

В.В. Чудинов, О.А. Плехов

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ПРОВЕДЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА НА ВЕЛИЧИНУ ДИССИПИРОВАННОЙ ЭНЕРГИИ В СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ТИТАНЕ

В работе экспериментально исследуются механические и термодинамические характеристики субмикрокристаллического титана при динамическом сжатии с использованием разрезного стержня Гопкинсона–Кольского. Кинетика температуры в процессе деформирования регистрировалась методом инфракрасного сканирования камерой CEDIP SC 5000 (спектральный диапазон 3–5 $\mu\text{м}$, температурная чувствительность 0,025 К, частота съёмки 4 кГц). Ранее [1] исследование термодинамики процесса показало, что доля накопленной энергии в субмикрокристаллическом титане выше, чем в крупнозернистом, и остаётся примерно постоянной в широком диапазоне скоростей деформации. Данная работа посвящена исследованию влияния особенностей проведения динамического эксперимента (использование смазки на торцах стержней) на величину диссипированной энергии и особенности протекания процесса деформирования. В результате показано, что использование дополнительной смазки несущественно изменяет интегральные характеристики процесса деформирования материала, но влияет на особенности протекания процесса деформирования.

Ключевые слова: динамическое нагружение материалов, стержень Гопкинсона–Кольского, термография образцов.

Введение

Эволюция структуры металлических материалов при пластическом деформировании является объектом интенсивных исследований на протяжении многих лет, в результате которых было установлено, что важнейшим признаком пластического течения является локализация пластической деформации, сопровождающаяся развитием сложной мезодефектной структуры. Процессы образования и движения дефектов в материале приводят к накоплению и диссипации энергии в процессе деформирования. При этом скорость накопления энергии в материале может рассматриваться как мера скорости образования дефектов, а скорость диссипации – мера их движения и аннигиляции.

В последнее время метод инфракрасного сканирования начал активно применяться при проведении механических испытаний с целью получения более полной информации о процессе деформирования [2–6]. В работе [2] представлен наиболее полный обзор экспериментальных работ, посвящённых исследованию величины накопленной энергии в процессе деформирования металлов, выполненных до 1973 г. В работах [3] и [4] представлены результаты исследования динамических и квазистатических процессов деформирования металлов и сплавов соответственно. В [5] предложен экспресс-метод оценки скорости накопления энергии в металлах по результатам инфракрасного сканирования, не требующей существенных изменений стандартной программы механических испытаний. В [6] процесс накопления энергии в металлах рассмотрен с формальных позиций механики сплошных сред путем введения дополнительной «структурно чувствительной» тензорной переменной, описывающей процесс роста мезоскопических дефектов.

Значительный объем доступных на сегодня экспериментальных данных характеризуется их противоречивостью. В различных условиях один и тот же с химической точки зрения материал демонстрирует различные диссипативные свойства в зависимости от предыстории деформирования, размера зерна и некоторых других факторов. В результате существенно повышаются требования к предварительной аттестации материала и условиям проведения механических испытаний. В частности, в работе [1] был исследован эффект аномальной диссипации энергии при динамическом сжатии субмикроструктурного титана. Было показано, что доля диссипированной энергии в субмикроструктурном титане выше, чем в крупнозернистом, и слабо зависит от скорости и интенсивности деформирования.

В данной работе продолжено исследование аномальной диссипации энергии и влияния условий проведения динамического эксперимента на получаемые механические и термодинамические параметры процесса. В частности, детально исследовано влияние смазки между поверхностью образца и стержней на механические и термодинамические характеристики материала. В работе использована смазка Циатим-201 и силиконовая смазка ВМ-1С. Полученные результаты сравнивались с образцами, деформированными без смазки. Показано, что зависимость напряжения от деформации является чувствительной к условиям трения на поверхностях. Использование смазки позволяет

устранить осцилляции напряжения и получить выраженный участок упрочнения. С термодинамической точки зрения устойчивый характер деформирования приводит к существенной разнице температур между боковой, фронтальной и тыльной поверхностями образца и требует более длительного времени для перераспределения температуры. При этом интегральные характеристики процесса (диссипированная и затраченная энергия деформирования) оказались менее чувствительными к варьированию условий эксперимента (в пределах 6 %).

