

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ

д.ф.-м.н., проф. В.М. Андронов, к.ф.-м.н. Н.Я. Рохманов, В.В. Нерубенко

Основываясь на результатах компьютерного анализа распределения напряжений на фронте полосы Людерса-Чернова, произведен расчет максимальных локальных напряжений и моделирование поведения напряжений при работе источников дислокаций в процессе упругопластического нагружения на начальных стадиях деформирования нитевидных кристаллов меди.

Постановка проблемы. Факт достижения в реальных кристаллах прочностных характеристик, в сотни и тысячи раз превышающих показатели массивных кристаллов и близкие к теоретическим параметрам (максимально возможным) для данного типа кристаллов, обусловили к ним непроходящий теоретический и практический интерес [1]. Эти и другие уникальные свойства нитевидных кристаллов уже давно используются в технике, в частности, при армировании волокнистых композиционных материалов, широко применяемых в космической и авиационной технике. Несмотря на это, полного теоретического описания свойств нитевидных кристаллов до сих пор не получено. В частности, не нашел однозначного объяснения нестабильный характер пластического течения нитевидных кристаллов, выражающийся в осциллирующем характере изменений, действующих в образцах напряжений, и совершенно непригодный обычным материалам, деформируемым в тех же условиях. Проблема заключается, прежде всего, в особенностях функционирования дислокационных источников и факторов локализации пластической деформации, действующих в таких объектах.

Анализ литературы и исследований. Моделирование начальной стадии кривой напряжение – деформация для кристаллов, находящихся в особом структурном состоянии, – нитевидных монокристаллов, произведено на основании физической модели, разработанной ранее [2]. Фактором, запускающим пластическое течение материала, является уровень локальных напряжений, который формируется на поверхности кристалла. В работах [3 – 5] методом конечных элементов выполнен компью-

терный анализ распределения упругих напряжений на фронте полосы Людерса-Чернова, который позволяет оценивать максимальные упругие напряжения, их локализацию в пространстве, эволюцию этого распределения в процессе пластического течения. Включение в расчеты гипотезы о критических напряжениях срабатывания дислокационных источников позволило построить зоны пластической деформации, что дало дополнительную информацию о возможных механизмах фронтального распространения полосы Людерса-Чернова.

Цель данной работы заключается в расчете максимальных локальных напряжений и моделировании поведения напряжений на фронте полосы Людерса-Чернова при работе источников дислокаций в процессе упругопластического нагружения на начальных стадиях деформирования нитевидных кристаллов меди.

При трансляционном скольжении в единственной системе (синглетном скольжении), имеющем место на стадии легкого скольжения в нитевидных кристаллах, формируется деформированная зона по типу полосы Людерса-Чернова. Пластический сдвиг в деформированной зоне напоминает сдвиг колоды карт, что приводит к излому оси образца на границе деформированной зоны, т.е. на фронте полосы Людерса-Чернова. В условиях приложенных извне напряжений в месте излома возникает пространственный изгиб и как следствие сложнапряженное состояние, характеризующееся крайне неравномерным распределением напряжений, особенности которого были просчитаны машинными методами. На рис. 1 представлен общий вид пространственного распределения нормальных напряжений при растяжении (действующих вдоль оси) в нитевидном кристалле в окрестностях фронта распространения полосы Людерса-Чернова.

Расчеты выполнены по методу конечных элементов с использованием модели упругопластического тела Прандтля, в которой участки линейного нагружения перемежаются с участками абсолютной пластичности, что в наибольшей степени отвечает нестабильному характеру пластического течения нитевидных кристаллов. Учитывалась анизотропия упругих свойств деформируемого тела, отвечающая трем возможным кристаллографическим ориентациям нитевидных кристаллов. Расчет упругих констант вдоль оси растяжения производился стандартными методами теории упругости.

Эти результаты доказывают три важных положения: 1) на фронте полосы Людерса-Чернова напряжения максимальны на поверхности образца; 2) на противоположной стороне поверхности скольжения они минимальны и даже могут иметь обратный знак; 3) вдоль оси образца напряжения максимальны на границе, разделяющей деформированную и

недеформированную зоны, т.е. именно там, где образуется ступенька на поверхности образца за счет трансляционного скольжения.

