

05;07;12

Нелинейный характер макролокализации деформации в ГПУ-сплавах циркония

© Т.М. Полетика, А.П. Пшеничников

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
634021 Томск, Россия
E-mail: poletm@ispms.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 13 февраля 2008 г.)

Методами лазерной спекл-интерферометрии и профилирования поверхности исследована эволюция локализации пластической деформации при одноосном растяжении ГПУ циркониевых сплавов. Установлено, что возникновение колебательной неустойчивости на параболической стадии пластического течения сплавов циркония связано с началом локального неоднородного геометрического изменения формы деформируемого образца. Показано, что кинетика процесса прогрессирующего уменьшения поперечного сечения образца имеет нелинейный характер и определяется колебательным изменением деформаций сужения и удлинения в очаге макролокализации в режиме „упрочнение–разупрочнение“.

PACS: 62.20.F-, 83.10.Bb

Введение

Ранее в работах [1,2] методом лазерной спекл-интерферометрии установлены закономерности макролокализации деформации, сопровождающие возникновение колебательной неустойчивости пластического течения на параболической стадии деформационной кривой ГПУ-сплавов циркония. Показано, что при показателе параболичности $n < 0.5$ наблюдается периодическое накопление локального удлинения и колебательное изменение скорости локализации продольной деформации в режиме „упрочнение–разупрочнение“ в ряде очагов устойчивой макролокализации, один из которых затем трансформируется в шейку. Однако физические причины явления колебательной неустойчивости локализованной пластичности, наблюдаемого на параболической стадии деформационной кривой ГПУ-сплавов циркония, остаются не вполне ясными.

Ряд авторов [3–5] связывают потерю устойчивости пластического течения на макроскопическом уровне с началом неоднородного локального геометрического изменения формы образца. Согласно [5], общие закономерности потери устойчивости обусловлены формированием начальной макроскопической флуктуации деформации критического размера, сопровождающимся локальным приростом поверхности и изменением геометрии образца.

В настоящей работе для выяснения причин потери устойчивости пластического течения на параболической стадии деформационного упрочнения сплавов циркония предпринята попытка экспериментального исследования развития макролокализации деформации с помощью независимых методов лазерной спекл-интерферометрии и профилирования поверхности образца в процессе растяжения.

Материалы и методика эксперимента

В работе исследовались закономерности макролокализации деформации ГПУ-сплавов циркония Э125 и циркалой-2. Образцы в виде двусторонней лопатки размером $46 \times 9.8 \times 1.7$ mm подвергались одноосному растяжению на испытательной машине „INSTRON 1185“ со скоростью деформации $3.6 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ при комнатной температуре по схеме, соответствующей плоскому напряженно-деформированному состоянию.

Методом спекл-интерферометрии одновременно с записью диаграммы растяжения фиксировалось поле векторов смещений точек на поверхности [6]. Определялись как локальная суммарная деформация удлинения путем суммирования компонент тензора пластической дисторсии ε_{xx} и ε_{yy} по площади, занимаемой очагом локализации, так и величина локального прироста деформации $\Delta\varepsilon_{xx}$ и $\Delta\varepsilon_{yy}$ в этом очаге, как разность локальной суммарной деформации $\varepsilon_{xx}^{\text{sum}}$ и $\varepsilon_{yy}^{\text{sum}}$ через каждые 0.2% общей деформации.

Методом реперов в сочетании с фотосъемкой образца в процессе испытаний [7,8] исследовалась кинетика локального пластического течения материала как в целом образце, так и в очагах локализации деформации. Профилограммы строились с использованием результатов измерения ширины образца, распределения истинных деформаций в продольном и поперечном направлениях вдоль всего образца, а также с помощью лазерного бесконтактного профилирования на установке „MICRO MEASURE 3D station“. Измерение расстояния между реперами вдоль оси растяжения проводилось по методу, предложенному в [9]. Истинная деформация определялась по формуле $e = \ln(l/l_0)$, что позволило количественно оценить эволюцию локальных скоростей продольной и поперечной деформации на завершающей стадии деформационного процесса, включая формирование шейки.

