

**М.А. Соковиков, В.В. Чудинов, Е.А. Ляпунова,
С.В. Уваров, О.А. Плехов, О.Б. Наймарк**

Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОБИВАНИЯ

Работа посвящена экспериментальному изучению деформационного поведения материалов при динамическом нагружении. Проведено исследование поведения крупнозернистого и субмикроструктурного титана на разрезном стержне Гопкинсона–Кольского с одновременной термографией образца в реальном режиме времени с целью определения доли диссипированной энергии. Исследовалось поведение стали при динамическом растяжении при температурах 22 и 250 °С. Изучено пробивание преграды в виде формирования и выноса пробки при скоростях 101–260 м/с. На установке по исследованию пробивания были исследованы образцы из алюминия марки 6061. После эксперимента образцы подвергались микроструктурному анализу с помощью оптического интерферометра-профилометра и сканирующего электронного микроскопа с последующей обработкой 3D-данных деформационного рельефа.

Ключевые слова: динамическое нагружение материалов, стержень Гопкинсона–Кольского, пробивание преграды, выбивание пробки, термография образцов, микроструктурные исследования.

Среди известных к настоящему времени методов динамических испытаний наибольшее распространение получил метод Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона (РСГ) ввиду своей хорошей теоретической обоснованности и простоты реализации. Эта методика позволяет проводить испытания широкого круга материалов в диапазоне скоростей деформации $10^2 \div 10^4 \text{ с}^{-1}$.

Основными преимуществами метода РСГ являются простота реализации, корректное теоретическое обоснование явлений, происходящих в системе двух тонких длинных упругих стержней и короткого упругопластического образца между ними, точное определение значительных (десятки процентов) деформаций образца благодаря косвенности измерений и незначительной инерционности тензорезисторов, регистрирующих импульсы деформации в стержнях, а также исключение изгиба образца ввиду его малой длины. Кроме того, эта методика позволяет регистрировать историю изменения скорости деформации в течение всего процесса деформирования образца.

Конструктивно традиционный вариант РСГ выполняется из двух тонких длинных стержней с высоким пределом текучести, между которыми располагается образец малой длины из исследуемого материала, причем предел текучести мерных стержней выше предела текучести образца. Систему стержни–образец нагружают упругими импульсами, которые регистрируются с помощью тензодатчиков, размещенных на мерных стержнях, и затем на основании одномерной теории упругих волн строится динамическая диаграмма деформирования образца.

К настоящему времени кроме основной схемы на сжатие образца разработаны другие варианты РСГ (растягивающий, крутильный, двухосный и т.д.). Описание различных вариантов РСГ можно найти в работах [1, 2, 3, 4].

Использование разрезного стержня Гопкинсона для испытаний на сжатие впервые предложено Р. Дэвисом [5, 6] и практически одновременно Г. Кольским [4, 7]. Вариант РСГ для испытаний на растяжение предложен Т. Николасом [9]. Крутильный вариант РСГ предложен в работе [2]. Двухосный стержень Гопкинсона для одновременного кручения и сжатия реализован в работе [9]. Для испытаний материалов при повышенных температурах с использованием РСГ, как правило, используется коаксиальный электронагреватель, внутри которого размещается образец и прилегающие к нему части мерных стержней.

Помимо испытаний на сжатие, растяжение и кручение металлов и сплавов метод РСГ позволяет исследовать поведение материалов с низким акустическим импедансом, таких как малоплотные полимеры, резина и пр. [10].

РСГ и его модификации используются для определения динамических прочностных и деформационных свойств широкого круга хрупких материалов, таких как горные породы, керамики и бетоны, как при нормальной, так и при повышенной температурах [11, 12].

Испытание образцов на сжатие и растяжение

Схематически установка РСГ–25 показана на рис. 1. Установка позволяет проводить динамические испытания широкого спектра материалов на сжатие и растяжение. Установка собрана на раме 11, на которой располагаются основные части. В камеру высокого давления 2 с помощью насоса 1 нагнетается воздух до требуемого давления. После

открывания клапана сжатый воздух разгоняет ударник 5 по стволу 3. Для измерения скорости ударника на конце ствола установлена система измерения скорости 4. Сигнал с фотодатчиков поступает на вход схемы усиления 14, а затем на вход частотомера 13.

