

УДК 539.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СТАЛЕЙ МАРОК Ст.3, 20X13 И 08X18H10T В ШИРОКИХ ДИАПАЗОНАХ СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ И ТЕМПЕРАТУР

А. М. Брагов*, Л. А. Игумнов*, В. Б. Кайдалов**,
А. Ю. Константинов*, Д. А. Лапшин**,
А. К. Ломунов*,***, Ф. М. Митенков**

* Научно-исследовательский институт механики Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

** Опытнo-конструкторское бюро машиностроения им. И. И. Африкантова, 603074 Нижний Новгород, Россия

*** Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 603950 Нижний Новгород, Россия

E-mails: bragov@mech.unn.ru, igumnov@mech.unn.ru, kaidalov@mail.ru, constantinov.al@yandex.ru, lapshane@mail.ru, lomunov@mech.unn.ru, mitenkov_fm@mail.ru

Приведены результаты экспериментального исследования поведения сталей марок Ст.3, 20X13 и 08X18H10T в условиях статического и динамического нагружения. Изучено влияние скорости деформации и температуры на характеристики прочности и пластичности. На основе полученных данных определены параметры модели Джонсона — Кука, используемой в коммерческих пакетах программ для описания зависимости радиуса поверхности текучести от параметров нагружения. В серии специальных тестовых экспериментов проверена адекватность идентифицированной модели.

Ключевые слова: диаграмма деформирования, скорость деформации, адиабатический нагрев, метод Кольского, математическая модель, идентификация, верификация.

DOI: 10.15372/PMTF20150607

Введение. При численном моделировании деформирования и разрушения технологических контейнеров, предназначенных для транспортировки радиоактивных материалов и их отходов, необходимо использовать математические модели, адекватно описывающие влияние условий нагружения (скорости деформации и температуры) на деформирование конструкционных материалов, из которых они изготовлены. Элементы рассматриваемых контейнеров изготовлены из сталей марок 08X18H10T (основной корпус), 20X13 (крепежные элементы), Ст.3 (настил, с которым соударяется контейнер).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 14-09-01096) и Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания (код проекта 7.846.2014К).

© Брагов А. М., Игумнов Л. А., Кайдалов В. Б., Константинов А. Ю.,
Лапшин Д. А., Ломунов А. К., Митенков Ф. М., 2015

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования поведения указанных марок стали в зависимости от скорости деформации и температуры. Для определения механических свойств сталей при высокоскоростном нагружении применяется метод Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона. По диаграммам деформирования, построенным при различных режимах нагружения, определяются пределы прочности и их зависимость от скорости деформации и температуры. Для того чтобы оценить изменение прочности в широком диапазоне скоростей деформации, проводится сравнение результатов динамических экспериментов с результатами аналогичных статических испытаний. С использованием полученных механических характеристик для каждой марки стали определяются параметры модели пластичности Джонсона — Кука из пакета программ LS-DYNA с учетом влияния скорости деформации и температуры на радиус поверхности текучести. В специальных тестовых экспериментах проводится верификация математической модели.

Методы экспериментального исследования. В настоящей работе для определения характеристик материалов при динамическом нагружении используется метод Кольского [1–3], а для определения характеристик материалов в условиях динамического растяжения — схема Николаса [4].

Исследование поведения материалов при температурах до 350 °С проводилось с помощью печи трубчатой конструкции, надеваемой на торцы мерных стержней, между которыми расположен образец. Для контроля температуры образца использовалась хромель-копелевая термопара, приваренная к его боковой поверхности.

Для каждого режима нагружения (скорость деформации, температура) проводились повторные испытания. На основе серии полученных диаграмм для каждого режима испытаний определялась средняя кривая с доверительными интервалами, характеризующими разброс экспериментальных данных.

Погрешность определения напряжения с использованием метода Кольского не превышает 7 %, деформации образца — 6 % [5].

Результаты экспериментальных исследований. В проведенных экспериментах установлено, что предел текучести всех исследованных марок стали с увеличением скорости деформации увеличивается, а с увеличением температуры уменьшается. При динамическом деформировании стали марки Ст.3 (скорость деформирования $\dot{\epsilon} \sim 1000 \text{ с}^{-1}$) напряжения на 66 % больше, чем при статическом деформировании, стали марки 20X13 — на 33 %, стали марки 08X18H10T — на 8 %. При нагреве образцов из стали марки Ст.3 до температуры, равной 350 °С, предел текучести уменьшился на 24 %, при нагреве образцов из стали марки 20X13 — на 23 %, при нагреве образцов из стали марки 08X18H10T — на 20 %. Предельные характеристики пластичности (относительное удлинение δ и относительное сужение ψ после разрыва) практически не зависят от скорости деформации и температуры и для стали марки Ст.3 составляют $\delta \approx 45 \%$, $\psi \approx 68 \%$, для стали марки 20X13 — $\delta \approx 32 \%$, $\psi \approx 65 \%$, для стали марки 08X18H10T — $\delta \approx 50 \%$, $\psi \approx 70 \%$.

