

УДК 538.911; 548.4; 620.192.63

DOI: 10.17223/00213411/62/6/37

*А.Н. ТЮМЕНЦЕВ<sup>1,2</sup>, И.И. СУХАНОВ<sup>1,2</sup>, А.И. ДМИТРИЕВ<sup>1,2</sup>, С.Г. ПСАХЬЕ<sup>1</sup>***НАНОДИПОЛИ ЧАСТИЧНЫХ ДИСКЛИНАЦИЙ И МЕХАНИЗМ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИИ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УПРУГОЙ ОБЛАСТИ\***

В процессе интенсивной пластической деформации никеля на наковальнях Бриджмена обнаружено явление локализации деформации в области упругих дисторсий с образованием нанополос переориентации с упругой кривизной кристаллической решетки сотни град/мкм и нанодиполей частичных дисклинаций как дефектов упругодеформированной среды и носителей упругих сдвигов и поворотов на фронте распространения нанополос. Проведен теоретический анализ упругонапряженного состояния и энергии этих дефектов, в том числе в процессе их трансформации в более сложные ансамбли взаимосвязанных дисклинаций. С использованием этих результатов и данных молекулярно-динамического исследования динамических вихревых дефектов, формирующихся в области упругих дисторсий, предложены механизмы локализации деформации в этой области на этапах зарождения и распространения указанных выше нанополос.

**Ключевые слова:** электронная микроскопия, кривизна кристаллической решетки, дисклинации, внутренние напряжения, молекулярная динамика, динамические вихри.

**Введение**

Представления о ротационных модах деформации, частичных дисклинациях, их диполях и мультиполях как носителях пластической деформации и переориентации кристаллической решетки в металлических материалах [1–5] развиваются с середины 70-х годов прошлого века, когда эти дефекты были обнаружены экспериментально на стадии развитой пластической деформации этих материалов. Наиболее предпочтительными с энергетической точки зрения и часто наблюдаемыми экспериментально являются скомпенсированные дисклинационные образования – диполи частичных дисклинаций (ЧД) [4, 5]. Их движение при формировании полос локализации деформации, помимо переориентации кристаллической решетки на угол  $\phi$  (мощность диполя), приводит к сдвигам, для характеристики которых авторами [5] введено понятие супердислокаций с эффективными векторами Бюргерса  $\mathbf{B}_{\text{эфф}} = \phi \times \mathbf{l}$  ( $\mathbf{l}$  – плечо диполя), равными величине сдвига.

При анализе микромеханизмов дисклинационных мод деформации и переориентации кристаллической решетки, как правило, используют кооперативные дислокационные модели [4–8], как, например, образование и движение диполей частичных дисклинаций путем разделения дислокационных ансамблей на две подсистемы дислокаций противоположных знаков. Однако эти модели накладывают существенные ограничения на размеры плеча диполя, ограниченного снизу величиной  $l \approx 100$  нм [5] или минимальными характерными размерами этих ансамблей.

Между тем в работе [3] методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения после интенсивной пластической деформации ОЦК-Fe в планетарной шаровой мельнице обнаружены нанодиполи частичных дисклинаций с размерами плеча несколько нанометров. В [9–11] показано, что движением этих дефектов в Ni и сплавах на основе V и Mo–Re в процессе интенсивной пластической деформации на наковальнях Бриджмена удастся добиться максимально возможных эффектов наноструктурирования зеренной структуры с предельными минимальными размерами нанокристаллов несколько нанометров.

В работах [12, 13] нанодиполи частичных дисклинаций обнаружены в области упругих дисторсий на фронте распространения нанополос локализации упругой деформации. Это новый тип дефектов, физическое обоснование которых требует исследования закономерностей и механизмов их зарождения и распространения, выявления элементарных носителей локализованной упругой деформации и условий ее реализации.

\* Электронно-микроскопическое исследование выполнено в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг., направление III.23. Молекулярно-динамическое исследование динамических вихревых структур проведено при финансовой поддержке гранта РНФ, проект № 17-19-01374.

Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала  
**«Известия высших учебных заведений. Физика»**  
осуществляется на платформе  
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU  
на платной основе:

<https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>