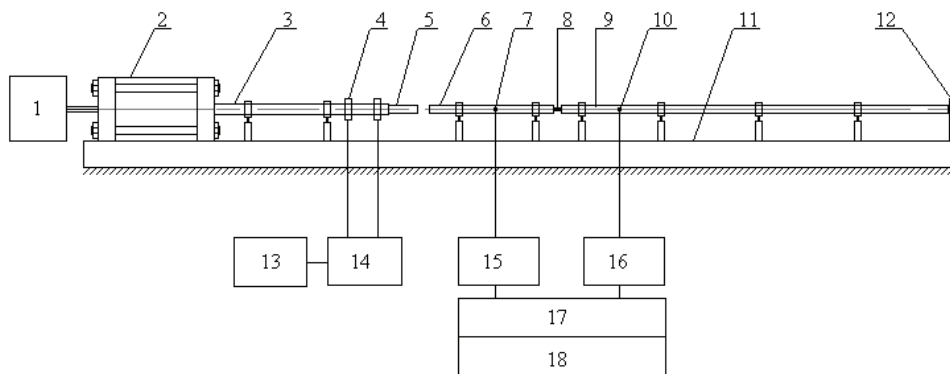


Рис. 1. Схема экспериментальной установки РСГ-25: 1 – насос, 2 – камера высокого давления, 3 – ствол, 4 – фотодатчики, 5 – ударник, 6 – входной стержень, 7, 10 – тензорезисторы, 8 – образец, 9 – выходной стержень, 11 – рама, 12 – демпфер, 13 – частотомер, 14, 15, 16 – усилитель, 17 – плата сбора данных, 18 – компьютер

Разрезной стержень Гопкинсона для испытаний на сжатие состоит из двух стержней (входного 6 и выходного 9) диаметром 25 мм и длиной 1 и 3 м соответственно. Стержни, изготовленные из стали с высоким пределом текучести, закрепляются и центрируются во фторопластовых подшипниках скольжения, позволяющих с помощью регулировочных элементов производить юстировку положения для обеспечения соосности стержней между собой и летящим ударником. После столкновения ударника с входным стержнем в последнем возбуждается волна сжатия. Для регистрации данной волны на стержне закреплены тензорезисторы 7. Волна сжатия передаётся по стержню к образцу 8, после чего вследствие разности звуковых импедансов волна распадается на прошедшую через образец в выходной стержень волну и отраженную в входной стержень волну. На выходном стержне также закреплены тензорезисторы 10. Тензорезисторы расположены на расстоянии 0,5 м от образца, что обеспечивает развязку импульсов во входном стержне. Для компенсации изгибных колебаний стержней в рабочих сечениях наклеено по 4 тензорезистора, соединенных после-

довательно. Сигнал с тензорезисторов после усиления *15* и *16* поступает на вход платы сбора данных *17* в компьютере *18*. Для испытаний на растяжение входной и выходной стержни меняются местами. Образец на растяжение изготавливается в виде гантели и вкручивается в торцы стержней. Для того чтобы волна сжатия от ударника передалась через образец без его деформирования, применяется специальная передающая шайба. Волна сжатия доходит до свободного конца нагружающего стержня, отражается волной растяжения, направляется к образцу и деформирует его. Для испытаний при повышенных температурах на растяжение был изготовлен специальный кожух, закрепляемый вокруг стыка стержни–образец. В кожух подавался горячий воздух, нагревающий образец. Температура образца контролировалась термопарой.

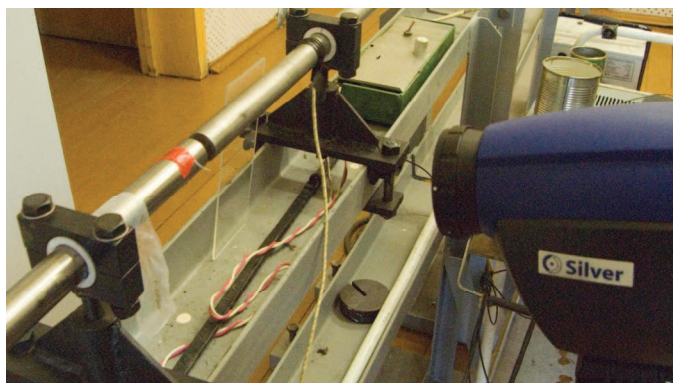


Рис. 2. Разрезной стержень Гопкинсона с установленной инфракрасной камерой

Для записи поля температур образца во время испытания на сжатие использовалась инфракрасная камера CEDIP Silver 450M (рис. 2). Основные технические характеристики камеры: чувствительность не менее 25 мК при 300 К, спектральный диапазон 3–5 мкм, максимальный размер кадра 320×240 точек.