Развитие пластического течения в нитевидных кристаллах происходит путем эстафетной передачи скольжения из деформированной зоны в недеформированную. Именно высокий уровень локальных напряжений и особенности их пространственного распределения являются главными факторами в зарождении и распространении полосы Людерса-Чернова. Поэтому на следующем этапе работы представляло интерес произвести моделирование напряжений на фронте полосы Людерса-Чернова и оценить их максимальные значения. Основные этапы моделирования напряжений на поверхности образца выглядят следующим образом.

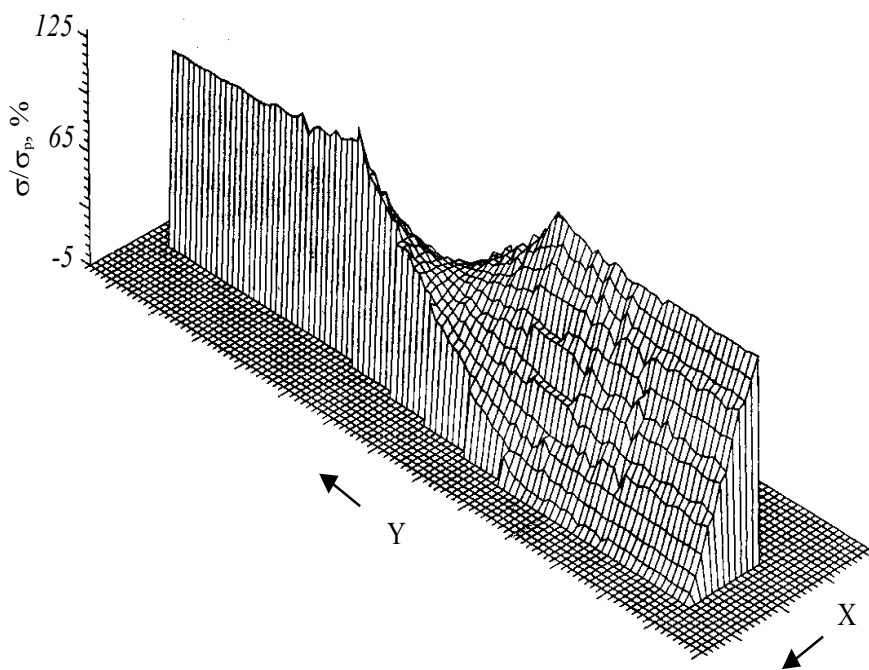


Рис. 1. Общий вид распределения нормальных напряжений σ , действующих вдоль оси растяжения, на фронте полосы Людерса-Чернова (образец – нитевидный монокристалл квадратного сечения, кристаллографической ориентации $\langle 100 \rangle$, σ_p – приложенное напряжение, X, Y – координаты)

Основываясь на расчете концентрации напряжений от ступеньки [6] напряжения σ_c вблизи малой односторонней ступеньки (находящейся на фронте полосы поверхности в исходном состоянии – ступеньки роста) высотой h можно представить в виде

$$\sigma_c = \sigma_n \left[1 + (1 - \Omega/\pi) \sqrt{h/\rho} \right] = \sigma_n (1 + \alpha \sqrt{h/\rho}), \quad (1)$$

где σ_n – напряжения на поверхности кристалла, складывающиеся из приложенных напряжений и изгибных, формирующиеся в результате локального пространственного сдвига при синглетном скольжении; ρ – радиус закругления в устье ступеньки; Ω – ориентационный фактор; α – численный коэффициент, включающий и ориентационный фактор.

Начало пластического течения в результате гетерогенного зарождения дислокаций и последующего синглетного скольжения приводит к локализованному сдвигу (двухсторонней ступеньке) и появлению изгиба кристалла. Оценка максимальных изгибных напряжений, возникающих на двухсторонней ступеньке высотой H , образующейся вследствие трансляционного скольжения, дает дополнительный вклад в уровень действующих напряжений на поверхности кристалла

$$\sigma_x = \frac{M}{J} = \int_S r \times \sigma^* dS \cong \beta \sigma_p \frac{H}{d}, \quad (2)$$

где M – момент сил; J – момент инерции сечения образца; r – радиус-вектор, указывающий на положение элемента площади dS на поверхности скольжения; σ^* – тензор напряжений в определенной точке r ; d – диаметр образца; β – численный коэффициент, зависящий от формы сечения образца, например, в случае квадратного сечения $\beta \approx 6$.

