

## ИНТЕНСИФИЦИРОВАННОЕ ДВИЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ПРИ БОЛЬШИХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЯХ

Е.Г. Пашинская<sup>1\*</sup>, Ю.Н. Подрезов<sup>2</sup>, В.В. Столяров<sup>3</sup>, А.В. Завдоев<sup>1</sup>, И.И. Тищенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины,  
ул. Р. Люксембург, 72, Донецк, 83114, Украина

<sup>2</sup>Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины,  
ул. Академика Кржижановского, Киев, 383142, Украина

<sup>3</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,  
Малый Харитоньевский пер., 4, Москва, 101990, Россия

\*e-mail: pashinska@mail.ru

**Аннотация.** В работе рассматриваются механизмы формирования ультрамелкозернистой структуры при интенсивной пластической деформации. Показано, что формирование структуры во время деформации определяется конкуренцией механизмов, приводящих к увеличению плотности дефектов, и релаксационных механизмов, способствующих снижению плотности дефектов. Для описания экспериментальных данных по изменению структуры и свойств материалов при больших пластических деформациях в работе привлекается понятие интенсифицированного движения дефектов, позволяющее получить достаточно полную картину структурообразования металлов и сплавов.

### 1. Введение

Принято считать, что интенсивная пластическая деформация (ИПД) отличается от обычной деформации более высоким уровнем давления и активной сдвиговой деформацией. Исследования механизмов ИПД на мезомасштабном уровне показали, что механизмы ИПД и самоорганизация структуры контролируются полем максимальных касательных напряжений и вызываемых ими поворотных мод деформации [1]. Методами неравновесной термодинамики локальных структурно-фазовых превращений установлено, что механизмы деформации при ИПД определяются степенью неравновесности материала в условиях деформации [1]. Это обстоятельство позволяет реализовать протекание нетипичных механизмов деформации чистых металлов и сплавов и получить нанокристаллическое состояние в них.

До сих пор считалось, что основным механизмом, обеспечивающим образование нанозерен (наноструктур), является зернограничное проскальзывание (ЗГП). Однако существуют работы, в которых этот тезис уточняется, развивается и дополняется. Например, авторами [2] предлагается новый подход к исследованию зависимости фрагментации от параметров материала и процесса деформации. Рабочая гипотеза заключается в том, что можно выделить два по существу разных типа фрагментации зерен – фрагментация вследствие классического взаимодействия зерно–зерно и фрагментация вследствие запуска новых механизмов в кинетике дислокации.



ограничения предельного измельчения зёрненной структуры в сплавах на основе никелида титана.

В экспериментах по сравнению деформации с импульсным током и без тока также было обнаружено различие в характере упрочнения и формирующейся структуры. При минимальном вкладе теплового эффекта в процессе электропластической прокатки (ЭПП) степень деформационного упрочнения значительно ниже, а деформационная способность намного выше, по сравнению с холодной прокаткой [5]. В процессе ЭПП роль тока, по-видимому, состоит в запуске специфического релаксационного механизма, способствующего формированию УМЗ- или наноструктуры.

Таким образом, обзор литературы показывает, что к настоящему моменту нет однозначности взглядов в отношении механизмов деформации при ИПД. Однако изучение полученных результатов позволяет высказать предположение, что механизмы пластической деформации при ИПД многообразны и не сводятся только к влиянию ЗГП.

Цель настоящей статьи – показать, что формирование структуры при ИПД будет определяться двумя различными типами механизмов: механизмами, приводящими к увеличению плотности дефектов, и релаксационными механизмами, способствующими снижению плотности дефектов (возврат, полигонизация, рекристаллизация в ходе деформации, ЗГП).

