производится уточнение динамических диаграмм деформирования. Диаграммы деформирования строятся для максимальных в объеме образцов-таблетки значений интенсивностей напряжений и деформаций, синхронизированных с изменением осевых сил и условных осевых деформаций по алгоритму, изложенному в [2–4, 7].

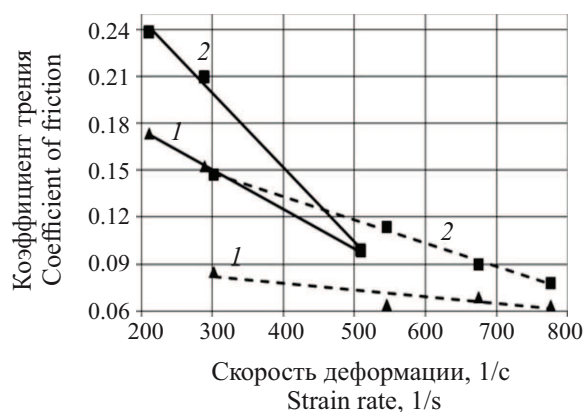


Рис. 4. Изменение коэффициентов трения от скорости деформации  $\dot{\epsilon} = \dot{u}/L$  для стали 09Г2С (пунктирные линии) и свинца (сплошные линии): 1 — на нижней поверхности, 2 — на верхней поверхности

Fig. 4. The change in friction coefficients from the strain rate  $\dot{\epsilon} = \dot{u}/L$  for steel 09G2S (dashed lines) and plumbum (solid lines): 1 — on the lower surface, 2 — on the upper surface

При значительных различиях в диаграммах деформирования, построенных без учета и с учетом сил трения, производится уточнение коэффициентов трения и т.д.

На рис. 4 приведены зависимости коэффициентов трения на нижней и верхней поверхностях от скорости деформации при ударном нагружении образцов-таблеток для стали 09Г2С ( $R_0 = 0.5$  см,  $L_0/R_0 = 3$ ) и свинца С1 ( $R_0 = 2$  см,  $L_0/R_0 = 1$ ), полученные из экспериментов на газодинамической копровой установке по приведенному выше алгоритму. Коэффициенты трения для нижней и верхней контактных поверхностей корректировались одновременно в каждой итерации в соответствии с формоизменениями нижней и верхней частей образцов-таблеток. Высоты полуарок определялись по формуле  $h^* = R_{\max} - R^*$ , где  $R^* = R_n$  или  $R^* = R_b$ .



С увеличением скорости деформации полученные коэффициенты трения уменьшаются, что соответствует известной физической закономерности. На рис. 5 приведена полученная численным моделированием относительная ошибка  $\delta$  в определении диаграмм деформирования без учета сил трения для 09Г2С и свинца (при скорости деформации  $\dot{\epsilon} = \dot{u}/L = 500$  1/с) от степени деформации при коэффициенте трения 0.2 и размерах образца  $L_0/R_0 = 1$ ,  $L_0/R_0 = 2$  и  $L_0/R_0 = 3$  (кривые 1, 2 и 3 соответственно). Ошибка определяется главным образом величиной коэффициента трения и размерами образца. При этом величина ошибки в построении диаграмм деформирования для материалов чувствительных к скорости деформаций выше, чем для малочувствительных. С увеличением степени деформации погрешности неучета трения возрастают.