Результаты и их обсуждение

В работе [10] было установлено, что параболическая стадия деформационной кривой ГПУ-сплавов циркония является сложной и в логарифмических координатах $\ln(S-S_0) - \ln e$ может быть разделена на ряд прямолинейных участков с дискретно уменьшающимся показателем параболичности n , при этом образование подстадий с $n < 0.5$ обусловлено поэтапным процессом макролокализации пластического течения. Метод лазерной спеклинтерферометрии позволил выявить очаги устойчивой макролокализации деформации (рис. 1) и изучить характер последовательного накопления в них суммарной деформации локального удлинения ϵ_{xx}^{sum} [1,2].

С целью определения роли поперечных напряжений в появлении колебательной неустойчивости пластического течения (при $n < 0.5$) в настоящей работе проведено исследование эволюции распределения компоненты локального сужения ϵ_{yy} как в деформируемом образце в целом, так и в выделенных очагах устойчивой локализации. Следует отметить, что метод спеклинтерферометрии позволяет надежно исследовать процесс локализации деформации до предела прочности, поскольку существенное изменение кривизны поверхности при локализации деформации в шейке вносит погрешность в измерение векторов смещения точек на поверхности деформируемого образца. Таким образом,

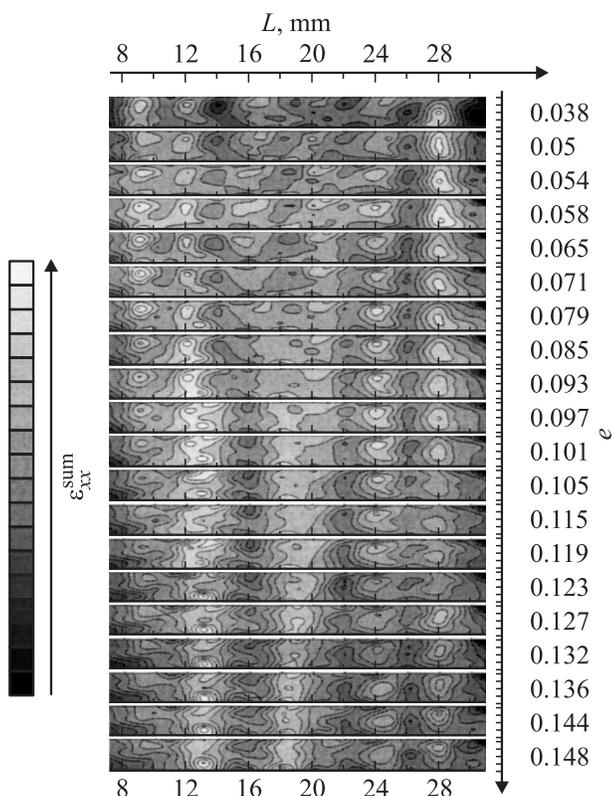


Рис. 1. Неоднородность распределения локальной деформации удлинения ϵ_{xx}^{sum} в образце сплава циркалой-2 в процессе растяжения.

