

01,07

Механизмы пластической деформации в нержавеющей стали в условиях высокоскоростного проникания компактных ударников

© С.А. Атрошенко^{1,3}, А.Ю. Григорьев², Г.Г. Савенков²

¹ Институт проблем машиноведения РАН,
Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет),
Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: satroshe@mail.ru

Поступила в Редакцию 7 мая 2019 г.

В окончательной редакции 7 мая 2019 г.

Принята к публикации 20 мая 2019 г.

Представлены результаты исследования поведения аустенитной нержавеющей стали 08X18H10T в условиях высокоскоростного проникания со скоростями 1.5–2.0 km/s. Показано, что в мишени при пробитии наблюдаются три зоны проникания, отличающиеся механизмами пластической деформации и разрушения.

Ключевые слова: Нержавеющая сталь, высокоскоростное проникание, механизмы пластической деформации.

DOI: 10.21883/FTT.2019.10.48242.476

1. Введение

Пробивание толстых преград компактными ударниками неправильной формы (КУНФ), например, типа ударного ядра [1], с начальными скоростями соударения $\sim 1.5\text{--}2.0\text{ km/s}$ является, с точки зрения поведения материалов преград, наименее изученным явлением [2]. Отметим, что при таких скоростях удара в материале преграды реализуется диапазон скоростей деформации равный $10^5\text{--}10^6\text{ s}^{-1}$, а исследование поведения материалов при таких скоростях деформации с помощью апробированных методик также наталкивается на ряд трудностей методического и измерительного характера.

В первую очередь это связано с тем, что при такой скорости удара в преграде развиваются большие пластические деформации, возникают различные дефектные структуры, разогрев материала становится существенным, что может привести в совокупности с высокими давлениями к фазовым и структурным превращениям. Однако при такой скорости удара поведение материала преграды в точке соударения еще не соответствует поведению идеальной сжимаемой жидкости, как это предполагается при скоростях соударения более 4.0 km/s [3]. Кроме того, неправильная форма ударника приводит к сложному напряженно-деформированному состоянию, что также затрудняет анализ процессов, происходящих в толще материала преграды. В частности, неясной является эволюция структуры в процессе прохождения ударной волны, которая образуется при соударении ударника с преградой и бежит впереди ударника. Кроме того, затруднена оценка доли энергии, затраченной на формирование новых образовавшихся структур материала.

Естественно, что такое положение вещей затрудняет создание расчетных методов оценки прочности и

несущей способности дорогостоящих конструкций (например, космических аппаратов (КА) при столкновении с метеоритными частицами и частицами космического мусора) при ударе с вышеназванными скоростями соударения. Поэтому для разработки адекватных моделей пробивания преград или внедрения (в случае преград полубесконечной толщины) необходим большой объем экспериментально-теоретической информации, характеризующий всю совокупность процессов, происходящих в преграде.

В то же время при исследовании процессов высокоскоростных взаимодействий частиц космического мусора с защитными экранами КА такие частицы имитируются сферическими ударниками различной массы [4], что, хотя и значительно упрощает обработку экспериментальных результатов и численное моделирование, приводит к значительной потере точности расчетов.

В настоящей работе были исследованы образцы, вырезанные из преград, пробитых КУНФ, описанных в работе [1]. Начальная скорость соударения составляла $\sim 1.8\text{ km/s}$. Диаметр мишени — 90 mm. Материал преграды — нержавеющая сталь 08X18H10T. Стандартные механические характеристики стали, полученные путем испытаний образцов по ГОСТ 1497, вырезанных из прутка, из которого изготавливались мишени, имели следующие значения: $\sigma_{0.2} = 275\text{ MPa}$, $\sigma_B = 620\text{ MPa}$, $\delta_5 = 59\%$, $\psi = 70\%$.

2. Образцы и методика исследований

Общий вид образцов, подготовленных для металлографических исследований, представлен на рис. 1. Толщина образца — 11 mm.