Испытание образцов на пробивание

Установка для высокоскоростного пробивания образцов (рис. 3, 4) установлена на раме *7* и состоит из камеры высокого давления *1*, ствола *2*, системы измерения скорости ударника *3*, устройство *8* для крепления мишени *9* с отсекателем *6*, приемной камеры *10* и улавливателя *11*.

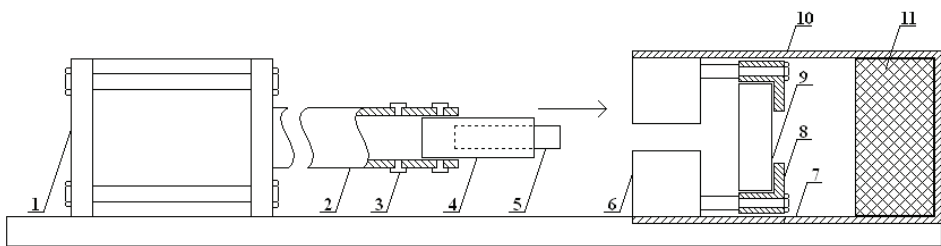


Рис. 3. Схема установки для испытания образцов на пробивание: 1 – камера высокого давления, 2 – ствол, 3 – фотодатчики, 4 – поддон, 5 – ударник, 6 – отсекаль, 7 – рама, 8 – устройство для крепления мишени, 9 – мишень, 10 – приёмная камера, 11 – улавливатель

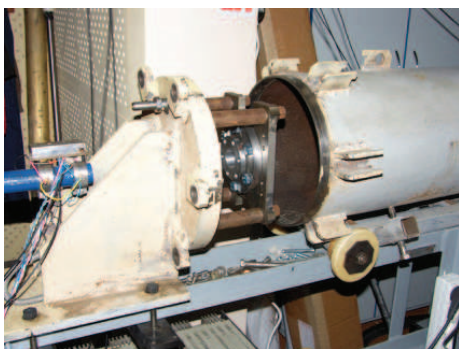


Рис. 4. Установка для испытания образцов на пробивание



Рис. 5. Ударник в поддоне

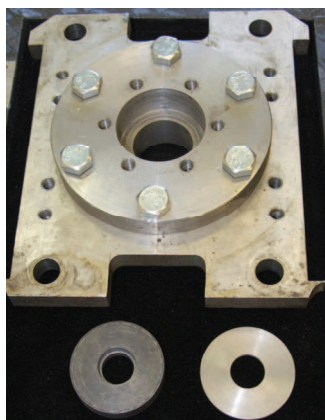


Рис. 6. Устройство для крепления мишени

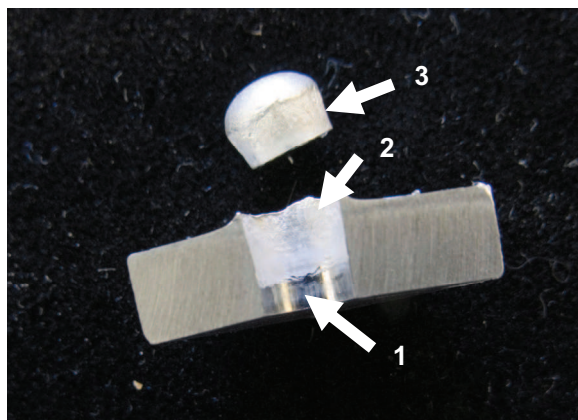


Рис. 7. Внешний вид поверхности разрушения и пробки. Зеркальная и шероховатая поверхности разрушения на образце обозначены цифрами 1 и 2 соответственно, пробка – 3

Устройство для крепления мишени представлено на рис. 6. Устройство позволяет закреплять мишени в форме дисков максимального диаметра 50 мм. Для закрепления образцов меньшего диаметра используются шайбы. Ударник и поддон представлены на рис. 5. Для разгона ударника в стволе используется поддон, внешний диаметр которого соответствует калибру ствола, поддоны изготавливались из эбонита. Для создания воздушной прослойки с целью уменьшения трения поддона при движении в стволе были сделаны специальные канавки. В качестве ударника использовался стержень из высокоуглеродистой стали диаметром 5 мм, длиной 50 мм и массой 7,4 г.