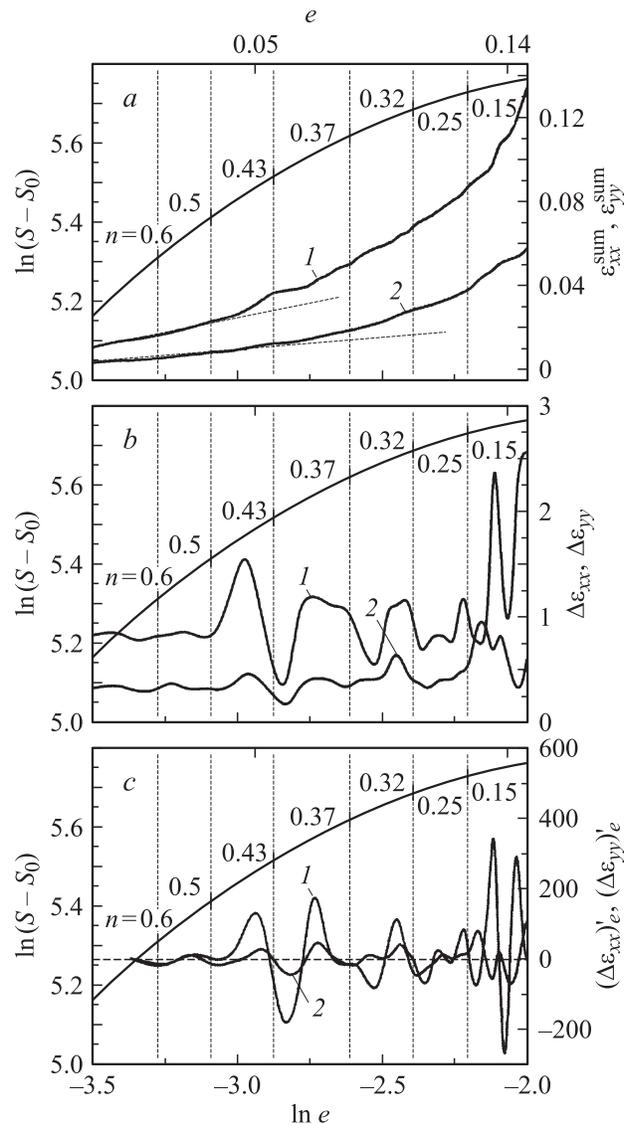


Рис. 2. Характер накопления локальных деформаций сужения и удлинения в формирующейся шейке на параболической стадии деформационной кривой (n — показатель параболичности) сплава циркалой-2: *a* — изменение локальных суммарных деформаций удлинения ϵ_{xx}^{sum} (1) и сужения ϵ_{yy}^{sum} (2), *b* — изменение прироста локальных деформаций $\Delta\epsilon_{xx}$ (1) и $\Delta\epsilon_{yy}$ (2); *c* — изменение скорости прироста локальных деформаций $(\Delta\epsilon_{xx})'_e$ (1) и $(\Delta\epsilon_{yy})'_e$ (2).

в работе исследованы закономерности накопления суммарной деформации локального удлинения и локального сужения в очагах устойчивой локализации в процессе деформирования вплоть до начала образования шейки.

На рис. 2, *a* представлены зависимости изменения значений суммарных локальных деформаций ϵ_{xx}^{sum} и ϵ_{yy}^{sum} с ростом общей деформации в области очага локализации, который трансформируется впоследствии в шейку, для сплава циркалой-2. Данные зависимости совмещены с деформационной кривой растяжения образца в логарифмических координатах $\ln(S-S_0) - \ln e$. Видно, что

скорость накопления деформации локального удлинения в очаге локализации примерно в два раза превышает скорость накопления деформации локального сужения. При этом в начале стадии параболического деформационного упрочнения при $n \geq 0.5$ скорость изменения обеих величин постоянна, а затем при $n < 0.5$ локализация деформации, как удлинения, так и сужения, в очаге резко увеличивается и продолжает расти до достижения предельной нагрузки.

Исследование кинетики развития локализации деформации в выделенных очагах устойчивой макролокализации показало, что зависимости изменения прироста локальных деформаций $\Delta\varepsilon_{xx}$ и $\Delta\varepsilon_{yy}$ (рис. 2, *b*), а также скорости изменения прироста (или ускорения) локальных удлинения $(\Delta\varepsilon_{xx})'_e$ и сужения $(\Delta\varepsilon_{yy})'_e$ в них (рис. 2, *c*) имеют нелинейный характер. Колебательное изменение скорости локализации происходит в режиме „упрочнение–разупрочнение“. Из рис. 2 видно, что благодаря высокой чувствительности метод спеклинтерферометрии позволяет зафиксировать начало процесса периодического накопления локальных деформаций удлинения и сужения в очагах локализации уже на подстадиях параболической кривой с $n > 0.5$. Однако резкое возрастание амплитуды прироста локальных деформаций и изменения скорости локализации происходит при снижении показателя параболичности до $n < 0.5$. С ростом общей деформации амплитуды колебаний этих параметров локализации увеличиваются и становятся максимальными при достижении предельной нагрузки, при этом амплитуда изменения локальной скорости деформации удлинения возрастает в три раза.

Очевидно, что постоянное совместное периодическое накопление деформаций в очагах локализации в продольном и поперечном направлениях должно неизбежно приводить к началу локального геометрического изменения формы образца. Профилирование деформируемого образца позволило установить, что деформация в трех направлениях поперечном, продольном, и нормальном к поверхности образца развивается неоднородно. Наиболее четко макролокализация деформации проявляется на профилограммах, которые демонстрируют изменение формы боковой поверхности деформируемого образца вдоль рабочей длины.