## 2. Обсуждение результатов

В работе [6] показано, что ЗГП – не единственный реализованный при ИПД механизм: еще одним важнейшим механизмом является релаксационный процесс типа динамической рекристаллизации. Поэтому фрагментация зерен металлов и сплавов при ИПД сменяется двумя релаксационными процессами – ЗГП и динамической рекристаллизацией. В основе «быстрой» перестройки границ зерен от мало- до высокоугловых лежит эффект интенсифицированного движения дефектов, под которым следует понимать движение точечных, линейных и объемных дефектов в поле напряжений при ИПД. Именно этот эффект лежит также в основе наблюдаемых в ряде материалов явлений: высокой неравновесной плотности вакансий; снижения температуры в очаге деформации; уменьшения темпов деформационного упрочнения при росте степени деформации и др. Для наглядности эти данные в форме схематических графиков отражены в Таблице 1. Для сравнения приведены данные по изменению аналогичных свойств материалов при стандартных схемах деформации (СТ), таких как прокатка, ковка, волочение. Часть наблюдаемых явлений при ИПД может объясняться развитием ЗГП (знак «+» в Таблице 1) как процесса, конкурирующего с фрагментацией, в то время как остальные явления (знак «-» в Таблице 1) нельзя объяснить только с позиций фрагментации и ЗГП. Однако с привлечением понятия интенсифицированного движения дефектов (ИДД) наблюдаемые изменения можно описать непротиворечиво.

ИДД, согласно [6], может объясняться тем фактом, что сдвиговая деформация приводит к формированию дислокаций с преимущественным количеством винтовых компонент. Иными словами, схемы с использованием простого сдвига способствуют изменению количественного соотношения краевых и винтовых компонент дислокаций в сторону увеличения количества винтовых. Согласно [6], именно поведение винтовых дислокаций определяет поведение материала при высоких напряжениях (выше предела текучести), что объясняет наблюдаемые эффекты.

Недавние исследования [17] также свидетельствуют о значительном росте коэффициента диффузии (на два или три порядка) в металлах, полученных методами



ИПД, что может быть связано, по предположениям [9], с неравновесностью границ зерен либо с эффектом ИДД [6]. Авторы связывают этот факт с деформационным растворением углерода вследствие ускоренной диффузии.

ИДД объясняет также особые свойства материалов, подвергнутых ИПД, при дальнейших деформационных и термических обработках. К необычным эффектам, проявляющимся в материалах после ИПД и последующей холодной деформационной обработки, относятся: повышение плотности материала при развитой деформации; замедленное формирование анизотропии зерен и свойств; увеличение размера зерна при повышении прочности и пластичности; возможность деформировать материал до больших степеней деформации без отжига вследствие большого запаса пластичности ( $\sigma_m / \sigma_B$ ) и др. К необычным эффектам, проявляющимся при термической обработке, относятся: увеличение скорости сфероидизации пластин избыточной фазы; изменение количественного соотношения фаз вследствие растворения избыточных фаз в твердом растворе; устойчивость зеренной структуры к рекристаллизации и вторичной рекристаллизации вследствие формирования равновесных границ. Прокомментируем эффекты, приведенные в таблице, более подробно.

**По пункту № 1.** Отсутствие существенного деформационного упрочнения при развитой деформации является еще одним интересным свойством, выявленным во время механических испытаний металлов, полученных методами ИПД. Из механики деформации растяжением известно, что проявление стабильного течения и, следовательно, высокой пластичности тесно связано с деформационным упрочнением. Однако полученные экспериментальные данные позволяют полагать, что высокая пластичность УМЗ-металлов связана не со значительным деформационным упрочнением, а с работой механизмов, перечисленных в табл.1. На начальных этапах деформации фрагментация обеспечивает постепенное измельчение зерен, а при развитой деформации развивающееся ИДД приводит к активному протеканию ДР в процессе деформации и стоку дефектов, вследствие чего размер зерна практически не изменяется. Именно поэтому поэтапное развитие фрагментации и релаксационных процессов замедляет процесс упрочнения и приводит к относительно высоким значениям пластических характеристик. При этом снижение уровня прочностных свойств не наблюдается.