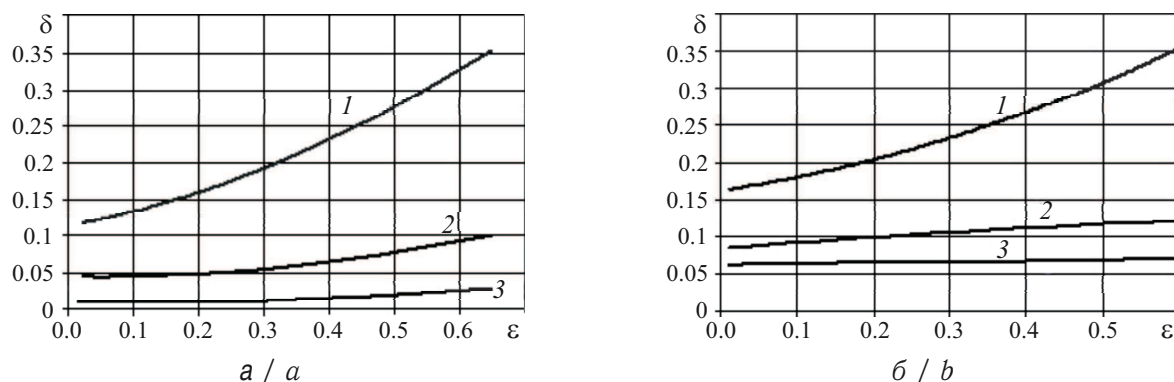


Рис. 5. Относительные ошибки  $\delta$  в определении диаграмм деформирования без учета сил трения от степени деформации  $\epsilon$  при коэффициенте трения 0.2 и размерах образцов  $L_0/R_0 = 1$ ,  $L_0/R_0 = 2$  и  $L_0/R_0 = 3$  (кривые 1, 2, 3 соответственно) для стали 09Г2С (а) и свинца при скорости деформации  $\dot{\epsilon} = \dot{u}/L = 500$  1/с (б)

Fig. 5. Relative errors  $\delta$  in the definition of deformation diagrams without friction forces consideration on the degree of deformation  $\epsilon$  at a friction coefficient of 0.2 and the specimens size  $L_0/R_0 = 1$ ,  $L_0/R_0 = 2$  and  $L_0/R_0 = 3$  (curves 1, 2, 3, respectively) for steel 09G2S (a) and plumbum at the strain rate  $\dot{\epsilon} = \dot{u}/L = 500$  1/s (b)

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-08-00972а).

### Библиографический список

1. Klepaczko J. R. Advanced experimental techniques in materials testing // New experimental methods in material dynamics and impact. Trends in Mechanics of Materials. Vol. 3 / eds. W. K. Nowacki, J. R. Klepaczko. Warsaw : INB ZTUREK, 2001. P. 223–266.
2. Способ определения деформационных и прочностных свойств материалов при больших деформациях и неоднородном напряженно-деформированном состоянии : пат. 2324162 Рос. Федерация : МПК G01N3/00 / Баженов В. Г., Зефилов С. В., Крамарев Л. Н., Осетров С. Л., Павленкова Е. В. ; заявитель и патентообладатель Научно-исследовательский институт механики Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского», RU № 2006115805/28(017160) ; заявл. 06.05.2006 ; опубл. 10.08.2008, Бюл. № 13.
3. 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. Н. Новгород, 2009. Вып. 71. С. 184–192.



4. Баженов В. Г., Баранова М. С., Павленкова Е. В. Методика восстановления волнового процесса в мерном стержне по показаниям двух датчиков деформаций // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н. И. Лобачевского. 2011. № 6, ч. 1. С. 154–157.
5. LS-DYNA Keyword User's Manual. Vol. 1: Livermore Software Technology Corporation (LSTC). 2007. Version 971. URL: [http://lstc.com/pdf/ls-dyna\\_971\\_manual\\_k.pdf](http://lstc.com/pdf/ls-dyna_971_manual_k.pdf) (дата обращения: 13.08.2018).
6. Баженов В. Г., Баранова М. С., Осетров Д. Л. Влияние трения на усилия ударного сжатия и формоизменения упруговязкопластических образцов-таблеток // Вестн. Чуваш. гос. пед. ун-та им. И. Я. Яковлева. Сер. Механика предельного состояния. 2016. № 3(29). С. 85–92.
7. Баженов В. Г., Зефиоров С. В., Осетров С. Л. Экспериментально-расчетный метод построения истинных диаграмм деформирования при больших деформациях на основе испытаний на твердость // Докл. АН. 2006. Т. 407, № 2. С. 183–185.

---

**Образец для цитирования:**

Баженов В. Г., Осетров Д. Л., Рябов А. А. Построение диаграмм деформирования металлов и сплавов при ударном сжатии образцов-таблеток с учетом сил трения // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2018. Т. 18, вып. 4. С. 381–389. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2018-18-4-381-389>

---

## The Construction of the Deformation Diagrams of Metals and Alloys at Impact Compression of Tablet Specimens with Friction Forces Consideration

V. G. Bazhenov, D. L. Osetrov, A. A. Ryabov

Valentin G. Bazhenov, <https://orcid.org/0000-0002-0077-7704>, Research Institute for Mechanics of Lobachevsky State University, 23 Gagarin Ave., Nizhni Novgorod 603950, Russia, [bazhenov@mech.unn.ru](mailto:bazhenov@mech.unn.ru)

Dmitry L. Osetrov, <https://orcid.org/0000-0001-9703-8504>, Research Institute for Mechanics of Lobachevsky State University, 23 Gagarin Ave., Nizhni Novgorod 603950, Russia, [osetrovdmity@mail.ru](mailto:osetrovdmity@mail.ru)