Идентификация математических моделей. По результатам экспериментальных исследований поведения сталей марок Ст.3, 20X13 и 08X18H10T при статическом и динамическом нагружениях определены параметры модели Джонсона — Кука. Напряжение текучести определяется как функция деформации, скорости деформации и температуры [6]:

$$\sigma_{JC} = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*)(1 - T^{*m}). \quad (1)$$

Здесь A , B , C , n , m — параметры материала; ε_p — эффективная пластическая деформация; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ — безразмерная пластическая скорость деформации ($\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ с}^{-1}$); $T^* = (T - T_0)/(T_m - T_0)$ — модифицированная гомологическая температура; $T_0 = 293 \text{ К}$ — температура окружающей среды; $T_m = 1723 \text{ К}$ — температура плавления материала.

Таблица 1

Параметры моделей для стали марки Ст.3

Модель	A , МПа	B , МПа	n	C	C_2	p	m
1	412,5	1201	0,83	$2,18 \cdot 10^{-2}$	—	—	0,999
2	394,0	1136	0,83	$1,74 \cdot 10^{-2}$	0,00184	—	0,983
3	412,0	1223	0,83	$2,00 \cdot 10^{-2}$	—	—	0,996
4	192,0	570	0,83	$3,61 \cdot 10^{-2}$	—	26,758	0,993

Таблица 2

Параметры моделей для стали марки 20X13

Модель	A , МПа	B , МПа	n	C	C_2	p	m
1	611	956,5	0,4090	$1,26 \cdot 10^{-2}$	—	—	1,010
2	541	754,0	0,3978	$1,03 \cdot 10^{-2}$	0,00407	—	0,964
3	609	951,9	0,4096	$1,27 \cdot 10^{-2}$	0	—	1,008
4	611	708,0	0,3700	$5,56 \cdot 10^3$	—	0,9077	0,877

Таблица 3

Параметры моделей для стали марки 08X18H10T

Модель	A , МПа	B , МПа	n	C	C_2	p	m
1	248,8	1339	0,6939	$8,18 \cdot 10^{-3}$	—	—	1,180
2	244,0	1338	0,7130	$7,49 \cdot 10^{-3}$	0,000822	—	1,164
3	249,0	1339	0,6950	$8,18 \cdot 10^{-3}$	—	—	1,179
4	120,0	648	0,6958	$1,53 \cdot 10^{-2}$	—	63,288	1,178

Изменение температуры материала за счет работы пластической деформации (адиабатического нагрева) рассчитывается по формуле

$$\Delta T = 0,9W_p/(\rho C_p),$$

где W_p — работа пластической деформации; ρ — плотность материала; C_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении.

Помимо линейного по логарифму скорости деформации множителя $1 + C \ln \dot{\epsilon}^*$ в (1) (модель 1) рассматривались другие множители, учитывающие влияние скорости деформации на напряжение текучести: $1 + C \ln(\dot{\epsilon}^*) + C_2 \ln(\dot{\epsilon}^*)^2$ (модель 2) [7], $(\dot{\epsilon}^*)^C$ (модель 3) [8], $1 + (\dot{\epsilon}^*/C)^{1/p}$ (модель 4) [9]. Здесь C_2 , p — параметры материала.

В моделях использовались следующие характеристики исследованных сталей: $\rho = 7850$ кг/м³, модуль Юнга $E = 200$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,28$, модуль сдвига $G = 78$ ГПа, $C_p = 462$ Дж/(кг · К).

Полученные в ходе решения оптимизационной задачи параметры модели приведены в табл. 1–3. Для стали марки Ст.3 наилучшее приближение (минимальное отклонение расчетной кривой от экспериментальных диаграмм деформирования) достигается при использовании модели 1, для сталей марок 20X13, 08X18H10T — при использовании модели 4. На рис. 1 приведены кривые деформирования, рассчитанные с использованием моделей, дающих наилучшее приближение экспериментальных кривых, а также экспериментальные диаграммы деформирования, полученные при различных условиях нагружения.