На рис. 3 представлены профилограммы для образца сплава Э125. Метки на деформационной кривой соответствуют моментам снятия профилограмм. Можно видеть, как после 5% общей деформации на поверхности возникают и развиваются два очага макролокализации, в которых начинается изменение геометрии образца. В дальнейшем рост одного из очагов останавливается, а другого активизируется, и этот очаг локализации деформации трансформируется в шейку (рис. 3). Аналогичная картина эволюции локализации деформации, связанной с изменением геометрической формы образца, была получена для деформации вдоль нормали к по-

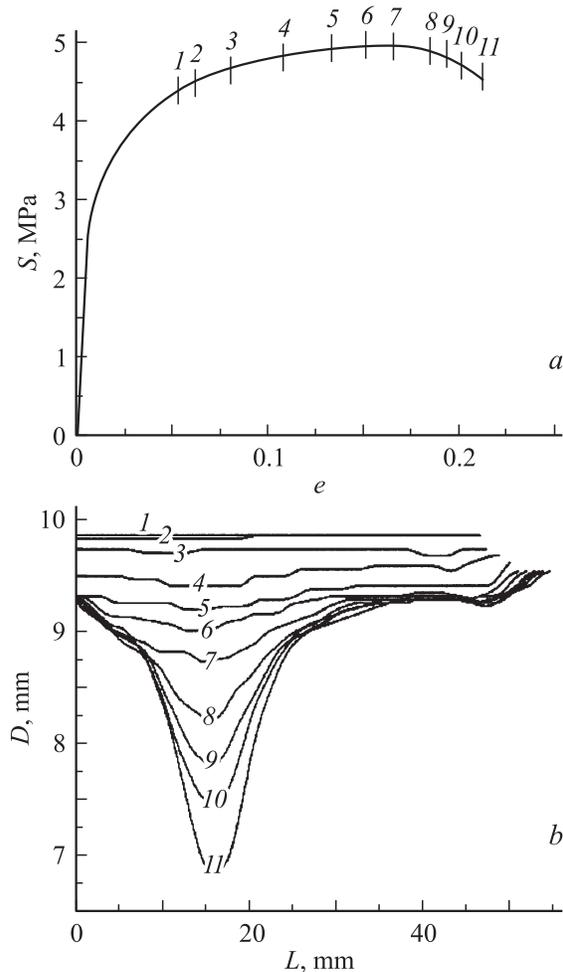


Рис. 3. Деформационная кривая растяжения (*a*) и профилограммы (*b*) деформируемого образца из сплава Э125. 1–11 — номера точек, в которых проводилась фотосъемка образца, D — ширина образца, L — длина образца.

верхности образца, однако в этом случае геометрическое изменение формы поверхности меньше.

Измерение расстояния между реперами вдоль оси растяжения по методу, предложенному в [9], позволило получить картину эволюции распределения локальной продольной деформации. Установлено, что макролокализация деформации обуславливает локальное изменение геометрии поверхности образца также после 5% общей деформации.

Сопоставление полученных профилограмм с деформационной кривой показало, что резкое локальное неоднородное изменение геометрии образца, связанное с локальным изменением кривизны и приростом поверхности, возникает на параболической подстадии с показателем параболичности $n < 0.5$. Это означает, что потеря устойчивости пластического течения циркониевых сплавов на параболической стадии деформационной кривой с $n < 0.5$ связана с началом неоднородного геометрического формоизменения образца, сопровождающего

