

УДК 539.3

ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ ПЛАСТИЧНОГО МЕТАЛЛА ПРИ ВЫСОКОЙ СКОРОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ НАПРЯЖЕННЫХ СОСТОЯНИЯХ

Ш.-В. Чжан, Ц.-Л. Лю, Г.-У Жэнь, Ц.-Чж. Ли

Институт гидродинамики, 621900 Мянъян, Сычуань, Китай, zhangswxueshu@163.com

Измерена амплитуда упругого предвестника в образцах алюминиевого сплава LY12 в различных предварительно напряженных состояниях. Хотя материал не подвергается хрупкопластическому переходу, амплитуда упругого предвестника возрастает при предварительном сжатии. Показано, что амплитуда упругого предвестника связана не только с пределом текучести, но и с напряженным состоянием. Сформулирован метод получения более точного значения предела текучести материалов как при одноосной деформации, так и в условиях одноосного напряжения.

Ключевые слова: предел текучести, упругий предвестник, высокая скорость деформирования.

DOI 10.15372/FGV20150615

ВВЕДЕНИЕ

Предел текучести играет важную роль при описании перехода от упругого состояния к пластическому. В настоящее время его измеряют в экспериментах тремя методиками. В первой методике используются устройства для квазистатического деформирования материалов, вторая методика — разрезной стержень Гопкинсона [1–7]. В этих методиках скорость деформирования не превышает 10^4 с^{-1} . В третьей методике [8, 9] используется легкогазовая пушка и с помощью лазерного доплеровского интерферометра VISAR измеряется профиль скорости свободной поверхности образца исследуемого материала. Затем по нему рассчитывают предел текучести. Этот метод дает прямое и физически ясное понимание измеряемой величины.

Как показано во многих исследованиях [10–16], предел текучести зависит от скорости деформирования. Большой интерес в этом плане представляет керамика на основе оксида алюминия или бетона. Однако имеется ряд возражений, связанных с анализом причин увеличения предела текучести. Особенно это касается результатов, получаемых по методике разрезного стержня Гопкинсона [17], в которой ключевым считается предположение об одномерности напряженного состояния, что не яв-

ляется строго справедливым, особенно при высокой скорости деформирования, когда необходимо рассматривать и радиальное напряжение. Кроме того, в этой методике используются образцы малого диаметра и контролировать напряженное состояние невозможно из-за влияния боковой волны разрежения при измерении. Авторы [18] для изучения неупругого режима деформирования материалов предложили экспериментальную методику, в которой контролируется дополнительное радиальное напряжение сжатия в образцах, подвергнутых плоскому удару. В этой методике при плоском ударе в центре образца с высокой точностью подерживалось напряженное состояние до прихода боковой волны разгрузки. Получено увеличение предела текучести керамического оксида алюминия в результате хрупкопластического перехода. Эксперименты [19] с радиальным напряжением и без него в определенной мере подтвердили вывод [18]. В работе [20] был измерен предел упругости на ударной адиабате при различных значениях радиального напряжения и использован для анализа критериев хрупкого разрушения или перехода к пластическому течению. Но в случае, когда предварительно напряженное состояние не было достаточно интенсивным для стимуляции хрупкопластического перехода материалов, влияние предварительного напряжения на предел упругости Гюгонио не был однозначно определен из-за ограниченного числа экспериментальных результатов. Предварительное напряжение сжатия в об-

© Zhang Shiwen, Liu Cangli, Ren Guowu, Li Qingzhong, 2015.

Institute of Fluid Physics, CAEP, 919-101 Mianyang, Sichuan, P. R. China.



Рис. 1. Схема предварительно сжатого образца

разцах достигалось за счет осаживания горячего стального кольца, ограничивающего образец исследуемого материала. Однако значение начального предварительного напряжения сжатия было получено путем численного расчета, а не прямым измерением. Как известно, тепловое разупрочнение значительно влияет на механические свойства металла. Например, предел текучести стали 30CrMrSi равен 873 МПа при комнатной температуре и 232 МПа при 600 °С. Кольцо из этой стали может переходить в пластическое состояние при высокой температуре, и предварительное напряжение, создаваемое в плоском образце, не будет достаточно большим. Поэтому величина начального радиального напряжения в [20] была переоценена, что привело к систематической ошибке в ее значениях. Необходимо прямое измерение предварительного напряжения сжатия.