Верификация моделей деформирования сталей. Поскольку для идентификации математических моделей используются результаты простых (базовых) экспериментов (однородное одноосное напряженное состояние, постоянные скорость деформации и температура), требуется проверка применимости определяющих соотношений для реальных усло-

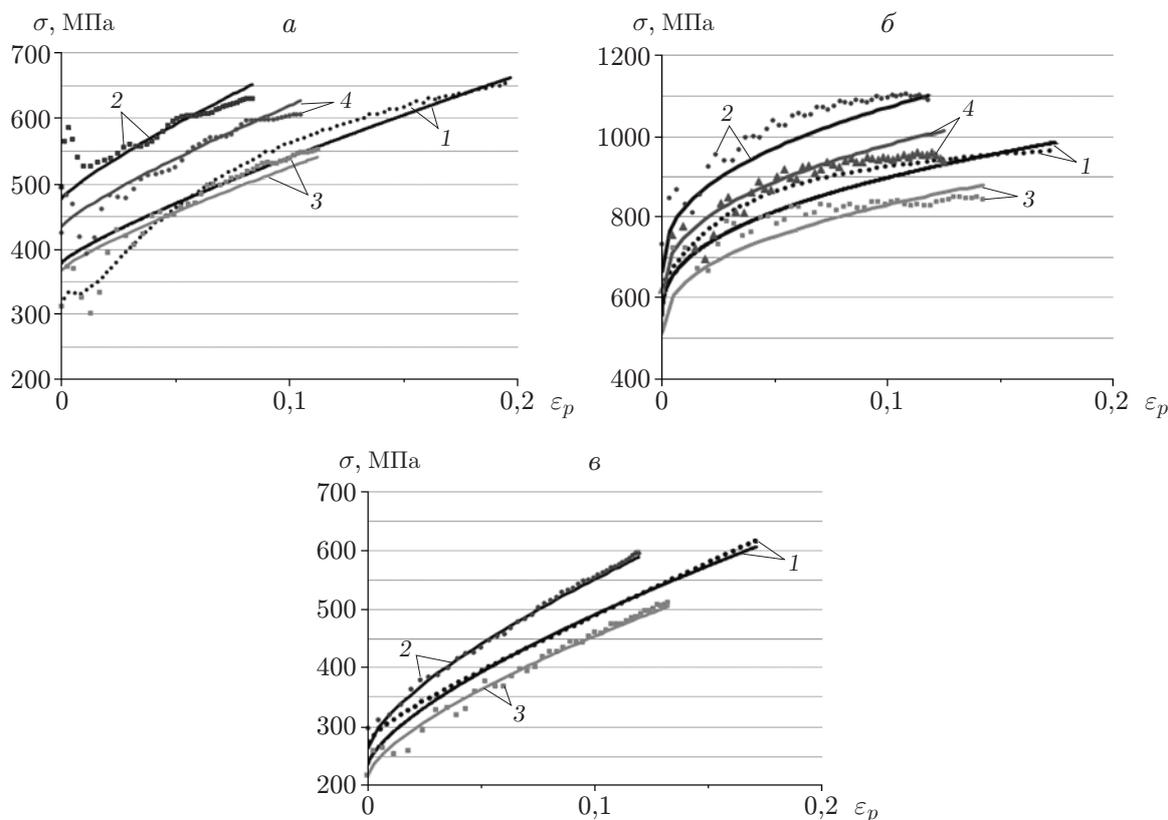


Рис. 1. Диаграммы статического (1) и динамического (2–4) деформирования образцов из сталей различных марок:
 а — Ст.3, б — 20X13, в — 08X18N10T; 1, 2 — $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3 — $T = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 — $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$; линии — результаты расчетов по модели, точки — экспериментальные данные

вий работы узлов конструкций. Напряженно-деформированное состояние в них не является однородным одноосным, а скорость деформации может существенно изменяться в процессе нагружения. Для проверки адекватности модели проводятся специальные тестовые эксперименты, которые являются достаточно простыми и допускают однозначную трактовку результатов и численное воспроизведение без упрощений. В то же время напряженное состояние, а также характер изменения параметров нагружения в тестовых и базовых экспериментах различаются.

