

01;05

## Локализация деформации растяжения в монокристаллах легированного $\gamma$ -Fe с углеродом

© С.А. Баранникова

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634021 Томск, Россия  
E-mail: lev@zuevs.tomsk.ru

Поступило в Редакцию 16 февраля 2000 г.

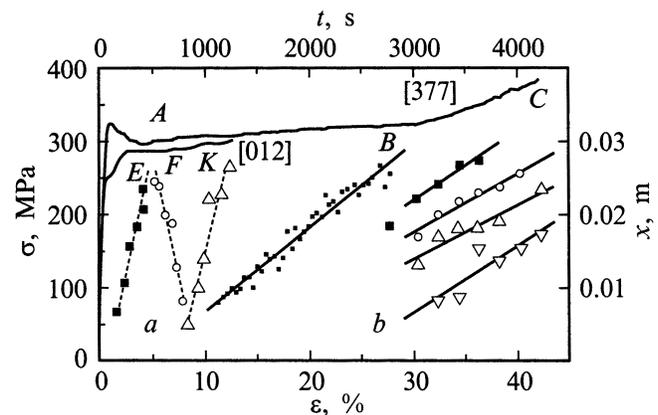
Исследована эволюция локальных деформаций при растяжении монокристаллов высокомарганцовистого аустенита с углеродом. Показано, что типы упорядоченных картин локализации находятся в тесной связи со стадиями деформационной кривой. Полученные результаты сравниваются с аналогичными данными исследований полей деформации монокристаллов хромо-никелевого аустенита с азотом. Установлена зависимость скорости самосогласованного движения очагов неоднородностей пластической деформации при растяжении монокристаллов  $\gamma$ -Fe от коэффициента деформационного упрочнения и механизма деформации.

При обобщении результатов исследований моно- и поликристаллов металлов и сплавов [1–3], выполненных с использованием спекл-интерферометрической методики, было установлено существование трех типов особенностей локализации деформации, соответствующих вполне определенным стадиям пластического течения. Деформационные структуры в виде уединенного фронта, подвижных и стационарных диссипативных структур были интерпретированы [1,2] как различные варианты автоволновых процессов в нелинейной среде [4].

Настоящее исследование выполнено на монокристаллах стали Гадфильда (Fe–13% Mn–0.93% C), выращенных методом Бриджмена в атмосфере гелия. Образцы вырезали на электроискровом станке в форме двойных лопаток сечением  $1.5 \times 5.0$  mm и рабочей длиной 28 mm. Монокристаллы гомогенизировали в инертном газе 24 h при 1373 K, закаливали в воде после выдержки 1 h при 1373 K. При комнатной температуре образцы растягивались на испытательной машине Instron-1185 со скоростью  $1.2 \cdot 10^{-4}$  s<sup>-1</sup>. Начиная с предела текучести и вплоть до разрыва периодичностью 15 s (через 0.2% общей деформации) методом спекл-интерферометрии [3] производилась регистрация полей векторов смещений на фронтальной поверхности исследуемых образцов. Путем численного дифференцирования по координатам вычислялись распределения продольных, поперечных, сдвиговых и поворотных компонент тензора пластической дисторсии для всех точек наблюдаемой поверхности образца. Далее распределения локальных деформаций строили по всему образцу или вдоль его осевой линии для разных моментов времени или разных значений общей деформации.

В монокристаллах  $\gamma$ -Fe с углеродом, ориентированных вдоль [012] при растяжении, согласно [5], деформация скольжением является основным механизмом пластического течения. На деформационной кривой за пределом текучести следуют две стадии с постоянным коэффициентом деформационного упрочнения (рис. 1, a).