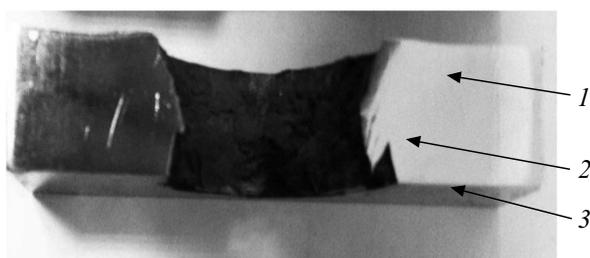


Рис. 1. Образец и зоны проникания.

Исходная структура стали 08X18H10T представляет из себя неравноосные зерна размерами $150 \times 50 \mu\text{m}$, в ряде мест разделены прослойками δ -феррита. Морфология и ориентация зерен соответствует полигонизованному состоянию после горячей прокатки. Наибольшая ось зерен параллельна направлению движения ударника.

Исследования структуры проводились на оптическом микроскопе Axio-Observer Z1 M в светлом поле и в контрасте C-DIC.

Микротвердость стали определялась на микротвердомере SHIMADZU серии HNV-G (по методу Виккерса) при нагрузке 0.49 N.

3. Результаты металлографических исследований и их анализ

В пробитой мишени выделяются три зоны проникания (рис. 1). Первая зона, обусловленная нестационарным этапом проникания [5], по глубине соответствует ~ 0.5 толщины пробития и, вторая $\sim 1/3$ толщины (стационарный этап проникания), третья (связана с откольными явлениями) $\sim 1/6$ толщины.

В первой зоне на расстоянии 1.5–3.8 mm от фронтальной поверхности и 0.15–0.75 mm от края каверны располагается область ротационной деформации, состоящая из дисков, имеющих, практически, идеальную форму окружности. Радиус дисков находится в диапазоне от 35 до 325 μm (рис. 2). Внутри больших окружностей иногда наблюдаются более мелкие круговые элементы. Микротвердость внутри круговых образований выше твердости материала вне этих областей ($HV = 2.62 \text{ GPa}$) на $\sim 25\%$ и в среднем составляет $HV \approx 3.14 \text{ GPa}$. Таким образом, можно предполагать, что на первом этапе проникания, когда скоростные параметры ударника еще достаточно велики, материал мишени не успевает осуществлять диссипацию механической энергии ударника за счет коллективного движения и размножения дислокаций. Поэтому