Материал и условия эксперимента

В работе исследованы особенности процесса динамического деформирования образцов титана Grade 2 в ультрамелкозернистом состоянии, полученном методом равноканального углового прессования, с характерным размером зерна 0,30 мкм. Результаты микроскопического исследования образцов представлены на рис. 1.

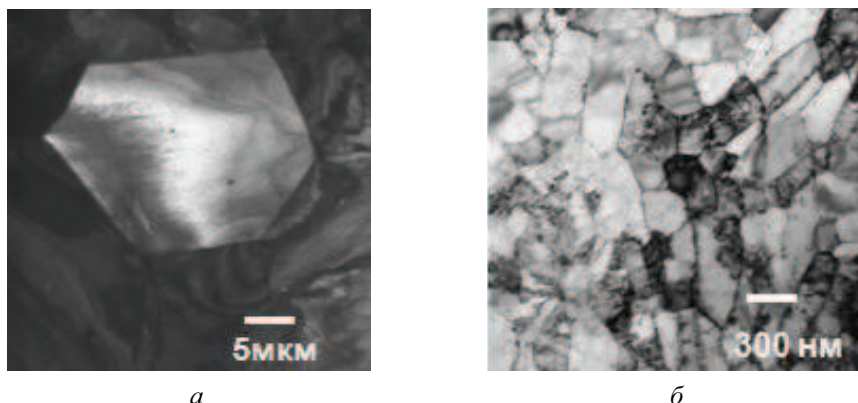


Рис. 1. Результаты исследования структуры исходного (крупнозернистого) (а), и субмикрокристаллического (б) титана по данным электронной микроскопии

Измельчение зерна приводит к существенному росту механических характеристик материала и изменению его деформационного поведения как при квазистатическом деформировании, так при динамическом деформировании. Ранее было показано, что предел прочности и предел пропорциональности материала возрастают в 2,5 раза при квазистатическом деформировании и примерно на 25 % при динамическом сжатии [7].

Динамические испытания на сжатие были выполнены на установке РСГ-25, реализующей традиционный метод Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона диаметром 25 мм. Установка

состоит из газовой пушки калибром 19 мм, разгоняющей ударник длиной 200 мм. Подробное описание установки приведено в [7]. Скорость ударника в экспериментах равна $(29,0 \pm 0,2)$ м/с, что обеспечивало скорость деформации образца порядка 3500 с^{-1} . Соотношение размеров разрезного стержня Гопкинсона 1:3, соответственно входного и выходного, обеспечивало нагружение образца несколькими последовательными импульсами сжатия и позволяло достичь больших энергий деформирования. Энергия, затраченная в процессе деформирования, равна $(46,3 \pm 0,6)$ Дж.

Исследуемые образцы титана имели форму цилиндров диаметром $(7,7 \pm 0,6)$ мм и длиной $(3,9 \pm 0,1)$ мм.

Для записи поля температур использовалась инфракрасная камера FLIR SC 5000. Запись поля температуры проводилась с частотой 3000 Гц и минимальным пространственным разрешением $2 \cdot 10^{-4}$ м. В процессе эксперимента объектив камеры защищался плёночным экраном с измеренной проницаемостью в инфракрасном диапазоне. Калибровка камеры проводилась двумя способами. В первом случае для калибровки камеры использовалась дополнительная экспериментальная установка, состоящая из тестового образца, соединённого с электрическим нагревателем. В канал, просверленный перпендикулярно оси образца, помещалась капельная термopapa, соединённая с цифровым термометром AZ8852 с точностью измерения температуры 0,1 % в диапазоне $-200 \sim 1370$ °C. Камера калибровалась при времени экспозиции 320 мкс в диапазоне температур 80–250 °C. Дополнительно использовалась стандартная калибровочная таблица камеры с учётом потери инфракрасного излучения при прохождении через защитные экраны.

Результаты

В основу метода определения механических свойств материала в установке Гопкинсона–Кольского положена одномерная теория распространения упругих волн в длинных тонких стержнях.

С помощью газовой пушки в нагружающем стержне возбуждается упругий импульс сжатия $\sigma_1(t)$ с амплитудой, пропорциональной скорости ударника. Соответствующая ей волна деформации $\varepsilon_1(t)$ распространяется по стержню со скоростью звука. При подходе к образцу волна сжатия разделяется ввиду разности поперечных сечений и аку-

стических импедансов материалов стержней и образца. При этом часть волны отражается от границы и распространяется в передающий стержень волной растяжения $\varepsilon_R(t)$, а другая часть проходит через образец в опорный стержень волной сжатия $\varepsilon_T(t)$. Пример волновых импульсов, зарегистрированных при нагружении образца, представлен на рис. 2.