Распределения компонент тензора дисторсии фиксировались в промежутке деформаций  $\varepsilon_{\text{tot}}$  1–12%. На примере распределений локальных удлинений  $\varepsilon_{xx}$  (остальные компоненты ведут себя аналогично) показано, что после предела текучести на начальной стадии легкого скольжения наблюдается перемещение уединенного деформационного фронта от одного захвата машины к другому. По мере прохождения фронта деформации по длине образца (участок EF на деформационной кривой) меняется направление его движения на противоположное и значение скорости распространения фронта (участок FK на деформационной кривой) (рис. 1, a). Скорость распространения деформационного фронта, определенная по наклону прямой, характеризующей распределение координат максимумов  $x$  локальных удлинений  $\varepsilon_{xx}$  (распределение локальных удлинений показано на рис. 2, a) с течением времени деформирования  $t$ , составила  $V_I = V_{II} = 5 \cdot 10^{-5}$  m/s,  $V_{III} = 7 \cdot 10^{-5}$  m/s.



**Рис. 1.** Зависимость распределений максимумов локальных удлинений от времени деформирования на разных стадиях в соответствии с кривыми нагружения стали Гадфильда: *a* — на стадии легкого скольжения в монокристаллах [012], *b* — на стадии легкого скольжения и линейного упрочнения в монокристаллах [377].

Влияние коэффициента деформационного упрочнения  $\theta$  и механизма деформации на скорость распространения деформационных фронтов  $V$  на разных стадиях кривых  $\sigma(\varepsilon)$  в монокристаллах стали Гадфильда

Ориентация монокристалла	Механизм деформации	Стадии на кривой $\sigma(\varepsilon)$	$\theta$ , МПа	$V$ , м/с
[012]	Дисл. скольжение	Легкое скольжение (I) EF	130	$5 \cdot 10^{-5}$
		Легкое скольжение (II) FK	170	$7 \cdot 10^{-5}$
[377]	Двойникование	Легкое скольжение (I) AB	80	$9 \cdot 10^{-6}$
		Линейное упрочнение (II) BC	550	$1.25 \cdot 10^{-4}$

Следует отметить, что наблюдаемые зоны локализации пластического течения при нагружении кристаллов стали Гадфильда с ориентацией [012], двигались со скоростью  $\sim 5-7 \cdot 10^{-5}$  м/с, в случае кристаллов хромоникелевого аустенита с азотом [2], деформация которых осуществлялась также скольжением, скорость движения деформационных зон на стадии легкого скольжения составила  $\sim 3.5 \cdot 10^{-5}$  м/с.

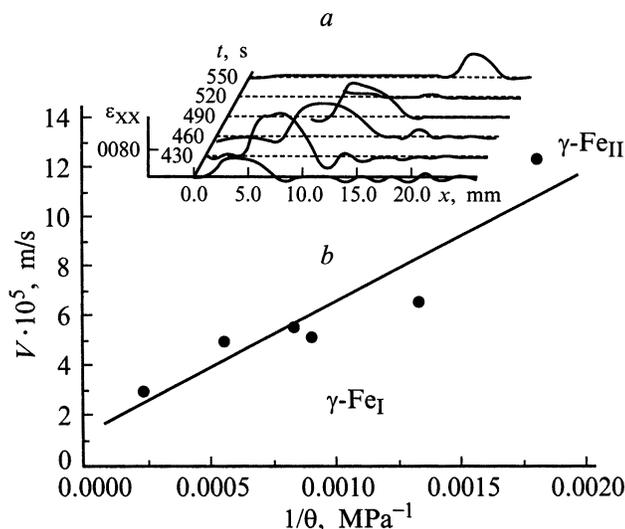
В монокристаллах  $\gamma$ -Fe с углеродом, ориентированных вдоль [377], согласно [5], основным механизмом пластической деформации при растяжении при комнатной температуре является двойникование, наблюдающееся с самого начала пластической деформации. На деформационной кривой (рис. 1, б) стадия легкого скольжения вместе с зубом текучести имела протяженность до 30%. При этом по кристаллу распространяется полоса Людерса. Последующее увеличение деформации кристаллов [377] приводит к линейному упрочнению до 45% вплоть до разрушения. Стадия параболического упрочнения в данной ориентации, как и в ориентации [012], не наблюдалась.