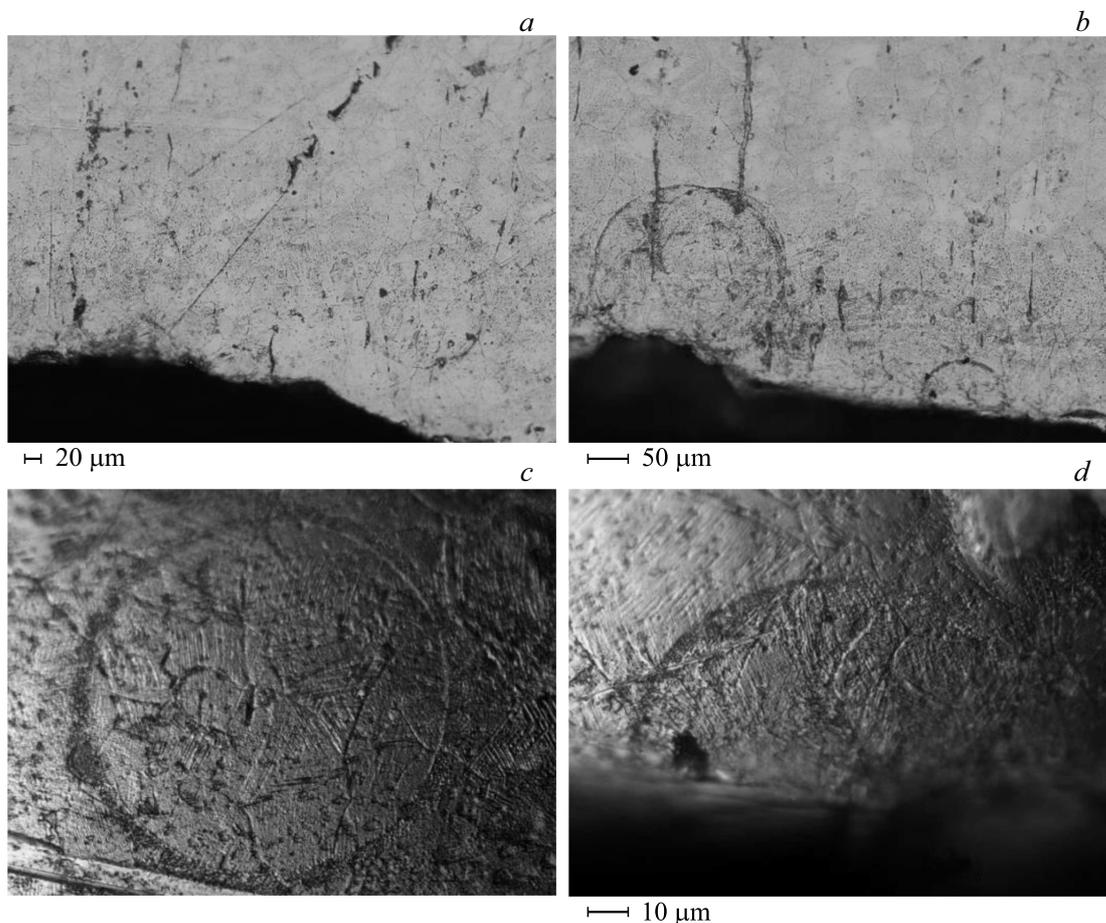


Рис. 2. Области ротационной деформации $\times 200$ (a, b), $\times 1000$ (c, d C-DIC).

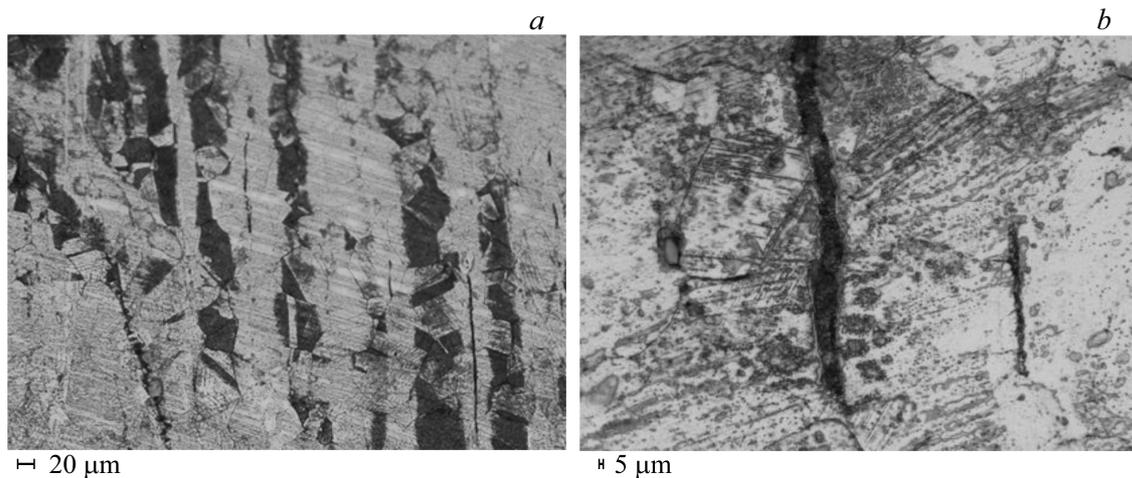


Рис. 3. Двойниковые полосы (а) — $\times 200$, переходящие в микротрещины (b) — $\times 1000$.