В камере высокого давления посредством насоса создается необходимое давление воздуха. Скорость ударника задается давлением в воздушной камере и длиной разгона. Выстрел происходит путем открытия в воздушной камере специального клапана. Скорость поддона с ударником определяется измерением времени пролёта между двумя фотодатчиками. Перед мишенью установлен отсекающий диск, внутренний диаметр которого меньше внешнего диаметра поддона, но больше диаметра ударника. При соударении с отсекающим диском поддон тормозится и разрушается, а ударник продолжает движение до соударения с мишенью. При высокоскоростном взаимодействии ударника с мишенью реализуется разрушение в виде формирования и выноса пробки. Распиленный по диаметру образец и выбитая пробка показаны на рис. 7. Продолжающие движение после пробивания преграды ударник и пробка улавливаются приемной камерой с помощью мягкого наполнителя, не искажающего форму пробки.

Полученные экспериментальные результаты

На установке РСГ–25 были проведены испытания различных материалов.

Были исследованы на сжатие образцы титана Grade 2 в исходном крупнозернистом состоянии с характерным размером зерна 25 мкм и субмикроструктурным, полученным методом равноканального углового прессования [13], с характерным размером зерна 0,30 мкм. Скорость ударника в экспериментах варьировалась от 15 до 30 м/с, что обеспечивало скорость деформации образца от 2 до $5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$.

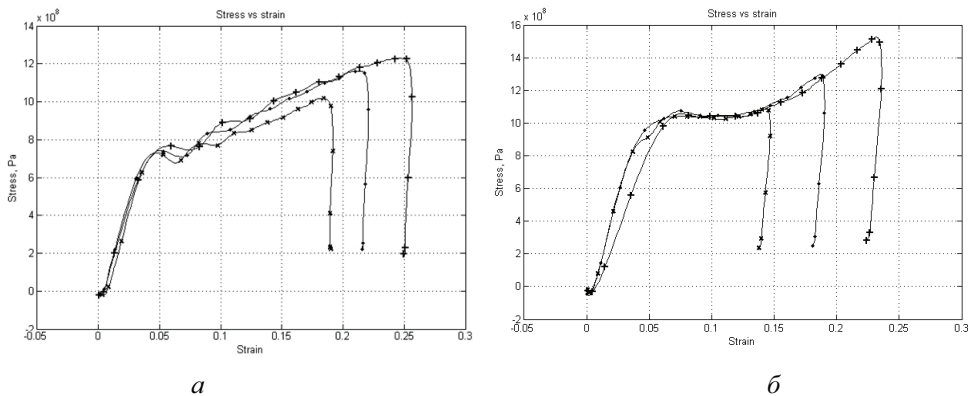


Рис. 8. Деформационные диаграммы титана при сжатии с различными скоростями деформации: *а* – крупнозернистый титан; *б* – субмикроструктурный титан

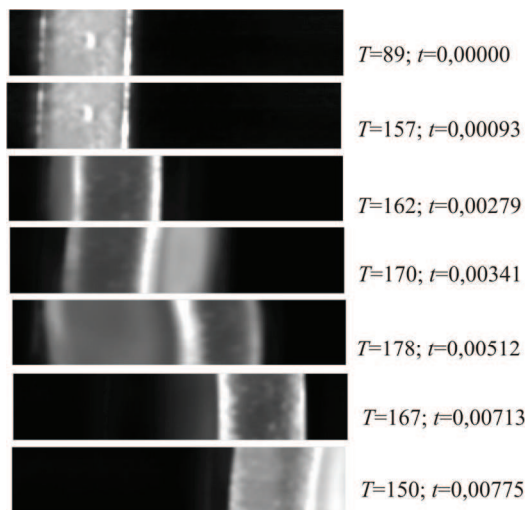


Рис. 9. Термограмма динамического деформирования титанового образца в различные моменты времени: T – температура, °С, t – время, с