Анализ распределений зон локализованной деформации показал следующее. На протяжении всей стадии легкого скольжения (участок AB на деформационной кривой) перемещается одиночный фронт пластической деформации со скоростью  $V_I = 9 \cdot 10^{-6}$  м/с (рис. 1, б). На стадии линейного упрочнения (участок BC) движется совокупность 4-5 локализованных максимумов деформации вдоль оси образца с постоянной скоростью  $V_{II} = 1.25 \cdot 10^{-4}$  м/с. Пространственный период процесса, показанного на рис. 1, б, на линейной стадии составил  $\lambda = 5 \pm 1$  мм.

В случае деформирования кристаллов стали Гадфильда, ориентированных вдоль [377], скорость перемещения уединенного фронта пластичности на стадии легкого скольжения составила  $\sim 9 \cdot 10^{-6}$  м/с и оказалась меньше, чем в предыдущем и ранее известных случаях [1,2] в монокристаллах медно-никелевого сплава Cu-10%Ni-6%Sn ( $V \sim 6.5 \cdot 10^{-5}$  м/с), никелиде титана ( $V \sim 1.5 \cdot 10^{-5}$  м/с), высокоазотистых сталях ( $V \sim 3.5 \cdot 10^{-5}$  м/с) и др. По-видимому, это связано с механизмом двойникования в данном случае в отличие от предыдущих.

На стадии линейного упрочнения наблюдаемая совокупность фронтов пластической деформации перемещалась по образцу со скоростью  $\sim 1.25 \cdot 10^{-4}$  м/с, т.е. большей, чем в азотистом аустените ( $V \sim 2.8 \cdot 10^{-5}$  м/с). Из исследований, проведенных на монокристаллах высокоазотистого хромоникелевого  $\gamma$ -Fe [6], была установлена зависимость скорости перемещения деформационных фронтов от коэффициента деформационного упрочнения на линейных стадиях. Оказалось, что и в случае линейного упрочнения монокристаллов высокомарганцовистого  $\gamma$ -Fe с углеродом ориентации [377] скорость распространения очагов неоднородности пластической деформации (очаг неоднородности приведен на рис. 2, а) обратно пропорциональна коэффициенту упрочнения  $V \sim \Theta^{-1}$  (рис. 2, б).

Результаты представленной работы подтверждают сформулированные ранее выводы о том, что типы распределений локальных деформаций при нагружении материалов и характер эволюции этих распределений определяются поведением коэффициента деформационного упрочнения по мере нарастания уровня общей деформации [1,2]. Однако кинетика периодических процессов при пластическом течении монокристаллов легированного  $\gamma$ -Fe с углеродом обнаружила некоторые особенности.



**Рис. 2.** Перемещение зоны локализованной деформации на примере распределения локальных удлинений (а) и зависимость скорости перемещения зон локализации деформации от коэффициента деформационного упрочнения монокристаллов  $\gamma$ -Fe<sub>I</sub> — хромоникелевый аустенит с азотом;  $\gamma$ -Fe<sub>II</sub> — высокомарганцовистый аустенит с углеродом (б).

Из полученных экспериментальных данных (см. таблицу) удалось установить влияние на скорость перемещения зон локализации пластического течения коэффициента деформационного упрочнения и механизмов деформации — скольжения и двойникования. Выяснение характера связи  $V(\theta)$  может способствовать пониманию природы наблюдаемых при деформации периодических процессов.

## Список литературы

- [1] Zuev L.B., Danilov V.I., Kartashova N.V. // Mater. Sci. and Eng. 1997. Vol. A. 234–236. P. 699.
- [2] Зув Л.Б., Баранникова С.А., Данилов В.И. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 10. С. 56.
- [3] Jones R., Wykes C. Holographic and Speckle Interferometry. Cambridge, 1983.
- [4] Васильев В.А., Романовский Ю.М., Яхно В.Г. Автоволновые процессы. М.: Наука, 1987.
- [5] Литвинова Е.И., Киреева И.В., Захарова Е.Г. и др. // Физическая мезомеханика. 1999. Т. 2. № 1–2. С. 115.
- [6] Баранникова С.А., Зув Л.Б., Данилов В.И. // ФТТ. 1999. Т. 41. Вып. 7. С. 1222.