Напряженное состояние формируется в результате действия трех факторов: приложенных извне напряжений σ_p , изгибных напряжений σ_n , обусловленных появлением двухсторонней ступени высотой H , и концентрацией этих напряжений в результате присутствия исходной односторонней ступени высотой h . Общий уровень локальных напряжений вблизи односторонней ступеньки с учетом изгибных напряжений, таким образом, будет

$$\sigma_c = (\sigma_p + \sigma_n)(1 + \alpha \sqrt{h/\rho}) = \sigma_p(1 + \beta H/d) (1 + \alpha \sqrt{h/\rho}). \quad (3)$$

С учетом релаксации напряжений в результате активации работы дислокационного источника и стопорения дислокаций в действующей полосе скольжения локальные напряжения уменьшатся на величину $\gamma n b E / l$, где E – модуль нормальной упругости, l – длина образца, b – вектор Бюргера дислокаций, n – число генерированных дислокаций, испускаемое источником при однократном его срабатывании, γ – ориентационный множитель. Таким образом, суммарный уровень локальных напряжений выразится следующим образом:

$$\sigma_c = (\sigma_p - \gamma n b E / l) (1 + \beta H/d) (1 + \alpha \sqrt{h/\rho}). \quad (4)$$

Выражение (4) отвечает режиму релаксации. При активном нагружении с постоянной скоростью деформирования необходимо учесть рост упругих напряжений за счет движения захватов машины со скоростью v за время Δt , разделяющее два последовательных скачка напряжений, соответствующих срабатыванию дислокационных источников

$$\sigma_c = (\sigma_p + v\Delta t E / l - \gamma n b / E) (1 + \beta H/d) (1 + \alpha \sqrt{h/\rho}). \quad (5)$$

В формуле (5) в выражении, стоящем в первых круглых скобках, содержатся по существу два подгоночных параметра: время между двумя последовательными актами генерации – источником дислокаций Δt и количество испущенных им дислокаций n . Конкретные значения этих параметров берутся из экспериментов, проводя статистическую обработку гистограмм скачков напряжений. Структура выражения явно указывает на осциллирующий характер изменения деформирующих напряжений в образце.

Ключевым моментом в физическом обосновании модели является исследование особенностей функционирования дислокационного источника вблизи поверхностной ступеньки кристалла. В условиях сложноподвиженного состояния он превращается из планарного в пространственный, что разрешает проблему эстафетной передачи пластической деформации из деформированной зоны в недеформированную. Для обоснования такого подхода необходимо предположить высокие скорости движения дислокаций, достаточные для зарождения новых дислокаций за счет собственной кинетической энергии движения. Это в свою очередь приводит к тому, что создается ситуация, когда в соседних плоскостях скольжения дислокации разного знака движутся навстречу друг другу. Возникает вероятность образования диполей в плоскости скольжения.

Дислокационные диполи являются непреодолимыми препятствиями на пути движения последующих дислокаций, возникают плоские скопления дислокаций, которые и запирают действующий источник. Этому способствуют неравномерные напряжения, которые формируются вдоль сечения образца за счет пространственного изгиба, возникающего в результате синглетного скольжения (рис. 1). Эти напряжения меняют знак при переходе с одной поверхности образца на противоположную, следуя направлению скольжения. Следовательно, существует определенная область пробега движущихся навстречу дислокаций, где их взаимные скорости минимальны. В этом месте сечения образца вероятность образования диполей максимальна, что косвенно подтверждается электронно-микроскопическими данными, показывающими наличие диполей в деформированных нитевидных кристаллах других материалов [7].

Возникает задача об оценке вероятности захвата дислокациями друг

друга, решение которой зависит от ряда параметров: взаимных скоростей дислокаций, расстояний между ними, влияния внешних поверхностей кристалла, константы торможения дислокаций и др. В данной работе эта задача решена за счет обработки экспериментальных данных по характеру кривой упрочнения. Были построены гистограммы скачков напряжений (деформаций) на различных стадиях кривой напряжение-деформация для нитевидных кристаллов различного диаметра и кристаллографической ориентации.

На основе анализа гистограмм по методике Б.М. Струнина [8] оказалось возможным определить длины свободного пробега дислокаций, а отсюда и вероятности дислокационных реакций, ограничивающих их пробег – образование дислокационных диполей. Обработанные таким образом экспериментальные данные позволили получить спектры значений n и Δt и воссоздать осциллирующий характер изменения действующих в образце напряжений (рис. 2).

Характер машинных кривых имеет большое сходство с экспериментальными диаграммами. Некоторые различия обусловлены, по-видимому, влиянием поверхностных ступеней, образующихся на поверхности кристалла в процессе роста. Полученные результаты могут быть использованы при описании фронтального распространения полосы Людерса-Чернова, двойниковании кристаллов, деформации сплавов с памятью формы и др.