Обычно, следуя классическим работам Кольского, можно предположить однородность напряженно-деформированного состояния образца вдоль его оси (вследствие большой длительности нагружающего импульса по сравнению с временем пробега волны по длине образца). На основании этих импульсов по формулам Кольского можно определить параметрические зависимости развития напряжения, деформации и скорости деформации в образце во время испытания [8]:

$$\sigma_s(t) = \frac{ES}{S_b} \varepsilon_T(t), \quad \varepsilon_s(t) = -\frac{2C}{L} \int_0^t \varepsilon_R(t) dt, \quad \dot{\varepsilon}_s(t) = -\frac{2C}{L} \varepsilon_R(t). \quad (1)$$

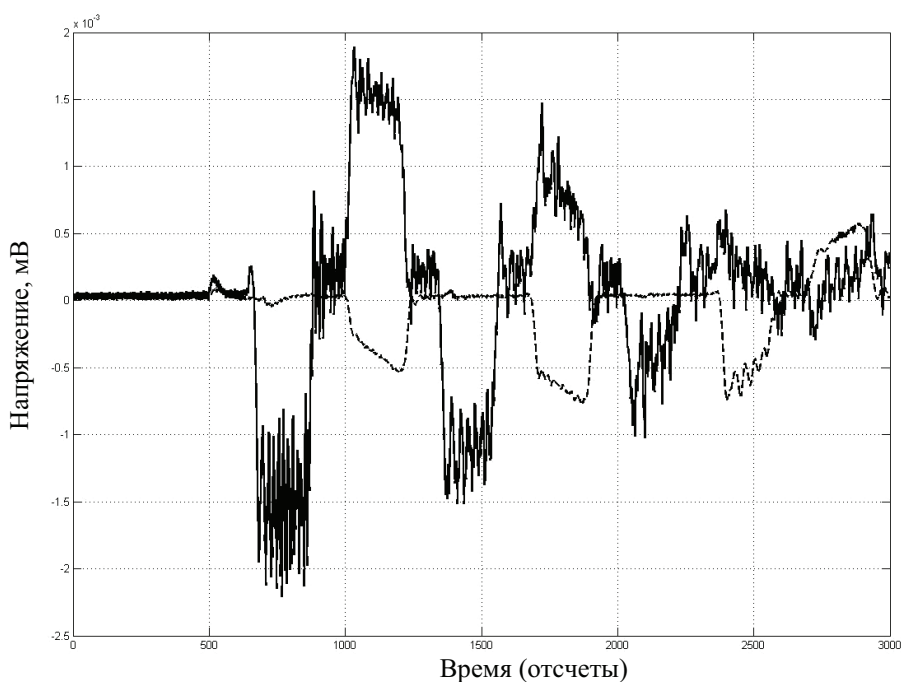


Рис. 2. Импульсы деформации, получаемые тензометрическими датчиками на стержнях: сплошная линия – распределение деформации в нагружающем стержне, пунктирная – в мерном стержне

Далее, из полученных параметрических зависимостей $\sigma_s(t)$, $\dot{\varepsilon}_s(t)$, $\dot{\sigma}_s(t)$ исключается время и строится диаграмма деформирования образца в виде зависимостей $\sigma_s(t) \sim \varepsilon_s(t)$ и $\dot{\sigma}_s(t) \sim \dot{\varepsilon}_s(t)$. Вторая зависимость используется для контроля изменения скорости деформации в процессе деформирования или для оценки влияния истории изменения скорости деформации на получаемую диаграмму образца при нагружении импульсом сложной формы.

В работе [9] показано, что использование классического приближения содержит существенные дефекты и может применяться к исследованию механических свойств материалов с акустическим импедансом, существенно более низким, чем импеданс материала стержней. При анализе зависимости деформации от времени соотношения (1) уточнялись с использованием данных по всем трем импульсам деформации:

$$\varepsilon_s(t) = \frac{C}{L} \int_0^t (\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)) dt. \quad (2)$$

Соотношение размеров стержней Гопкинсона обеспечивало последовательное деформирование образца тремя импульсами сжатия (рис. 2). Для определения энергии, затраченной на деформирование образца, анализ процесса деформации проводился последовательно по всем трём импульсам, деформирующим образец.