**По пункту № 2.** Аналогичная картина наблюдается и при измерениях размера зерна и областей когерентного рассеяния в материалах, подвергнутых ИПД. Рост степени деформации при ИПД не приводит к монотонному уменьшению последних, а достигает некоторой предельной величины, после чего изменяется мало.

**По пункту № 3.** Противоположная картина наблюдается при измерениях плотности материалов после ИПД. Для стандартных схем деформации характерно снижение плотности материала вследствие увеличения плотности дефектов. В то же время при ИПД на определенном этапе деформации ИДД приводит к развитию релаксационных процессов, и, следовательно, к возможному росту плотности вследствие активного стока дефектов на границы зерен, уменьшению количества малоугловых границ, росту количества большеугловых границ и развитию ДР.

**По пункту № 4.** Именно механизм ИДД приводит к тому, что прекращается рост плотности дислокаций при увеличении степени деформации за счет активного стока дефектов на границы и развития ДР. Это отличает схемы ИПД от стандартных схем, где плотность дислокаций растет с увеличением степени деформации вплоть до разрушения материала.

**По пункту № 5.** Еще одним отличием схем ИПД от СТ является немонотонное изменение температуры деформируемого материала в очаге деформации. В соответствии с классическим подходом, пластическая деформация вызывает



- [7] В.М. Сегал, В.И. Резников, А.Е. Дробышевский, В.И. Копылов // *Металлы* **1** (1981) 115.
- [8] С.А. Фирстов, Н.И. Даниленко, В.И. Копылов, Ю.Н. Подрезов // *Известия высших учебных заведений. Физика* **45**, № 3 (2002) 41.
- [9] Р.З. Валиев, Р.К. Исламгалиев // *ФММ* **85**, № 3 (1998) 161.
- [10] Т.И. Чашухина, М.В. Дегтярев, М.Ю. Романов, Л.М. Воронова // *ФММ* **98**, № 6 (2004) 98.
- [11] О.А. Кайбышев, Н.Р. Дудова, В.А. Валитов // *ФММ* **96**, № 1 (2003) 54.
- [12] Т.И. Чашухина, М.В. Дегтярев, Л.М. Воронова, Л.С. Давыдова, В.П. Пилюгин // *ФММ* **91**, № 5 (2001) 75.
- [13] Е.Г. Пашинская, А.А. Толпа, М.М. Мышляев, В.В. Гришаев, А.В. Завдоев // *Металлы* **6** (2011) 25.
- [14] Е.Г. Пашинская, В.Н. Варюхин, В.М. Ткаченко, И.И. Тищенко // *Вопросы материаловедения* **54**, № 2 (2008) 60.
- [15] И.В. Александров, Р.Г. Чембарисова // *ФММ* **110**, № 1 (2010) 73.
- [16] Л.С. Метлов // *Сер. А: Природничі науки* **2** (2009) 135.
- [17] Е.А. Корзникова, *Исследование концентрации вакансий и плотности дислокаций в ГЦК металлах после интенсивной пластической деформации*, (Автореф. канд. дисс., Уфа, 2011).
- [18] Ю.Ю. Ефимова, *Формирование структуры и свойств углеродистых сталей после РКУП и последующего волочения*, (Автореф. канд. дисс., Магнитогорск, 2009).
- [19] А.А. Толпа, В.А. Шеремет, А.А. Максаков, А.А. Рыжиков, Е.Г. Пашинская // *Металл и литье Украины* **12** (2002) 36.
- [20] А.А. Закирова, Р.Г. Зарипова, В.И. Семенов // *Вестник УГАТУ* **11**, № 2 (2008) 123.