В данной работе мы улучшили технику создания предварительного радиального сжатия плоского образца. Пластичный алюминиевый сплав LY12, аналогичный алюминиевому сплаву 2024, не сопровождается хрупкопластичным переходом, и начальное предварительное напряжение сжатия измерялось прямо в опыте. При помощи VISAR получены профили упругого предвестника в различных предварительно сжатых состояниях. Путем анализа связи между скоростями упругого предвестника и состояниями предварительного сжатия был исследован механизм увеличения предела текучести при высокой скорости деформирования.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО

В опытах плоский ударник (толщина 2 мм, диаметр 95 мм), метаемый при помощи легкогазовой пушки, ударял по дискообразному об-

разцу (толщина 8 мм, диаметр 80 мм) из испытываемого материала. Скорость ударника тщательно измерялась. В исследуемом образце до удара создавалось однородное состояние с предварительным сжатием в радиальном направлении. После соударения ударника с образцом при помощи интерферометра VISAR измерялся временной профиль скорости свободной поверхности образца в аксиальном направлении и регистрировался упругий предвестник при различных значениях предварительного сжатия.

На рис. 1 приведена схема образца, предварительно сжатого за счет горячей посадки с натягом. Внутренний диаметр обжимного кольца был меньше внешнего диаметра плоского образца. Кольцо нагревалось так, чтобы в него можно было вставить образец. При охлаждении кольца его внутренний диаметр уменьшался, и в образце устанавливалось однородное сжимающее напряжение. Радиальная деформация предварительного сжатия ε_r^0 была получена прямым измерением длины отрезка контрольной линии до и после нагрева сборки. Начальная длина контрольного отрезка около 40 мм, т. е. его концы находились вдали от границы образца. Начальное сжимающее напряжение получено по формуле $\sigma_r^0 = E/(1 - \nu)\varepsilon_r^0$, где E — модуль Юнга, ν — коэффициент Пуассона. Для того чтобы уменьшить тепловое разупрочнение образца сплава LY12, в тепловом контакте с ним находился стержень из латуни размером $\varnothing 30 \times 170$ мм, который отводил тепловую энергию от образца, и в результате его температура была невысокой. Процесс охлаждения образца моделировали численно при помощи программного пакета FEM/MARC. Результаты показали, что температура контактной поверхности между образ-

цом и кольцом была меньше $110\text{ }^{\circ}\text{C}$, даже если обжимное кольцо предварительно было нагрето до $550\text{ }^{\circ}\text{C}$. Даже в центре образца температура была ниже $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ и в течение 5 мин уменьшилась до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Изменение размера контрольного отрезка показывало, что в области размером, равным длине отрезка, реализуется упругое поле деформаций. Ввиду достаточно большого размера образца, волна разрежения с внешней границы не достигала центра образца в течение испытаний, и размер области однородных напряжений соответствовал требованиям эксперимента. Необходимо отметить, что толщина образца немного увеличивалась за счет предварительного сжатия. Но коэффициент Пуассона был мал, и это увеличение существенно не влияло на результаты.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 2 показаны профили скорости свободной поверхности образцов при различных значениях предварительной радиальной деформации ε_r^0 . Видно, что амплитуда упругого предвестника в образцах увеличивается с возрастанием деформации предварительного сжатия. При $\varepsilon_r^0 = 0, 965 \cdot 10^{-6}$ и $1886 \cdot 10^{-6}$ амплитуда скорости предвестника составляла 88, 95 и 121 м/с соответственно. При реализованных ударных давлениях не наблюдалось никаких фазовых переходов. Объяснение увеличения предела текучести при переходе от состояния одноосной деформации к состоянию неодносной деформации является основной задачей данного исследования.