Для построения истинной диаграммы деформирования при больших деформациях далее вместо исходной площади поперечного сечения образца S_0 используется ее текущее значение, определяемое из условия равенства объемов образца в деформированном и недеформированном состоянии,

$$S(t) = S_0 / (1 - \varepsilon_s(t)),$$

тогда истинное напряжение рассчитывается по формуле

$$\sigma_s^i(t) = \sigma_s(t) (1 - \varepsilon_s(t)). \quad (3)$$

Для подсчета деформации использовано понятие суммарной относительной (логарифмической) деформации

$$\varepsilon_s^i(t) = \ln(1 - \varepsilon_s(t)). \quad (4)$$

Полученные деформационные кривые представлены на рис. 3, на них 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 переходе от квазистатического к динамическому нагружению крупнозернистый титан демонстрирует существенный рост значений механических характеристик. Ультрамелкозернистый титан демонстрирует значительно большую устойчивость механических характеристик при изменении скорости деформации.

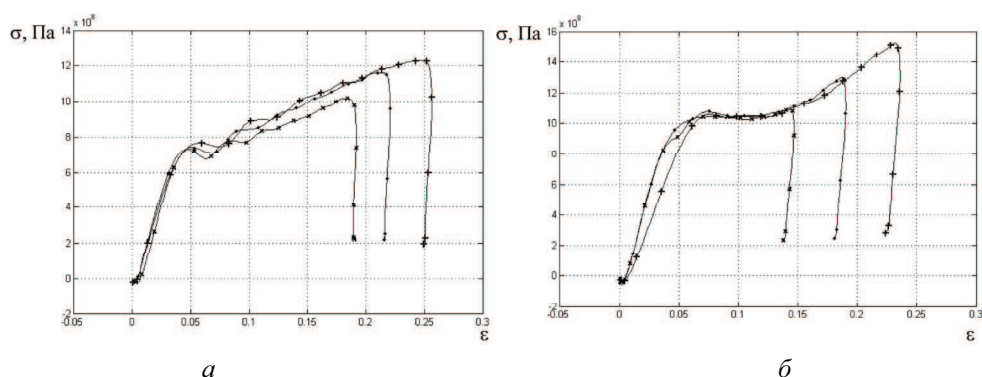


Рис. 3. Зависимость напряжения от деформации для крупнозернистого (а) и субмикроструктурного (б) титана при динамическом сжатии с различными скоростями деформации (скорость деформирования $2 \cdot 10^3$, $3 \cdot 10^3$ и $4 \cdot 10^3$ с $^{-1}$)

Наиболее содержательным с точки зрения анализа влияния микроструктуры материала является определение доли диссипированной и запасённой энергии в процессе деформирования. Данный анализ позволяет определить влияние зёрненной структуры материала на её способность к поглощению и диссипации приложенной энергии. При приближении к моменту разрушения скорость накопления энергии в материале обычно значительно уменьшается. Расчёт доли диссипированной и накопленной энергии в крупнозернистом и субмикроструктурном титане был проведён в [1]. В результате анализа полученных данных в работе [1] был сделан вывод о том, что удельная доля диссипированной энергии в ультрамелкозернистом состоянии равна 0,8 и не меняется в широком диапазоне амплитуд напряжений и скоростей деформаций. В крупнозернистом титане доля диссипированной энергии растёт с 0,58 до 0,86 при увеличении скорости деформации.

Для проверки выводов, полученных в работе [1], проведено экспериментальное исследование влияния условий трения на поверхностях образца на механические и термодинамические характеристики. Существует мнение о том, что использование смазки существенно влияет на получаемые механические характеристики материала и вносит дополнительный вклад в процессы разогрева образца в ходе его деформирования.

Для опровержения этой гипотезы было исследовано влияние двух различных типов смазки (Циатим-201 и силиконовая смазка ВМ-1С) на характер нагрева и деформирования образца. На рис. 4 представлены характерные распределения температуры по поверхности образца при различных условиях деформирования.