## INTENSIFIED MOVEMENT OF DEFECTS DURING SEVERE PLASTIC DEFORMATION

**E.G. Pashynskaya<sup>1\*</sup>, Yu.N. Podrezov<sup>2</sup>, V.V. Stolyarov<sup>3</sup>, A.V. Zavdoveyev<sup>1</sup>, I.I. Tishchenko<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Donetsk Institute for Physics and Engineering named after O.O. Galkin, National Academy of Sciences of Ukraine,  
R. Luxemburg str. 72, Donetsk, 83114, Ukraine

<sup>2</sup>Institute for Problems of Materials Science named after I.I. Frantsevich,  
National Academy of Sciences of Ukraine

Academic Krjyjanovsky str. 3, Kiev, 03680, Ukraine

<sup>3</sup>Federal budget - funded research Institute of Machines Science named after A.A. Blagonravov RAS  
Maly Kharitonyevsky pereulok, Moscow, 101990, Russia

\*e-mail: pashinska@mail.ru

**Abstract.** Mechanisms of ultrafine structure formation during severe plastic deformation are considered in the work. It has been shown that during the deformation, the structure formation is determined by the mechanisms that lead to an increase in defect density and the relaxation mechanisms that lead to a decrease in the density of defects. The concept of an intensified movement of defects is involved in the work to describe the experimental data on changes in the structure and properties of materials at large plastic deformations, that provides a fairly complete picture of the formation of structure of metals and alloys.

**References**

- [1] T. Elsukova, V. Panin, Yu. Popkova // *Deformation and fracture of materials* **8** (2010) 11.
- [2] M. Zifeldt, S. Kusters, C. Boksel Wang, B. Verlinde, P. Van Haute // *Problems of Materials Science* **52**, N4 (2007) 30.
- [3] N. Dudova, *Mechanisms of plastic deformation and the formation of ultrafine structure in the nichrome* (PhD thesis, Ufa, 2009).
- [4] A. Lotkov, A. Baturin, V. Grishkov, V. Kopylov // *Physical mesomechanics* **10**, N3 (2007) 67.
- [5] V. Stolyarov, W. Ugurchiev, I. Trubitsyna, S. Prokoshkin // *MIToM* **3** (2008) 41.
- [6] E. Pashinska, *Physical and mechanical grinding of the structure foundations with combined plastic deformation* (Weber, Donetsk, 2009).
- [7] V. Segal, V. Reznikov, A. Drobyshevsky, V. Kopylov // *Metals* **1** (1981) 115.
- [8] S. Firstov, N. Danilenko, V. Kopylov, N. Scores // *Proceedings of higher educational institutions. Physics* **45**, N3 (2002) 41.
- [9] R. Valiev, R. Islamgaliev // *FMM* **85**, N3 (1998) 161.
- [10] T. Chashchukhin, M. Degtyarev, M. Romanov, L. Voronov // *FMM* **98**, N6 (2004) 98.
- [11] O. Kaibyshev, N. Dudova, V. Valitov // *FMM* **96**, N1 (2003) 54.
- [12] T. Chashchukhin, M. Degtyarev, L. Voronova, L. Davydov, V. Pilyugin // *FMM* **91**, N5 (2001) 75.
- [13] E. Pashinska, A. Tolpa, M. Myshlyaev, V. Grishaev, A. Zavdoveev // *Metals* **6**(2011)25.
- [14] E. Pashinska, V. Varyukhin, V. Tkachenko, I. Tishchenko // *Problems of Materials Science* **54**, N2 (2008) 60.
- [15] I. Aleksandrov, R. Chembarisova // *FMM* **110**, N1 (2010) 73.
- [16] L. Metlov // *Ser: Natural Sciences* **2** (2009) 135.
- [17] E. Korznikova, *Investigation of vacancy concentration and density of dislocations in fcc metals after severe plastic deformation* (PhD Thesis, Ufa, 2011).
- [18] Y. Efimova, *Structure formation and properties of carbon steels after ECAP and the subsequent drawing* (PhD Thesis, Magnitogorsk, 2009).
- [19] A. Tolpa, V. Sheremet, A. Maksakov, A. Mushrooms, E. Pashinska // *Metal and casting of Ukraine* **12** (2002) 36.
- [20] A. Zakirov, R. Zaripov, V. Semenov // *Herald USATU* **11**, N2 (2008) 123.