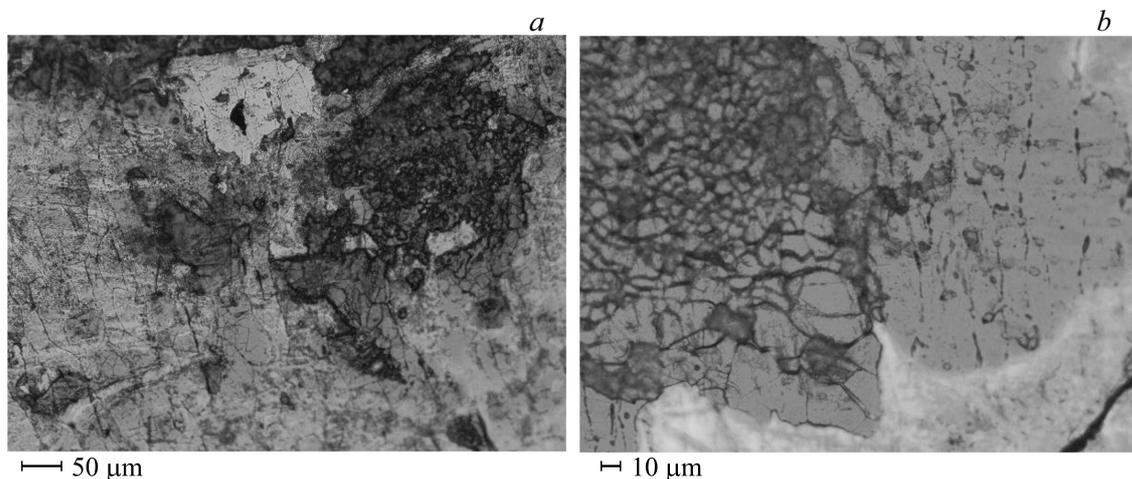


Рис. 4. Оплавление мишени (на расстоянии $4000\mu\text{m}$ от поверхности нагружения) $\times 200$ (а), $\times 1000$ (b).

для поддержания скорости диссипации на необходимом уровне включаются дополнительные ротационные моды пластической деформации [6].

Ранее такие области ротационной деформации были обнаружены во встречных волнах разгрузки [7] в меди, сталях, титановом сплаве, сплавах с памятью формы Cu–Mn. Указанные области в [7] также имели округлую форму диска, внутри которого зерна были измельчены до микрокристаллического (нанокристаллического) состояния, что указывало на динамическую рекристаллизацию материала. В нашем случае динамическая рекристаллизация нержавеющей стали 08X18H10T внутри зон ротационной деформации отсутствовала.

Также в первой зоне мишени на расстоянии 3.0–3.5 mm от нагружаемой поверхности и 0.2–0.7 mm от края каверны обнаружены полосы (рис. 3), состоящие из двойников, образовавшихся в процессе нагружения материала ударной волной, сформировавшейся при проникании ударника. Микротвердость внутри полос в

среднем составляет 3.29 GPa, что выше микротвердости вне этих полос на $\sim 25\%$.

Кроме того, в первой зоне (рис. 4) на расстоянии 4 mm от фронтальной поверхности обнаружены области оплавления металла с измельченной равноосной зеренной структурой (средний размер зерен 5–10 μm, наблюдались также зерна меньшего и большего размера). Таким образом, доля энергии, идущая на пластическое деформирование, была настолько большая, что ее было вполне достаточно для частичного оплавления локальных областей мишени.