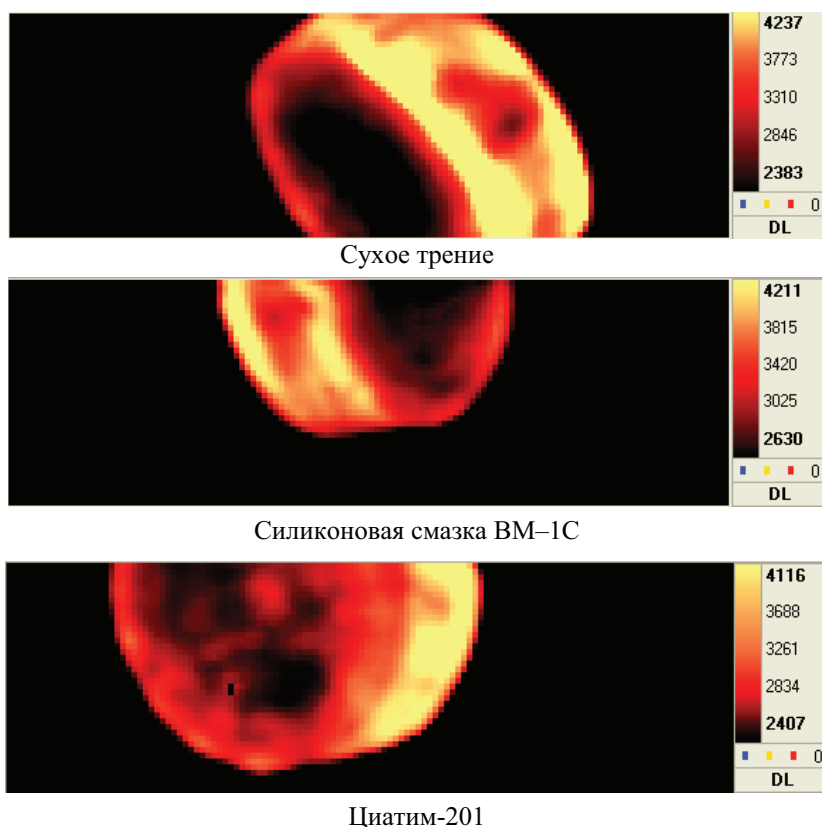


Рис. 4. Распределение температуры на поверхности образца в результате динамического сжатия при различных условиях трения на поверхностях стержней (температура приведена в условных единицах – DL, один градус примерно соответствует 40 DL)

Анализ данных, представленных на рис. 4, позволяет сделать вывод о том, что изменение распределения температуры на поверхности образца в процессе деформирования чувствительно к условиям трения. Во всех случаях наибольшая температура наблюдается на боковой поверхности образца. Использование Циатима позволяет уменьшить неоднородность распределения температуры и, как будет показано далее, устранить осцилляции напряжения в процессе деформирования. Максимальные и средние температуры образцов изменяются в пределах 6 %.

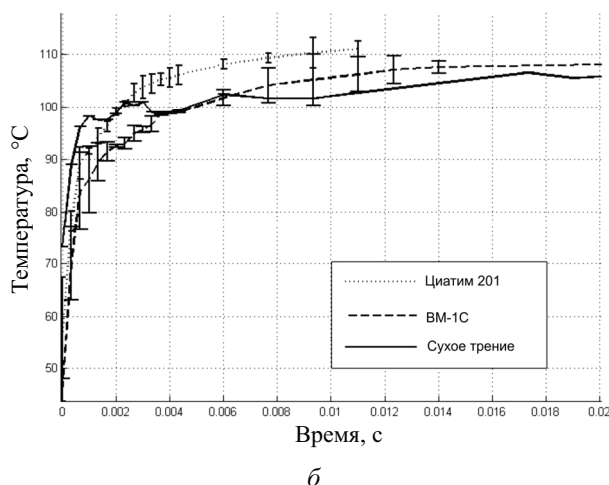
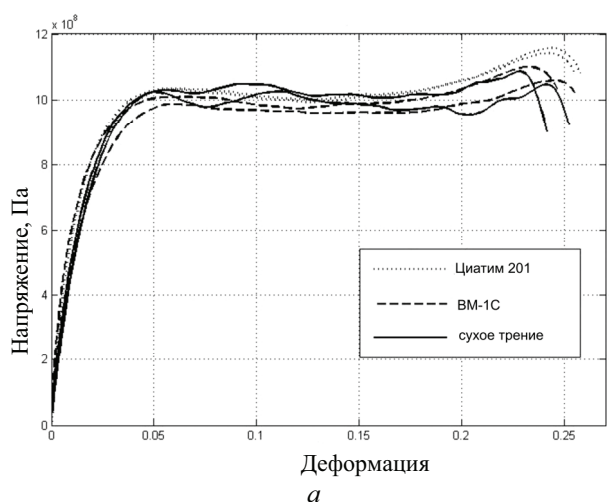