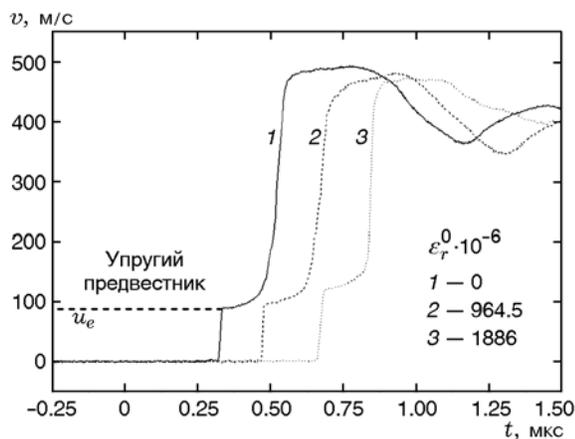


Рис. 2. Профили скорости свободной поверхности образцов

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

3.1. Скорость упругого предвестника в состоянии одноосного напряжения

Хорошо известно, что при ударе по торцу тонкого стержня, не подвергавшегося действию внешних сил, по нему распространяется упругая волна с амплитудой, прямо пропорциональной скорости удара. В стержне возникает пластическая деформация, если скорость удара v превышает предельную скорость v_y , определяемую согласно [21]:

$$|v| > v_y = 2 \frac{v_y}{2} = 2 \frac{Y(\dot{\varepsilon})}{\rho_0 C_0}, \quad C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho_0}}. \quad (1)$$

Здесь C_0 — продольная скорость звука, $Y(\dot{\varepsilon})$ — динамический предел текучести при одноосном напряженном состоянии, ρ_0 — начальная плотность материала образца. При этом условии в стержне сосуществуют волна упругого предвестника и пластическая волна. Амплитуда массовой скорости упругого предвестника равна $v_y/2$. При отражении упругой волны скорость поверхности свободного торца удваивается до v_y , следовательно, v_y является предельной скоростью упругого предвестника при одноосном напряжении.

3.2. Скорость упругого предвестника при одноосной деформации

При одноосной деформации условие текучести Мизеса имеет вид [21]

$$\sigma_x - \sigma_r = Y(\dot{\varepsilon}), \quad (2)$$

где σ_x — осевое напряжение (в направлении удара), σ_r — радиальное напряжение. При одноосной деформации величины σ_x и σ_r связаны соотношением

$$\sigma_r = \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_x. \quad (3)$$

Комбинируя (2) и (3), получаем предел упругости для тела неограниченного объема (упругий предел Гюгонио) относительно осевого напряжения σ_x :

$$Y_H(\dot{\varepsilon}) = \frac{1 - \nu}{1 - 2\nu} Y(\dot{\varepsilon}), \quad (4)$$

который больше предела упругости $Y(\dot{\varepsilon})$ при одноосном напряжении. Например, при $\nu = 1/3$

$Y_H(\dot{\epsilon})$ в два раза больше $Y(\dot{\epsilon})$. Упругий предел Гюгонио можно рассчитать по скорости свободной поверхности образца:

$$Y_H(\dot{\epsilon}) = \frac{1}{2} \rho_0 C_L u_e, \quad C_L = \sqrt{\frac{E_L}{\rho_0}}, \quad (5)$$

$$E_L = \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} E,$$

где C_L — скорость продольной волны, E_L — продольный модуль Юнга, u_e — скачок скорости, соответствующий пределу упругости при одноосной деформации. При заданном значении $Y_H(\dot{\epsilon})$ амплитуда скорости выражается следующим образом:

$$u_e = \frac{2Y_H(\dot{\epsilon})}{\rho_0 C_L}.$$

3.3. Скорость упругого предвестника при предварительном сжатии

В наших ударных экспериментах радиальное напряжение σ_r включало в себя начальное напряжение предварительного сжатия σ_r^0 :

$$\sigma_r = \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_x + \sigma_r^0.$$

В этом случае уравнение (2) можно переписать в виде

$$\sigma_x - \left(\frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_x + \sigma_r^0 \right) = Y(\dot{\epsilon}).$$

Следовательно,

$$\sigma_x = \frac{1 - \nu}{1 - 2\nu} (Y(\dot{\epsilon}) + \sigma_r^0).$$

В условиях ограничения предел текучести при наличии предварительного сжатия принимает вид

$$Y_{H1}^*(\dot{\epsilon}) = Y_H(\dot{\epsilon}) + \frac{1 - \nu}{1 - 2\nu} \sigma_r^0. \quad (6)$$

При этом скорость упругого предвестника определяется по формуле

$$u_e^* = \frac{2Y_{H2}^*(\dot{\epsilon})}{\rho_0 C_L^*},$$

где C_L^* — скорость продольной волны при наличии начального предварительного сжатия.