Приблизительно на 1/3 толщины от тыльной поверхности мишени, что соответствует стационарному этапу проникания, на расстоянии от 2 до 3 mm на берегах отверстия присутствуют трещины протяженностью до 3 mm, ориентированные относительно направления действия ударника в разные стороны на угол 45 градусов. Такие особенности позволяют полагать, что в условиях динамического воздействия в мишенях

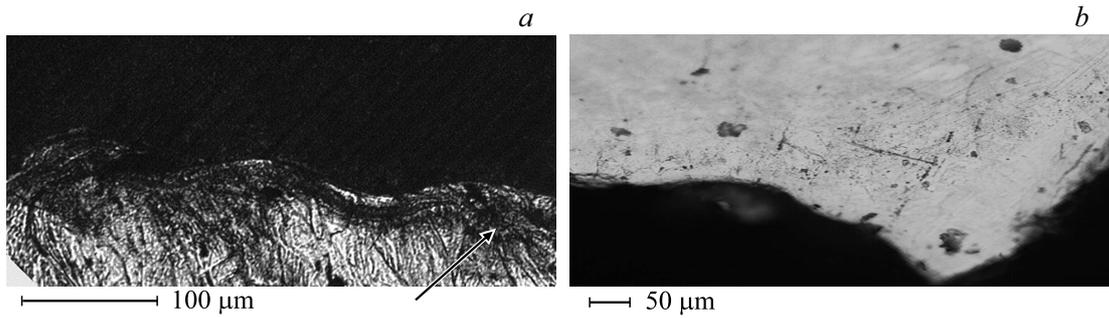


Рис. 5. Волнообразный рельеф на поверхности мишени: а) травленный шлиф, б) нетравленный шлиф, стрелкой указана ПАС.

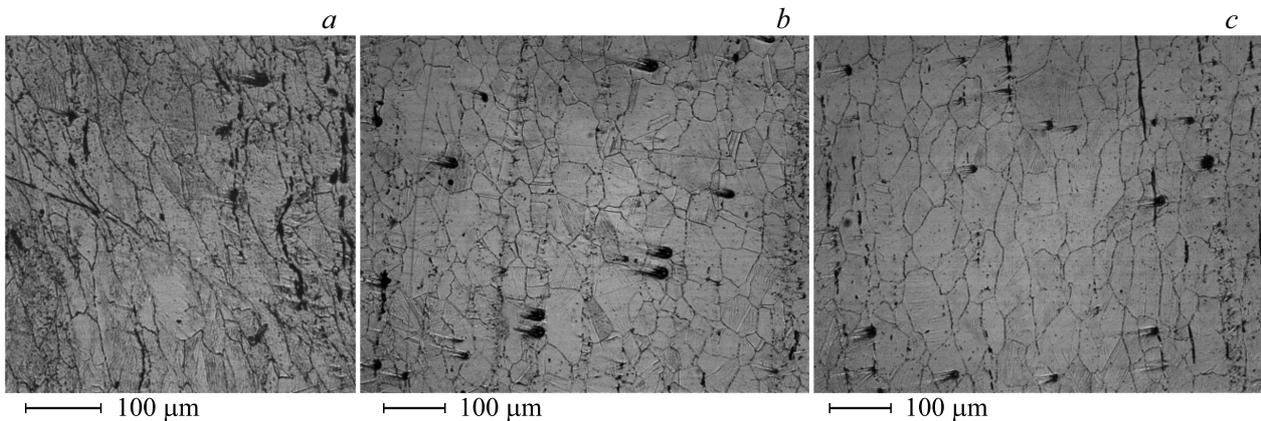


Рис. 6. Локализованные сдвиги и волнообразные следы пластической деформации (а), дробление колоний δ-феррита (б) и следы укрупнения зерен (с).