Полученные деформационные кривые представлены на рис. 8, на которых видны качественные отличия механического поведения материала в зависимости от характерного размера зерна. С измельчением зерна динамический предел пропорциональности титана увеличился на 25 %, зависимость напряжения от деформации имеет ярко выраженный участок упрочнения. При этом субмикроструктурный титан становится значительно более хрупким, и при скорости ударника 30 м/с (максимальное напряжение 1,5 ГПа) образец разрушается, в отличие от крупнозернистого титана, продолжающего гомогенно деформировать-

ся при тех же условиях нагружения. На рис. 9 представлена типичная термограмма динамического деформирования титанового образца. Наиболее содержательным с точки зрения анализа влияния микроструктуры материала является определение доли диссипированной и запасённой энергии в процессе деформирования. Анализ, проведённый в работе [15], показывает, что удельная доля диссипированной энергии в субмикроструктурном состоянии не меняется при всех исследованных амплитудах напряжений и скоростях деформаций. Аналогичные результаты качественного различия механизма диссипации энергии и разрушения для крупнозернистого и субмикроструктурного титана были получены при исследовании особенностей диссипации энергии при циклическом деформировании [15].

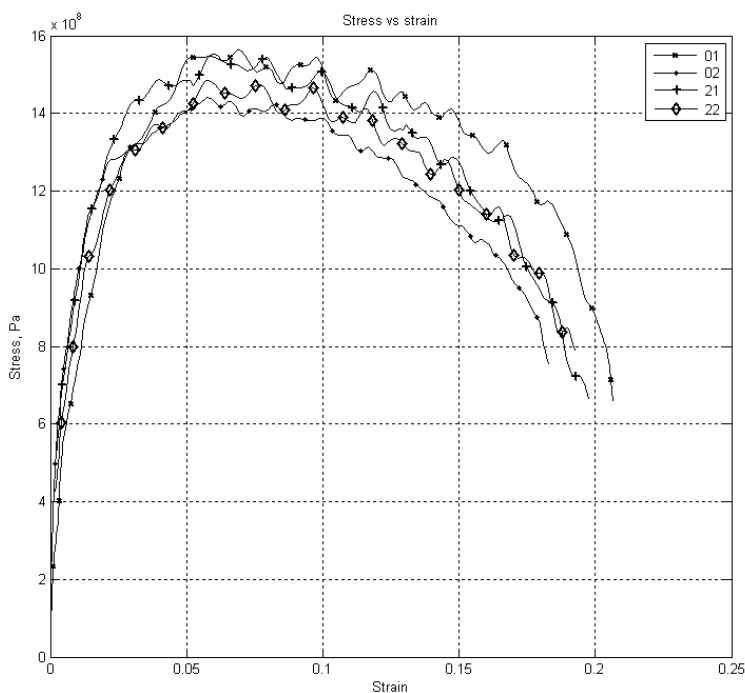


Рис. 10. Диаграммы деформирования образцов из стали при нормальных и повышенных температурах

Были испытаны на растяжение образцы из стали. Типичные диаграммы деформации приведены на рис. 10. Образцы 01 и 02 испытаны при $T = 22^\circ\text{C}$ и скорости деформации 1900 c^{-1} и 1600 c^{-1} соответственно. Образцы 21 и 22 – при $T = 250^\circ\text{C}$ и скорости деформации 1900 c^{-1} .

Из графиков видно, что повышение температуры до 250 °С не оказывает существенного влияния на механические свойства данного материала.

На установке по исследованию пробивания были нагружены образцы из алюминия марки 6061. После эксперимента образцы подвергались микроструктурному анализу с помощью оптического микроскопа-интерферометра, позволяющего получать трехмерные данные о рельефе, и сканирующего электронного микроскопа.

При скоростях соударения 101...103 м/с энергия удара была недостаточной для выбивания пробки из образца, однако наблюдалось образование магистральной трещины у концентраторов напряжений по образующей цилиндрического ударника (рис. 11). Условия для формирования и выноса пробки осуществлялись при скоростях ударника свыше 112 м/с.