Результаты экспериментов
($E = 72$ ГПа, $\nu = 0.3$, $\rho = 2.77$ кг/см³, $C_L = 6.315$ км/с)

$\epsilon_r^0 \cdot 10^{-6}$	σ_r^0 , МПа	v_f , м/с	u_e^* , м/с	$Y_{H2}^*(\dot{\epsilon})$, МПа	$Y_{H1}^*(\dot{\epsilon})$, МПа	δ , %
0	0	497.82	87.56	765.8	765.8	0
964.5	99.2	497.06	95.24	832.9	939.4	11.3
1 886	194	499.60	121.03	1 058.5	1 105.3	4.2

Отсюда может быть получен предел текучести

$$Y_{H2}^*(\dot{\epsilon}) = \frac{1}{2} \rho_0 C_L^* u_e^*. \quad (7)$$

Теоретическое рассмотрение показало, что предварительное сжатие не влияет на скорость продольной волны. В специальном эксперименте было показано, что $C_L^* = C_L$. Скорость упругого предвестника при предварительном сжатии определяется соотношением

$$u_e^* = u_e + \frac{1}{\rho_0 C_L} \frac{2(1 - \nu)}{1 - 2\nu} \sigma_r^0. \quad (8)$$

Видно, что значение u_e^* растет при увеличении предварительного сжатия, даже если не наблюдается никакого фазового перехода. В таблице приведены результаты экспериментов. В этих опытах скорость ударника $v_f \approx 500$ м/с, т. е. оценка ударного давления в образцах около 3 940 МПа, а максимум начального радиального напряжения только 194 МПа, что составляет 4.92 % от ударного давления. Таким образом, статическое напряжение в этих экспериментах мало, и его влиянием на предел текучести можно пренебречь. В таблице приведена относительная ошибка $\delta = \left| \frac{Y_{H1}^*(\dot{\epsilon}) - Y_{H2}^*(\dot{\epsilon})}{Y_{H1}^*(\dot{\epsilon})} \right|$ расчета предела текучести $Y_H^*(\dot{\epsilon})$ по формулам (6) и (7) — 11.3 и 4.2 % соответственно. Таким образом, $Y_{H1}^*(\dot{\epsilon}) \approx Y_{H2}^*(\dot{\epsilon})$, что согласуется с относительно невысокой точностью измерения низких скоростей.

Рис. 3 иллюстрирует соотношение между напряжением предварительного сжатия σ_r^0 и пределом текучести $Y_H^*(\dot{\epsilon})$ в условиях ограничения. Обе эти величины могут быть хорошо предсказаны при адаптации условия текучести по Мизесу с учетом предварительного сжатия. Теоретический подход позволяет объяснить увеличение скорости упругого предвестника u_e^* при увеличении предварительной деформации σ_r^0 .

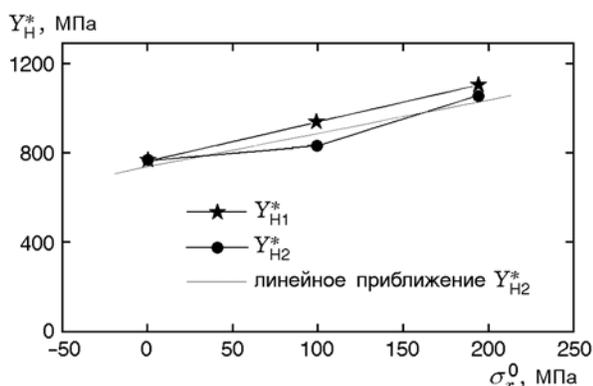


Рис. 3. Зависимость предела текучести от предварительной радиальной деформации

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Предел текучести $Y(\dot{\epsilon})$ при очень высокой скорости деформации ($\approx 10^4 \text{ с}^{-1}$) в состоянии одноосного напряжения не может быть измерен при помощи существующих экспериментальных методик, особенно техники разрезного стержня Гопкинсона, в которой генерируется неодносное напряженное состояние [17, 22]. Однако экспериментальный метод, рассматриваемый в данной работе, позволяет достигать высокой скорости деформирования с контролируемыми значениями одноосной деформации и предварительного сжатия. Получаемое эффективное значение $Y(\dot{\epsilon})$ зависит от механических свойств материала при высокой скорости деформирования и может использоваться при численном моделировании.