Рис. 5. Зависимости напряжения от деформации и средней температуры образца от времени в процессе динамического сжатия при различных условиях трения на поверхностях стержней

На рис. 5 представлены: зависимость напряжения от деформации (рис. 5, *а*) и зависимость средней температуры образца от времени (рис. 5, *б*) в процессе динамического сжатия. В приведённом масштабе механические и термодинамические характеристики отличаются незначительно.

Средняя температура образца существенно быстрее возрастает при сухом трении и остаётся примерно постоянной в течение дальнейшего наблюдения. Рост температуры позволяет высказать предположение о том, что наибольшие по величине источники тепла возникают в объёме материала и за время наблюдения (порядка 1 мс) температура успевает перераспределиться.

Смазка на поверхности образца замедляет динамику роста температуры, но позволяет достичь более высоких значений температуры на завершающих стадиях. При этом конечные значения температуры для всех образцов равны $(109 \pm 3)^\circ\text{C}$.

На рис. 6 представлены зависимости напряжения от деформации в процессе пластического течения материала.

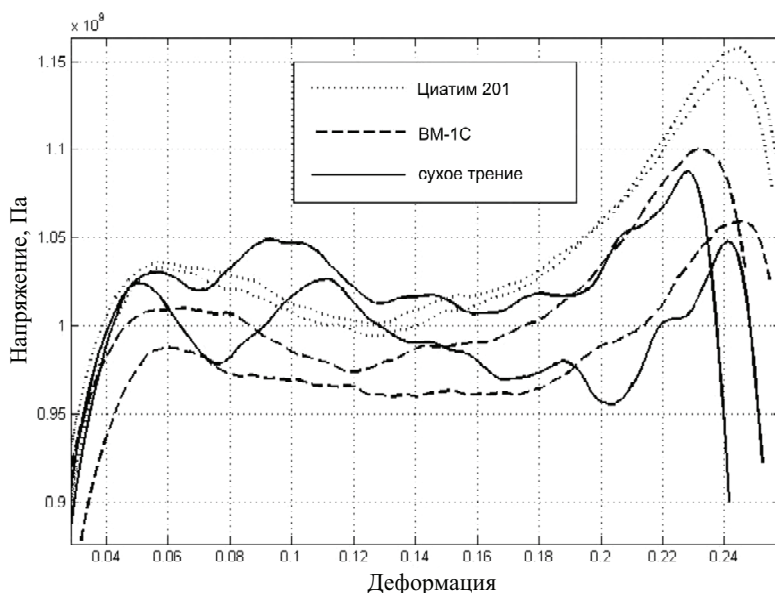


Рис. 6. Зависимости напряжения от деформации в процессе пластического течения материала при различных условиях трения на поверхностях стержней

Анализ результатов, представленных на рис. 6, позволяет сделать вывод о том, что использование смазки влияет на характер пластического течения. В условиях сухого трения механический процесс де-

формирования является неустойчивым и сопровождается осцилляциями напряжения. Использование смазки позволяет уменьшить осцилляции величины напряжения, при этом использование циатимовой смазки позволяет добиться хорошей повторяемости результатов при сохранении величины предела пропорциональности. Однако максимальное напряжение существенно превышает напряжение, достигнутое без смазки. Использование силиконовой смазки приводит к уменьшению предела пропорциональности при сохранении величины максимального напряжения. Рассмотренные особенности сказываются на точности измерения предельных механических характеристик материала (в пределах 7 %).

Интегральные характеристики процесса деформирования существенно менее чувствительны к использованию смазки. Результаты расчёта величин затраченной и диссипированной энергий с доверительным интервалом 0,9 представлены в таблице. Методика расчёта соответствовала методике, предложенной в [1].