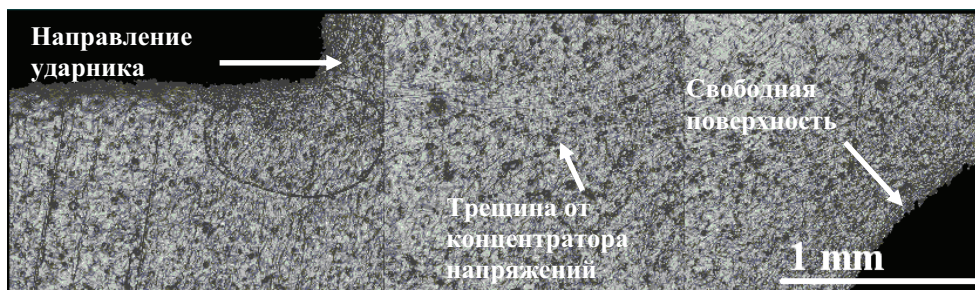


Рис. 11. Образование трещины у концентратора напряжений

Обнаружено, что для зоны первоначального проникновения ударника в образец, соответствующей зеркальной, гладкой поверхности разрушения, наблюдается относительно равномерное распределение деформации, тогда как при формировании и выносе пробки это распределение становится существенно неоднородным по радиусу образца. Имеет место локализация пластической деформации в узкой области по образующей пробки. По мере продвижения пробки происходит как огрубление рельефа поверхности разрушения, так и увеличение локальных неоднородностей сдвиговых деформаций вследствие искажений внутренней структуры.

Библиографический список

1. Большаков А.П., Новиков С.А., Сеницын В.А. Исследование динамических диаграмм одноосного растяжения и сжатия меди и сплава АМг6 // Пробл. прочности. – 1979. – № 10. – С. 87–88.

2. Даффи Дж., Кэмпбелл Дж., Хоули Р. О применении крутильного разрезного стержня Гопкинсона к исследованию влияния скорости нагружения на поведение алюминиевого сплава 1100-0 // Прикл. механика. – Сер. Е. – М.: Мир, 1971. – № 1. – С. 81–90.

3. Клепачко Я. Обсуждение нового экспериментального метода определения начала роста трещин при больших скоростях нагружения с помощью волн напряжения // Теор. основы инж. расчетов. – 1982. – Т. 104, № 1. – С. 33–40.

4. Кольский Г. Исследования механических свойств материалов при больших скоростях нагружения // Механика. – Вып. IV. – М.: Изд-во Иностр. лит., 1950. – С. 108–119.

5. Davies R.M. A critical study of the Hopkinson pressure bar // Philos. Trans. R.Soc. (London), 1948. A. – Vol. 240, P. 375–457.

6. Davies R.M. A simple modification of the Hopkinson pressure bar // Proc. 7th Int. Cong. on Applied Mechanics. 1948. – Vol. 1. P. 404.

7. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of material at very high rates of loading // Proc. Phys. Soc. (London), 1949. – Vol. 62B. – P. 676–700.

8. Nicholas O. Tensile testing of materials at high rates of strain // Exp.Mech. – 1981. – Vol. 21, No. 5. – P. 177–195.

9. Льюис Дж., Гольдсмит В. Двухосный стержень Гопкинсона для одновременного кручения и сжатия // Приборы для научных исследований. – 1973. – № 7. – С. 22–26.

10. Юношев А.С., Сильвестров В.В. Разработка методики полимерного разрезного стержня Гопкинсона // ПМТФ. – 2001. – Т. 42, № 3. – С. 212–220.

11. Albertini C., Cadoni E., Labibes K. Impact Fracture Process and Mechanical Properties of Plain Concrete by Means of an Hopkinson Bar Bundle // J. PHYS IV FRANCE 7 (1997) Colloque C3, Supplement au Journal de Physique III d'aout. – 1997. – C3-91.

12. Tedesco J.W., Ross C.A. and Brunair R.M. Numerical Analysis of Dynamic Split Cylinder Tests // Computers and Structures. – 1989. – Vol. 32, No. 3–4. – P. 609–624.

13. Microstructure and Properties of Ti Rods Produced by Multi-Step SPD / V. Latysh [et al.] // Mater. Sci. Forum. – 2006. – Vol. 503–504. – P. 763–768.

14. Исследование особенностей диссипации и накопления энергии в нанокристаллическом титане при квазистатическом и динамическом нагружении / О.А. Плехов [и др.] // Вычислительная механика сплошных сред. – 2008. – Т. 1, № 4. – С. 69–78.

15. Экспериментальное исследование аномалий поглощения энергии в нанокрокристаллическом титане при циклическом нагружении / О. Плехов [и др.] // Письма в журнал технической физики. – 2008. – Т. 34. – Вып. 13. – С. 33.

Получено 5.10.2010