Для верификации моделей деформирования сталей проводились эксперименты при высокоскоростном внедрении инденторов со сферической и конической головными частями в образцы из исследуемого материала [10, 11] и при сжатии образцов по диаметру. В первом верификационном эксперименте индентор с образцом размещались в системе разрезного стержня и нагружались летящим с некоторой скоростью ударником. В ходе эксперимента регистрировались деформации в сечениях нагружающего и опорного стержней, а также проводились измерения характерных размеров пластического отпечатка в образце.

Во втором верификационном эксперименте (динамическое сжатие по диаметру) использовался цилиндрический образец в виде таблетки, повернутой таким образом, чтобы его нагружение осуществлялось по диаметральной плоскости. Схема нагружения образца аналогична схеме испытания на раскалывание [12]. Как и в первом эксперименте, с помощью тензодатчиков, расположенных на мерных стержнях, проводилась регистрация

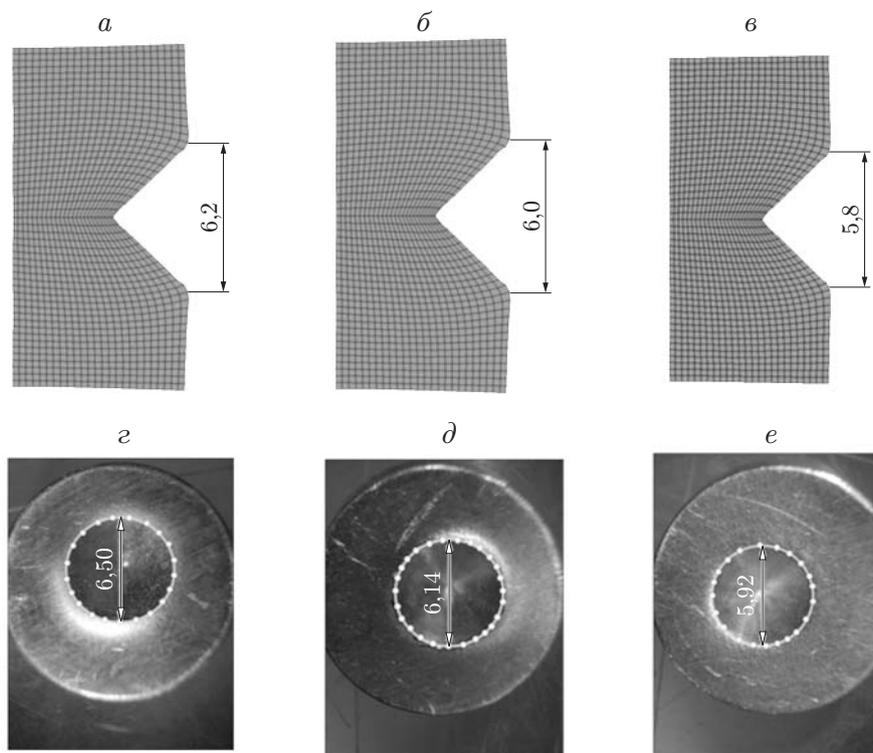


Рис. 2. Пластические отпечатки, полученные в вычислительном (а–в) и натурном (z–e) экспериментах при внедрении конического индентора в образцы из сталей различных марок:

а, z — Ст.3, б, d — 20X13, в, e — 08X18H10T

импульсов деформаций. Полученная информация, а также данные об остаточной форме образца использовались для верификации моделей упругопластического поведения материалов.

Нагружение образцов проводилось в системе разрезного стержня диаметром 20 мм, выполненного из высокопрочной стали. В случае внедрения конического индентора стальной ударник диаметром 20 мм и длиной 300 мм разгонялся до скорости, равной 18,3 м/с, а в случае использования сферического индентора и при сжатии по диаметру — до скорости, равной 22,4 м/с.

При моделировании экспериментов по высокоскоростному внедрению в области контакта индентора и образца учитывалось трение (коэффициент трения равен 0,1). В случае индентирования расчет проводился в плоской осесимметричной постановке, в случае сжатия по диаметру — в трехмерной постановке.

Результаты сравнения отпечатков инденторов, полученных в натурном и численном экспериментах при использовании конического индентора, приведены на рис. 2, при использовании сферического индентора — на рис. 3. В случае использования конического индентора относительная погрешность при расчете диаметра отпечатка для стали марки Ст.3 составила 4,6 %, для стали марки 20X13 — 2,3 % и для стали марки 08X18H10T — 3 %. В случае использования сферического индентора соответствующая погрешность для стали марки Ст.3 составила 2 %, для сталей марок 20X13 и 08X18H10T — 1 %.