Влияние условий трения на долю диссипированной энергии при динамическом сжатии материала

Применяемая смазка	Затраченная энергия, Дж	Диссипированная энергия, Дж	Доля диссипированной энергии
Сухое трение	45,7±0,1	38,2±1,3	0,83
BM-1C	46,2±0,2	38,2±2,1	0,83
Циатим-201	46,9±1,1	38,1±1,5	0,81

Анализ данных, представленных в таблице, позволяет сделать вывод о совпадении полученных результатов с ранее опубликованными в [1] и утверждать, что условия трения (как минимум для исследованных типов смазки) слабо влияют на интегральные механические и термодинамические характеристики процесса динамического сжатия.

Выводы

В работе исследованы особенности процесса динамического сжатия субмикрористаллического титана с использованием установки Гопкинсона–Кольского, совмещённой с высокоскоростной инфракрасной камерой. В частности, детально исследованы особенности пластического течения и эволюции температуры материала в зависимости от условий трения между образцом и нагружающими стержнями.

Основным результатом работы является вывод о том, что при всех исследованных условиях проведения эксперимента интегральные характеристики процесса (величина затраченной и диссипированной энергии) изменяются в пределах 6 % и соответствуют ранее опубликованным результатам. Наличие смазки влияет на характер протекания процесса и является параметром, требующим оптимизации, но не вносит дополнительных ошибок, связанных с процессами горения или выделения тепла за счёт избыточного трения.

Изменение условий трения влияет на характер процесса деформирования и особенности распределения температуры на поверхности образца. В условиях сухого трения наблюдаются осцилляции величины напряжения и ярко выраженные участки гипотермии на фронтальной и задней поверхностях образца. Улучшение условий трения приводит к сглаживанию зависимости напряжения от деформации и гомогенизации распределения температуры. Предложенная методика позволяет детально исследовать особенности проведения эксперимента и осуществлять оптимальный выбор его условий.

Благодарности

Авторы работы выражают признательность профессору Р.З. Валиеву и доктору И.П. Семёновой за предоставленный материал для испытаний. Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ (11-01-00153-а, 11-01-96005-р_урал_а).

Библиографический список

1. Экспериментальное исследование закономерностей диссипации энергии при динамическом деформировании нанокристаллического титана / О. Плехов, В. Чудинов, В. Леонтьев, О. Наймарк // ПЖТФ. – 2009. – Т. 35, вып. 2. – С. 82–90.
2. Bever M.B., Holt D.L., Tichener A.L. The stored energy of cold work // Progress in Material Science. – 1973. – No. 17. – P. 1–190.
3. A thermodynamic internal variable model for the partition of plastic work into heat and stored energy in metals / P. Rosakis, A.J. Rosakis, G. Ravichandran, J. Hodowany // J. Mech. and Phys. Solids. – 2000. – No. 48. – P. 581–607.

4. Oliferuk W., Maj M., Raniecki B. Experimental analysis of energy storage rate components during tensile deformation of polycrystals // *Materials Science and Engineering A*. – 2004. – Vol. 374. – P.77–81.

5. Плехов О.А., Santier N., Наймарк О.Б. Экспериментальное исследование накопления и диссипации энергии при упругопластическом переходе // *ЖТФ*. – 2007. – Т. 77, вып. 9. – С. 1236–1238.

6. Теоретическое и экспериментальное исследование диссипации энергии в процессе локализации деформации в железе / О.А. Плехов, О.Б. Наймарк // *ПМТФ*. – 2009. – Т. 50, вып. 1. – С. 153–164.

7. Исследование особенностей диссипации и накопления энергии в нанокристаллическом титане при квазистатическом и динамическом нагружении / О.А. Плехов, В.В. Чудинов, В.А. Леонтьев, О.Б. Наймарк // *Вычислительная механика сплошных сред*. – 2008. – Т. 1, № 4. – С. 69–78.

8. Кольский Г. Исследование механических свойств материалов при больших скоростях нагружения // *Механика*. – 1950. – № 4. – С. 108–119.

9. О применении классического анализа опытов с разрезным стержнем Гопкинсона / С.Л. Лопатников, Б.А. Гама, К. Краутхаузер, Дж. Джиллеспи // *ПЖТФ*. – 2004. – Т. 30, вып. 3. – С. 39–46.

Получено 15.05.2011