реализовалось сжатие вдоль одной оси, которое трансформировалось в объемное разноименное деформированное состояние. Вначале тензор деформации (\mathbf{g}) характеризовался только одной диагональной компонентой $\epsilon_3 < 0$, к которой в дальнейшем добавились диагональные компоненты в соотношении: $\epsilon_1 > 0$; $\epsilon_2 > 0$ и $\epsilon_3 < 0$, в результате чего и образовались указанные трещины. Можно также предположить, что возникновение трещин сопровождалось интерференционными эффектами образующихся при ударе волн, на что косвенно указывает близкая по величине периодичность раскрытых трещин и волнообразный профиль рельефа на поверхностях отверстия (рис. 5).

Второй этап процесса проникания ударника характеризуется активацией пластического течения и локализацией сдвигов в форме полос адиабатического сдвига (ПАС) (рис. 5, 6), а также мезотрещинами отрыва длиной до $150 \mu\text{m}$, при этом ПАС также повторяют волнообразный профиль рельефа поверхности каверны. Как известно [8], локализация деформации при высокоскоростном нагружении и образование полос адиабатического сдвига в общем случае связано с нестабильностью пластического течения, возникающей в результате эффекта термического разупрочнения при адиабатической или почти адиабатической пластической деформации. В случае квазистатических условий образование полос

адиабатического сдвига характерно для высокопрочных материалов и, кроме того, для адиабатических условий доля работы сдвиговой пластической деформации во всех материалах и для всех условий нагружения не сохраняется в виде дефектов структуры [8].

Для динамического нагружения образование ПАС, вероятно, возможно. Это связано с тем, что в этом случае реализация образования ПАС возможна через механизм „задержки волны“ [8], который заключается в следующем. При адиабатическом сдвиге, как для квазистатического, так и для высокоскоростного нагружения, должно быть выполнено условие

$$\partial\tau/\partial\gamma = 0, \tag{1}$$

где τ — сдвиговое напряжение пластического течения, γ — пластическая деформация сдвига.

Для динамического нагружения скорость распространения волны пластического сдвига V_p^s определяется выражением

$$V_p^s = \sqrt{\frac{1}{\rho} \frac{d\tau}{d\gamma}}. \tag{2}$$

В случае, когда степень деформационного упрочнения, определяемая соотношением (1), достигает нулевого значения, пластическая волна сдвига перестает распространяться и происходит локализация деформации.

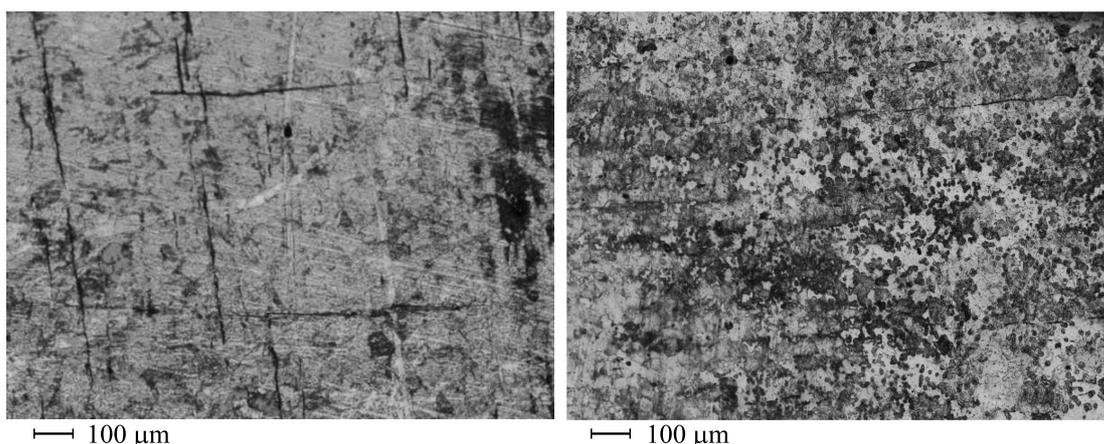


Рис. 7. Откольные и сдвиговые трещины в стали $\times 100$.