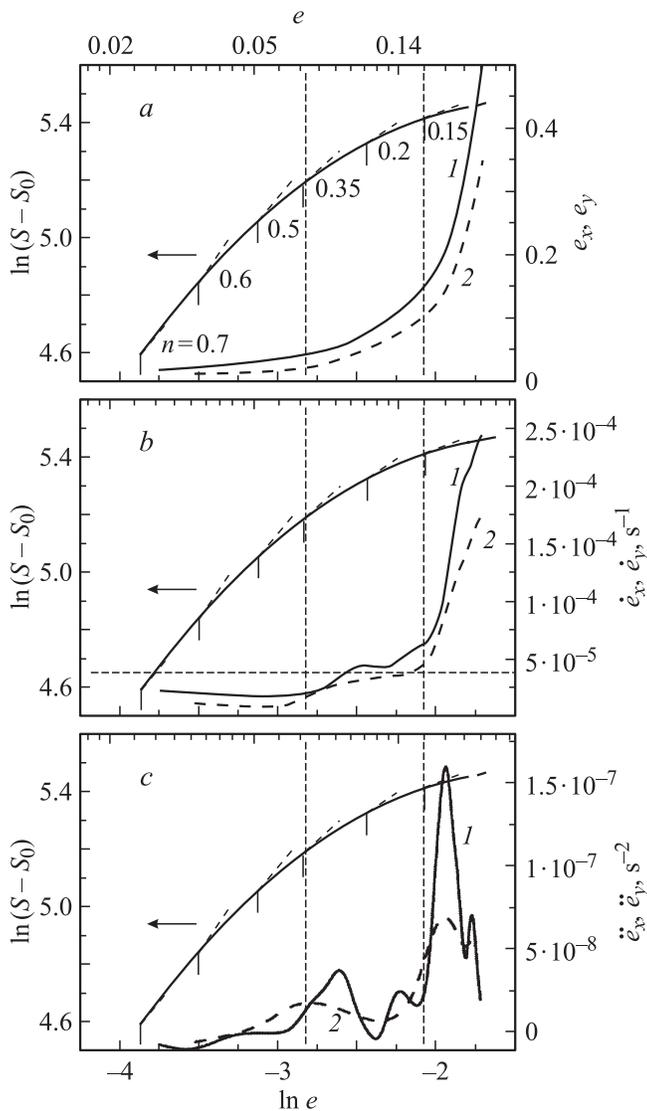


Рис. 4. Характер изменения локальных деформаций удлинения (1) и сужения (2) в формирующейся шейке на параболической стадии деформационной кривой сплава Э125: *a* — изменение локальных деформаций e_x и e_y ; *b* — изменение скорости локальных деформаций \dot{e}_x и \dot{e}_y ; *c* — изменение ускорения локальных деформаций \ddot{e}_x и \ddot{e}_y .

формирование шейки. В этой связи можно полагать, что дискретное снижение показателя параболичности от значения 0.5 является следствием последовательного процесса макролокализации пластического течения исследуемых материалов.

Анализ процесса локализации деформации в „активной“ шейке в продольном и поперечном направлениях позволил установить следующие закономерности. На рис. 4, *a* представлены кривые деформации, совмещенные с кривыми изменения локальных деформаций удлинения и сужения, в которых можно выделить три стадии. На параболической стадии пластического течения с $n \geq 0.5$ наблюдается слабый линейный рост

локальных деформаций, а после начала неоднородности изменения геометрической формы образца, сопровождающегося снижением показателя параболичности до значений, меньших 0.5, характер роста локальных деформаций становится нелинейным. Наиболее сильное увеличение локализации деформации происходит при $n < 0.2$, когда начинаются геометрическое разупрочнение материала и формирование шейки разрушения. При этом скорость удлинения образца в шейке достигает значения $2.5 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, что более чем в 7 раз больше приложенной скорости деформации (рис. 4, *b*).

Кинетику развития локализации деформации в „активной“ шейке иллюстрируют рис. 4, *b, c* на которых начиная с параболических подстадий с $n < 0.5$ можно наблюдать колебательный характер изменения кинетических параметров локализации \dot{e} и \ddot{e} в режиме „упрочнение–разупрочнение“. Похожий пульсирующий характер развития локальной деформации наблюдался ранее на цилиндрических образцах некоторых пластичных материалов в работах [3]. Из рис. 4, *b, c* видно, что на кинетических кривых локализации деформации также можно выделить три стадии: стадию практически постоянной скорости локального пластического течения ($n \geq 0.5$), стадию колебательного „упрочнения–разупрочнения“ ($0.5 > n > 0.2$) и стадию устойчивого разупрочнения ($n < 0.2$), связанную с образованием микроскопической шейки.

Следует отметить особенность развития локализации продольных и поперечных деформаций, обнаруженную нами при растяжении плоских образцов. Так, колебания локальной деформации сужения в формирующемся очаге макролокализации при $0.5 > n > 0.2$ опережает по фазе колебание локальной деформации удлинения, а на стадии устойчивого разупрочнения при достижении максимальной нагрузки эти колебания становятся синфазными, что сопровождается резким ростом их амплитуды и образованием шейки разрушения.

Можно полагать, что наблюдаемые нелинейные колебания локальных продольных и поперечных деформаций в очаге макролокализации происходят взаимосвязанно. Действительно, постепенное возрастание роли геометрического фактора приводит к началу формирования сложнонапряженного состояния, обуславливающего появление гидростатической компоненты напряжения в схеме нагружения [8,11]. В этом случае рост поперечных напряжений приводит к увеличению напряжений течения материала в продольном направлении [3]. Повидимому, увеличение скорости деформации в поперечном направлении в зоне локализации приводит к упрочнению и, как следствие, к торможению дальнейшей локализации поперечной деформации. Это сопровождается ростом скорости локальной продольной деформации, упрочнением, а затем и торможением локализации деформации вдоль оси растяжения.