В методике разрезного стержня Гопкинсона осевое σ_x и радиальное σ_r напряжения удовлетворяют уравнению

$$\sigma_x - \sigma_r^0(t) = Y(\dot{\epsilon}). \quad (9)$$

Радиальное напряжение $\sigma_r^0(t)$ не является постоянной величиной из-за дополнительных напряжений, обусловленных радиальным сжатием ограничивающим кольцом. При отсутствии ограничения $\sigma_r^0(t) = 0$ из уравнения (9) следует

$$Y(\dot{\epsilon}) = \sigma_x, \quad (10)$$

т. е. предел текучести равен осевому напряжению σ_x . Но если $\sigma_r^0(t) \neq 0$, из уравнения (9) следует

$$Y(\dot{\epsilon}) = \sigma_x - \sigma_r^0(t), \quad (11)$$

т. е. предел текучести не равен осевому напряжению, что связано с наличием напряжения $\sigma_r^0(t)$, и модель деформирования материала должна учитывать влияние $\sigma_r^0(t)$. Обычно величиной $\sigma_r^0(t)$ можно пренебречь, если скорость удара мала, но ее необходимо учитывать, если скорость удара высока или существует дополнительное ограничивающее напряжение.

Если предел текучести связан с давлением, уравнение (11) можно переписать в виде

$$Y(\dot{\epsilon}, p) = \sigma_x - \sigma_r^0(t). \quad (12)$$

Для большинства металлов влияние гидродинамического давления на предел текучести может быть проигнорировано, потому что скорость удара в методике разрезного стержня Гопкинсона невелика и едва достигает сотни метров в секунду. Однако для геологических пород и хрупких материалов, подобных бетону, модели деформирования могут быть чувствительны к давлению, и опыты необходимо проводить при относительно низком давлении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально показано, что скорость упругого предвестника в алюминиевом сплаве LY12 растет с увеличением радиального напряжения предварительного сжатия. Только правильное понимание причин увеличения напряжения текучести для обычных пластичных металлов позволяет понять влияние параметров напряженного состояния на предел текучести или на модель деформирования других, особенно хрупких, материалов. Для многих твердых материалов увеличение предела текучести обусловлено двумя факторами. Первым является смена механизма деформирования, например при переходе из хрупкого состояния в пластичное. Другая причина — влияние вида напряженного состояния. Предел текучести в основном изменяется за счет первого фактора. В этом случае можно исследовать материалы, такие как керамический оксид алюминия или бетон, при различных условиях предварительного нагружения.

Работа выполнена при поддержке Национального фонда естественных наук Китая (11272297, 10772165). Авторы выражают благодарность Лаборатории исследований ударных волн и физики детонации Института гидродинамики, коллегам Feng Dongshen, Dai Hongyue, Liu Jun, Fang Maolin, Chen Ziyun, Wang Wei и