На рис. 4 приведены формы образцов после сжатия по диаметру, полученные в расчете и определенные в натурном эксперименте.

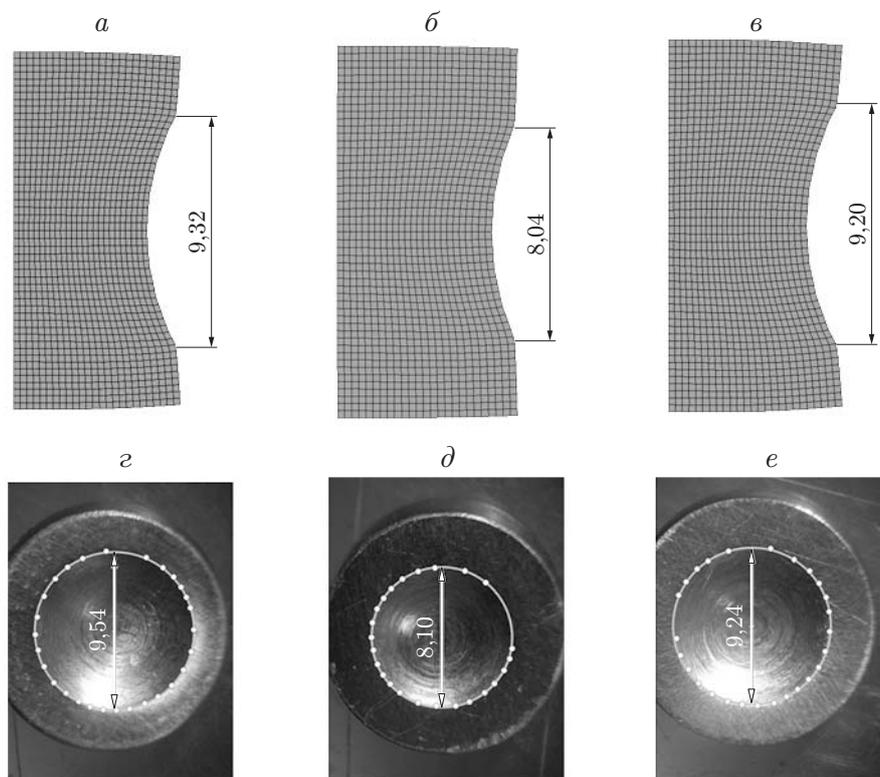


Рис. 3. Пластические отпечатки, полученные в вычислительном (*a–в*) и натурном (*z–e*) экспериментах при внедрении сферического индентора в образцы из сталей различных марок:

a, z — Ст.3, *б, д* — 20X13, *в, e* — 08X18H10T

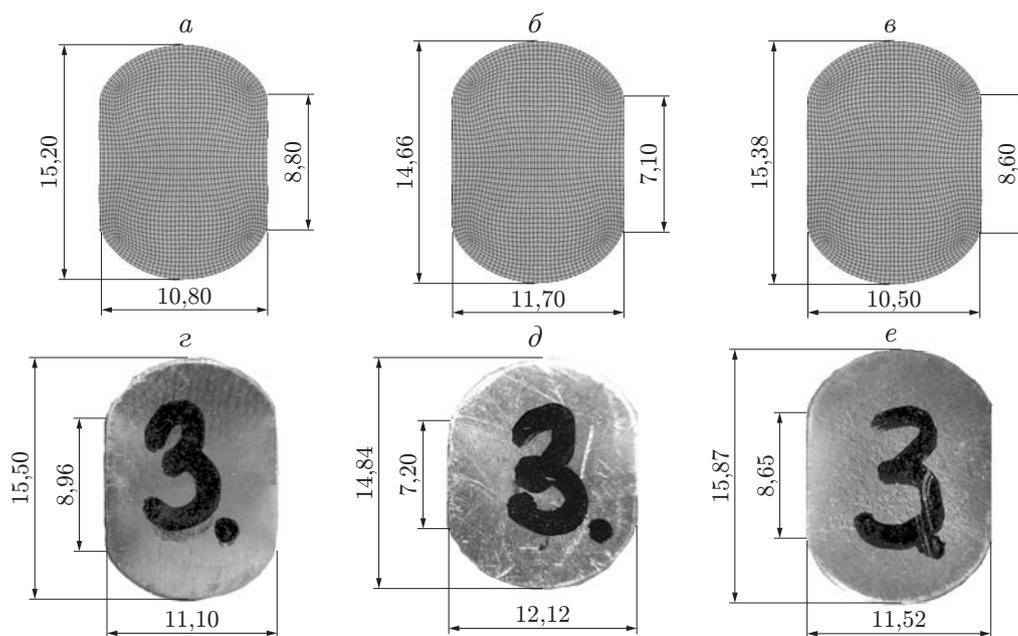


Рис. 4. Формы образцов из сталей различных марок, полученные в расчете (*a–в*) и определенные в натурном эксперименте (*z–e*):