Колебательный процесс взаимосвязанного геометрического „упрочнения–разупрочнения“ в очаге макролокализации в поперечном и продольном направлениях

продолжается до тех пор, пока колебания не совпадут по фазе. Этот момент определяет начало формирования шейки разрушения образца. Близкой аналогией наблюдаемому явлению колебательной неустойчивости могут быть фрикционные автоколебания, возникающие в результате связанных колебаний тела в нормальном и тангенциальном направлениях к поверхности трения [12]. При этом сила сопротивления деформированию и скорость растяжения образца могут быть соответственно аналогами силе трения и скорости скольжения.

Заключение

Таким образом, совместный анализ процесса эволюции локализации пластической деформации методами спекл-интерферометрии и профилирования поверхности позволил установить, что возникновение колебательной неустойчивости на параболической стадии пластического течения сплавов циркония связано с началом локального неоднородного изменения геометрии деформируемого образца, являющимся предвестником формирующейся шейки. Этот процесс начинается на параболической стадии с показателем параболичности $n \geq 0.5$ и далее сопровождается поэтапным снижением показателя параболичности $0.5 > n > 0.2$. Стадия локального колебательного „упрочнения–разупрочнения“ материала, определяемого периодически прогрессирующим уменьшением поперечного сечения образца, продолжается от момента начала формирования шейки до образования области устойчивого разупрочнения материала при $n < 0.2$. Установлен нелинейный характер накопления локальной деформации в очагах локализации как в продольном, так и в поперечном направлениях, при этом кинетика периодического процесса „упрочнение–разупрочнение“ определяется колебательным изменением максимальных поперечных и продольных напряжений в очаге локализации.

Полученные результаты согласуются с предложенной в [5] моделью критического зародыша флуктуации деформации, которым в нашем случае является очаг устойчивой макролокализации. Периодическое накопление деформации в таких очагах начинается практически с самого начала параболической стадии пластического течения, далее один из зародышей макрофлуктуации деформации становится критическим, а закритический его рост приводит к локальному изменению геометрии образца и потере устойчивости пластического течения, которая наблюдается на деформационной кривой в виде подстадий с уменьшающимся показателем параболичности. При этом кинетика процесса потери устойчивости имеет в общем случае нелинейный характер, который вытекает из решения феноменологического нелинейного уравнения взаимосвязи напряжения и деформации при растяжении образца [5].

Работа выполнена в рамках проекта 3.6.1.2 программы фундаментальных исследований СО РАН и при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 08-08-99121-р_офи.

Список литературы

- [1] Полетика Т.М., Нариманова Г.Н., Колосов С.В. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 3. С. 44–49.
- [2] Полетика Т.М., Нариманова Г.Н., Колосов С.В. и др. // ПМТФ. 2006. № 3. С. 141–149.
- [3] Пресняков А.А. Локализация пластической деформации. М: Машиностроение, 1983. 156 с.
- [4] Wray P.J. // J. Appl. Phys. 1970. Vol. 41. P. 3347–3352.
- [5] Криштал М.М. // ФММ. 2001. Т. 92. Вып. 3. С. 96–112.
- [6] Зуев Л.Б., Данилов В.И., Семухин Б.С. // УФМ. 2002. Т. 3. Вып. 3. С. 237–304.
- [7] Сухарев И.П. Экспериментальные методы исследования деформации и прочности. М.: Машиностроение, 1987. 213 с.
- [8] Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических материалов. Киев: Наукова думка, 1987. 256 с.
- [9] Korsunsky A.M., Nguyen G.D., Kim K. // Mater. Science and Eng. A. 2006. Vol. 423. P. 192–198.
- [10] Полетика Т.М., Данилов В.И., Нариманова Г.Н. и др. // ЖТФ. 2002. Т. 79. Вып. 9. С. 57–62.
- [11] Золотаревский В.С. Механические испытания и свойства металлов. М.: Металлургия, 1974. 304 с.
- [12] Геккер Ф.Р., Хайралиев С.И. // Трение и износ. 1992. Т. 13. № 4. С. 581–587.