В нашем случае сталь 08X18H10T имеет невысокие значения прочности даже при скорости деформации $\dot{\varepsilon} = 2 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ [9]. Так, динамический предел текучести $\sigma_{sd} = 570 \text{ МПа}$, динамический предел прочности $\sigma_{bd} = 950 \text{ МПа}$, при этом динамическое относительное удлинение $\delta_d = 55\%$, динамическое сужение $\psi_d = 66.5\%$, т.е. мы имеем дело с высокопластичной сталью средней прочности.

Локальное тепловыделение, достаточно на этом этапе проникания для процессов рекристаллизации. Рекристаллизация проявляется в виде укрупнения зерен. Внутри зеренной структуры, как и в первой зоне, наблюдаются признаки ротационной (волнообразной) пластической деформации. Все признаки перечисленных эффектов представлены на рис. 6.

В третьей зоне мишени, связанной с интерференцией волн нагрузки и разгрузки, наблюдались два типа трещин: параллельных тыльной поверхности и перпендикулярных им трещин сдвига (рис. 7). Вторые обусловлены дисперсией скорости частиц материала мишени при нагружении ударными волнами в процессе проникания высокоскоростных ударников [10].

И, наконец, несмотря на то, что в процессе пластического деформирования металлов и сплавов могут одновременно реализовываться несколько механизмов течения, конкретный вклад которых определяется типом кристаллической решетки, химическим и фазовым составом, дефектной структурой металла [11], в нашем случае такое утверждение нельзя считать бесспорным.

4. Заключение

В целом по результатам исследований можно констатировать, что при пробитии мишени из стали 08X18H10T трансформации деформированного состояния происходят вследствие диссипации механической энергии в последовательности: скольжение дислокаций, ротационные моды, локализованные адиабатические сдвиги, полосы фрагментированного состояния и

динамической рекристаллизации, локальная динамическая полигонизация и рекристаллизация. Структурные изменения слабо зависят от исходной структуры металла и реализуются с участием интерференционных (волновых) эффектов рассеяния ударной волны.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 17-11-01053

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.И. Колпаков, Г.Г. Савенков, К.А. Рудометкин, А.Ю. Григорьев. *ЖТФ* **86**, 8, 21 (2016).
- [2] В.Н. Аптуков. *Проблемы прочности* **2**, 60 (1990).
- [3] Г.Г. Савенков, Т.А. Хантулева. *ЖТФ* **84**, 1, 38 (2014).
- [4] В.В. Башуров, Г.В. Бебенин, Г.В. Белов, Ю.Н. Бухарев. В сб.: *Прикладные задачи высокоскоростного удара*. ФГУП „РФЯЦ–ВНИИЭФ“, Саров (2011). С. 197.
- [5] Б.К. Барахтин, А.А. Прус, Г.Г. Савенков. *Прикладная механика и техническая физика* **5**, 155 (1989).
- [6] В.В. Рыбин. *Большие пластические деформации и разрушение металлов*. Металлургия, М. (1986) 224 с.
- [7] S. Atroshenko. *Metals dynamic recrystallization up to nanocrystalline size induced shock loading*. AIP Conf. Proc. **1748**, 030005 (2016).
- [8] Г.Б. Ольсон, Дж.Ф. Мескол, М. Азрин. В сб.: *Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов / Под ред. М.А. Мейерса и Л.Е. Мурра*. Металлургия, М. (1984). С. 67.
- [9] Г.Г. Савенков, А.В. Кузнецов. *Вест. Тамбов. ун-та. Сер. Естеств. и технич. науки* **21**, 760 (2016).
- [10] Г.Г. Савенков, Ю.И. Мещеряков, Б.К. Барахтин. *ЖТФ* **80**, 10, 136 (2010).
- [11] Б.А. Зимин, В.Е. Свентицкая, И.В. Смирнов, Ю.В. Судьенков. *ФТТ* **60**, 754 (2018).

Редактор Т.Н. Василевская