a, z — Ст.3, *б, д* — 20X13, *в, e* — 08X18H10T

Следует отметить, что для стали марки Ст.3 максимальное относительное отклонение рассчитанных характерных размеров от измеренных составило приблизительно 3 %, для стали марки 20X13 — 3,5 %, для стали марки 08X18H10T — примерно 9 %.

В целом результаты верификации моделей деформирования по изложенным схемам показывают, что результаты натуральных экспериментов и численного моделирования хорошо согласуются как по остаточным формам образцов, так и по временным характеристикам процесса пластического деформирования.

Заключение. В результате проведенных испытаний образцов из сталей марок Ст.3, 20X13 и 08X18H10T получены диаграммы деформирования при сжатии и растяжении. Отмечено, что для исследованных марок стали зависимости предела текучести от скорости деформации и температуры различаются. По результатам серии статических и динамических экспериментов при различных значениях температуры для исследованных материалов идентифицированы математические модели из пакета программ LS-DYNA. Эти модели верифицированы в тестовых экспериментах при высокоскоростном внедрении конического и сферического инденторов, а также в эксперименте при динамическом сжатии образца по диаметру в системе разрезного стержня. Сравнение результатов натуральных и вычислительных экспериментов позволяет сделать вывод о достоверности математических моделей для рассмотренных в работе материалов, а также о возможности их использования при анализе напряженно-деформированного состояния и прочности элементов конструкций в условиях динамических нагружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кольский Г.** Исследование механических свойств материалов при больших скоростях нагружения // *Механика*. 1950. № 4. С. 108–119.
2. **Брагов А. М., Ломунов А. К.** Особенности построения диаграмм деформирования методом Кольского // *Прикладные проблемы прочности и пластичности. Статика и динамика деформируемых систем: Всесоюз. межвуз. сб.* Горький: Горьк. ун-т, 1984. С. 125–137.
3. **Bragov A. M., Lomunov A. K.** Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method // *Intern. J. Impact Engng.* 1995. V. 16, N 2. P. 321–330.
4. **Nicholas T.** Tensile testing of materials at high rates of strain // *Exp. Mech.* 1981. V. 21, N 5. P. 177–195.
5. **Брагов А. М.** Экспериментальный анализ процессов деформирования и разрушения материалов при скоростях деформации $10^2 \div 10^5 \text{ с}^{-1}$: Дис. ... д-ра техн. наук. Н. Новгород, 1998.
6. **Johnson G. R., Cook W. H.** A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // *Proc. of the 7th Intern. symp. on ballistic*, Hague (Netherlands), 19–21 Apr. 1983. Hague: S. n., 1983. P. 541–547.
7. **Huh H., Kang W. J.** Crash-worthiness assessment of thin-walled structures with the high-strength steel sheet // *Intern. J. Vehicle Design.* 2002. V. 30, N 1/2. P. 1–21.
8. **Allen D. J., Rule W. K., Jones S. E.** Optimizing material strength constants numerically extracted from Taylor impact data // *Exp. Mech.* 1997. V. 37, N 3. P. 333–338.
9. **Cowper G. R., Symonds P. S.** Strain hardening and strain rate effects in the impact loading of cantilever beams: *Appl. Math. Rep.* / Providence: Brown Univ., 1958.

10. **Константинов А. Ю.** Экспериментально-расчетное исследование поведения конструкционных материалов под действием динамических нагрузок: Дис. . . . канд. техн. наук. Н. Новгород, 2007.
11. **Котов В. Л., Константинов А. Ю., Кибец Ю. И. и др.** Численное моделирование плоскопараллельного движения конических ударников в упругопластической среде // Пробл. прочности и пластичности. 2013. Т. 75, № 4. С. 303–311.
12. **Rodriguez T., Navarro C., Sanchez-Galvez V.** Splitting tests: an alternative to determine the dynamic tensile strength of ceramic materials // J. Physique IV. 1994. V. 4. P. 101–106.

Поступила в редакцию 8/VI 2015 г.