Alexander A. Ryabov, <https://orcid.org/0000-0001-6133-0108>, Federal State Unitary Enterprise "Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics", 37 Mira Ave., Nizhny Novgorod region, Sarov 607188, Russia, [alex.ryabov@saec.ru](mailto:alex.ryabov@saec.ru)

The influence of friction forces on the dynamic deformation of elastoviscoplastic tablet specimens was numerically and experimentally investigated. The main dependencies of their shape changing for metals and alloys have been established. A criterion of the shape changing of tablet specimens is proposed. A new method for identifying of the coefficients of dry friction at contact surfaces, depending on shape changing of the tablet specimens, based on numerical modeling of an axisymmetric dynamic problem and a rapidly convergent method of successive approximations was developed. The division of the two-parameter identification problem into two problems of one-parameter parameterization is theoretically justified with a high degree of reliability: the problem of determining of the friction coefficient and the problem of construction of the true diagram of dynamic deformation in this experiment with the friction coefficient found earlier. As a result, the dynamic deformation diagrams with frictional forces and radial inertia consideration are constructed using the iterative method. In known approximation methods of construction of the deformation diagrams with frictional forces and radial inertia consideration, friction coefficients are assumed to be known, whereas methods for their determination in experiments with impact compression are practically unavailable.

*Key words:* true deformation diagram, friction coefficient, friction force, edge effect, impact compression of tablet specimens, shape changing of tablet specimens, numerical simulation.

**Acknowledgements:** This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 17-08-00972a).





## References

1. Klepaczko J. R. Advanced experimental techniques in materials testing. *New experimental methods in material dynamics and impact. Trends in Mechanics of Materials*, vol. 3; Eds. W. K. Nowacki, J. R. Klepaczko. Warsaw, INB ZTUREK, 2001, pp. 223–266.
2. Method for determining of the deformation and strength properties of materials for high strains and inhomogeneous stress-strain state : Pat. 2324162 Russian Federation, MPK G01N3/00 / Bazhenov V. G., Zefirov S. V., Kramarev L. N., Osetrov S. L., Pavlenkova E. V.; Patent Applicant and Patent Holder : Research Institute for Mechanics of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod. RU no. 2006115805/28 (017160). Patent Filing Date 06.05.2006. Patent Publication Date 10.08.2008. Bull. no. 13 (in Russian).
3. Bazhenov V. G., Baranova M. S., Pavlenkova E. V. Razvitie i verifikatsiia metoda priamogo udara dlia identifikatsii viazkoplasticheskikh kharakteristik materialov v eksperimentakh na gazodinamicheskoi koprovoi ustanovke [Development and verification of the direct impact method for identifying viscoplastic properties of materials in experiments on a gas dynamic vertical test stand]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Ductility]. N. Novgorod, 2009, iss. 71, pp. 184–192 (in Russian).
4. Bazhenov V. G., Baranova M. S., Pavlenkova E. V. A technique of wave process restoration in a measuring rod by the readings of two strain gauges. *Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod*, 2011, no. 6, pt. 1, pp. 154–157 (in Russian).
5. LS-DYNA Keyword User's Manual. Vol. 1. Livermore Software Technology Corporation (LSTC). 2007. Version 971. Available at: [http://lstc.com/pdf/ls-dyna\\_971\\_manual\\_k.pdf](http://lstc.com/pdf/ls-dyna_971_manual_k.pdf) (accessed 13 October 2018).
6. Bazhenov V. G., Baranova M. S., Osetrov D. L. Influence of friction on the shock compression forces and forming of viscoelasticplastic tablets-specimens. *Vestnik I. Yakovlev Chuvach State Pedagogical University. Ser. Mechanics of a Limit State*, 2016, no. 3(29), pp. 85–92 (in Russian).
7. Bazhenov V. G., Zefirov S. V., Osetrov S. L. Experimental and computing method for constructing true deformation diagrams at large strains on the basis of tests for hardness. *Doklady Physics*, 2006, vol. 51, iss. 3, pp. 118–121. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028335806030050>

---

### Cite this article as:

Bazhenov V. G., Osetrov D. L., Ryabov A. A. The Construction of the Deformation Diagrams of Metals and Alloys at Impact Compression of Tablet Specimens with Friction Forces Consideration. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Math. Mech. Inform.*, 2018, vol. 18, iss. 4, pp. 381–389 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2018-18-4-381-389>

---