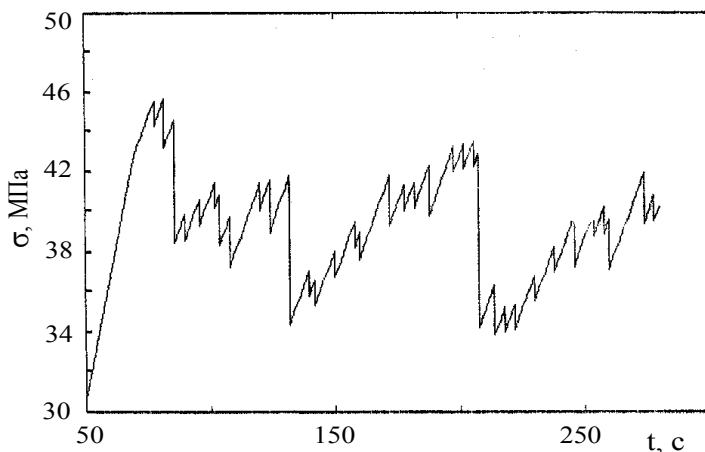


Рис. 2. Фрагмент машинной кривой напряжение-деформация (время пропорционально деформации при постоянной скорости движения захватов v) условного нитевидного кристалла меди ориентации $\langle 100 \rangle$ диаметром 10 мкм

Выводы. На основании анализа напряженного состояния, формиру-

ющегося на фронте полосы Людерса-Чернова, машинным путем получены трехмерные эпюры распределения нормальных напряжений. Учет совокупности действующих на границе деформированной зоны факторов позволил получить аналитическое выражение для максимальных локальных напряжений на поверхности образца, являющихся определяющими для начала работы источников дислокаций. Учет взятых из эксперимента числа генерированных дислокаций и временных интервалов между последовательными срабатываниями источников дислокаций дал возможность смоделировать фрагмент кривой напряжение-деформация (время), хорошо согласующийся с экспериментальными данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев З.В., Каптелин С.Ю. О физико-механической природе эффекта упрочнения материала нитевидных кристаллов и тонких нитей // Прикладная механика и техническая физика. – Н-ск: Наука, Сиб. отд. – 1992. – № 4 (194). – С. 135 – 141.
2. Андронов В.М., Гвоздиков А.М. Микроскопическая модель нестабильного пластического течения нитевидных кристаллов // Изв. РАН, сер. Физ. – 1993. – Т. 57, № 11. – С. 120 – 128.
3. Андронов В.М., Гвоздиков А.М. Напряженное состояние на фронте полосы Людерса-Чернова и нестабильное пластическое течение кристаллов // ФММ, 1987. – Т. 63, вып. 6. – С. 1212 – 1219.
4. Андронов В.М., Гвоздиков А.М. Механизм локализации пластической деформации на фронте полосы Людерса-Чернова // Тез. докл. XIV-й междунар. конф. «Физика прочности и пластичности материалов». – Самара. – 27 – 30 июня 1995 г. – С. 76.
5. Андронов В.М., Гвоздиков А.М. Роль поверхностных ступеней в локализации пластического течения нитевидных кристаллов // Тез. докл. XIV-й междунар. конф. «Физика прочности и пластичности материалов». – Самара. – 27 – 30 июня 1995 г. – С. 332.
6. March D.M. Stress concentration at steps on crystal surfaces and their role in fracture // Int. conf. Fracture of solids. AIME. – N.Y., 1963. – P. 119 – 143.
7. Бережкова Г.В. Нитевидные кристаллы. – М.: Наука, 1969. – 57 с.
8. Струнин Б.М. О статистической интерпретации рельефа поверхности деформируемых кристаллов. – ФТТ, 1964. – Т. 6, вып. 10. – С. 3004 – 3015.

Поступила 2.03.2004

АНДРОНОВ Владимир Михайлович, доктор физ.-мат. наук, профессор, ведущий научный сотрудник ХНУ. Область научных интересов – физика упругости и пластичности твердых тел.

РОХМАНОВ Николай Яковлевич, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник ХНУ. Область научных интересов – внутреннее трение в твердых телах.

НЕРУБЕНКО Виктор Вадимович, инженер ХНУ. Область научных интересов – свойства нитевидных кристаллов.