Lu Min за помощь в экспериментах, а также благодарят Dong Qi, Fan Cheng, Liu Mingtao, Chen Sen и С. Разоренова за полезные дискуссии.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Davies E. D. H., Hunter S. C.** The dynamic compression testing of solids by the method of the split Hopkinson pressure bar // *J. Mech. Solids*. — 1963. — V. 11, N 8. — P. 155–179.
2. **Lindholm U. S.** Some experiments with the split Hopkinson pressure bar // *J. Mech. Solids*. — 1964. — V. 12, N 5. — P. 317–335.
3. **Nicholas T.** Tensile testing of materials at high rates of strain // *Exp. Mech.* — 1981. — V. 21, N 5. — P. 177–185.
4. **Hoge K. G., Mukherjee A. K.** The temperature and strain rate dependence of the flow stress of tantalum // *J. Mater. Sci.* — 1977. — V. 12, N 8. — P. 1666–1672.
5. **Chen W., Song B., Frew D. J., Forrestal M. J.** Dynamic small strain measurements of a metal specimen with a split Hopkinson pressure bar // *Exp. Mech.* — 2003. — V. 43, N 1. — P. 20–23.
6. **Field J. E., Walley S. M., Bourne N. K., Huntley J. M.** Experimental methods at high rates of strain // *J. Phys. IV France*. — 1994. — V. 4, N 8. — P. 3–22.
7. **Field J. E., Walley S. M., Proud W. G., Goldrein H. T., Siviour C. R.** Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies // *Intern. J. Impact. Eng.* — 2004. — V. 20. — P. 725–775.
8. **Rosenberg Z., Partom Y., Yeshurum Y.** Determination of the Hugoniot elastic limits of differently treated 2024 Al specimens // *J. Phys. D. Appl. Phys.* — 1982. — V. 15. — P. 1137–1142.
9. **Murri W. J., Anderson G. D.** Hugoniot elastic limit of single-crystal sodium chloride // *J. Appl. Phys.* — 1970. — V. 41, N 8. — P. 3521–3525.
10. **Clarke K. D., Comstock R. J., Jr, Mataya M. C., Van Tyne C. J., Matlock D. K.** Effect of strain rate on the yield stress of ferritic stainless steels // *Metall. Mater. Trans. A*. — 2008. — V. 39, N 4. — P. 752–762.
11. **Shirokov A. V., Stepanov G., Zubov V.** Strain rate influence on yield stress of some metals // *J. Phys. IV France*. — 2003. — V. 110. — P. 171–175.
12. **Gray III G. T., Blumenthal W. R., Trujillo C. P., Carpenter II R. W.** Influence of temperature and strain rate on the mechanical behavior of Adiprene L-100 // *J. Phys. IV France*. — 1997. — V. 7. — P. C3-523–528.
13. **Brooks N. W. J., Duckett R. A., Ward I. M.** Temperature and strain-rate dependence of yield stress of polyethylene // *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.* — 1998. — V. 36. — P. 2177–2189.
14. **Boumbimba R. M., Wang K., Bahlouli N., Ahzi S., Rémond Y., Addiego F.** Experimental investigation and micromechanical modeling of high strain rate compressive yield stress of a melt mixing polypropylene organoclay nanocomposites // *Mech. Mater.* — 2012. — V. 52. — P. 58–68.
15. **Morris D. G., Gunther S.** Influence of strain rate on yield stress and stress anomaly in an alloy based on Fe₃Al // *Mater. Sci. Eng. A*. — 1996. — V. 211. — P. 23–32.
16. **Rosen R. S., Paddon S. P., Kassne M. E.** The variation of the yield stress of Ti alloys with strain rate at high temperatures // *J. Mater. Eng. Perform.* — 1999. — V. 8, N 3. — P. 361–367.
17. **Li Q. M., Meng H.** About the dynamic strength enhancement of concrete-like materials in a split Hopkinson pressure bar test // *Intern. J. Solids and Struct.* — 2003. — V. 40, N 4. — P. 343–360.
18. **Zaretsky E. B., Kanel G. I.** Evidence of ductile response of alumina ceramic under shock wave compression // *J. Mech. Solids*. — 2002. — V. 81, N 7. — P. 1192–1194.
19. **Kanel G. I., Razorenov S. V., Savinykh A. S., et al.** A Study of Pre-stress effect on dynamic failure of transparent brittle materials / Final Tech. Rep. of Inst. for High Energy Densities of Russian Academy of Sciences. — 2007.
20. **Kanel G. I., Zaretsky E. B., Rajendran A. M., et al.** Search for conditions of compressive fracture of hard brittle ceramics at impact loading // *Intern. J. Plast.* — 2009. — V. 25. — P. 649–670.
21. **Wang L. L.** *Foundation of Stress Waves*. — 2nd Ed. — Beijing: National Defense Industry Press, 2005. — (in Chinese).
22. **Lu Y. B., Li Q. M.** Dynamic behavior of polymers at high strain-rates based on split Hopkinson pressure bar tests // *Intern. J. Impact. Eng.* — 2011. — V. 38. — P. 41–50.

*Поступила в редакцию 25/VI 2014 г.,
в окончательном варианте — 15/I 2015 г.*