

## **ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ БЕЙНИТНОЙ И МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛЕЙ**

**Аксёнова К.В.<sup>1</sup>, Никитина Е.Н.<sup>1</sup>, Громов В.Е.<sup>1</sup>, Иванов Ю.Ф.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия,  
e-mail: gromov@physics.sibsiu.ru*

<sup>2</sup> *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск,  
Россия, e-mail: yufi55@mail.ru*

К настоящему времени установлено фундаментальное положение, что пластическая деформация всегда развивается неоднородно и склонна к локализации не только на микроскопическом (дислокационном) уровне, но и на мезо- и макроуровнях [1]. В условиях интенсивной (мегапластической) деформации на наномасштабном структурном уровне при волочении низкоуглеродистой стали 08Г2С [2] было обнаружено формирование вытянутых областей локализации деформации – каналов деформации, в которых локализован сдвиг, в десятки раз превосходящий средний по материалу. Целью настоящей работы является выявление и оценка локализации пластической деформации сталей с бейнитной (сталь 30Х2Н2МФ) и мартенситной (сталь 38ХН3МФА) структурами на последних стадиях ее пластической деформации.

Материалом исследования являлись конструкционные стали марки 38ХН3МФА и 30Х2Н2МФА. Обе стали аустенизировали при температуре 950 °С, 1,5 часа и охлаждали в воде (сталь 38ХН3МФА) или на воздухе (сталь 30Х2Н2МФА). Деформацию исследуемых сталей проводили одноосным сжатием со скоростью  $\sim 7 \cdot 10^{-3}$  с<sup>-1</sup> столбиков размерами 4x4x6 мм<sup>3</sup> на испытательной машине типа «Инстрон». Исследования структуры и фазового состава стали осуществляли методами электронной дифракционной микроскопии тонких фольг.

Выполненные электронно-микроскопические микродифракционные исследования показали, что в результате указанной выше термической обработки в стали 38ХН3МФА была сформирована структура пакетного (реечного) мартенсита; в стали 30Х2Н2МФА – структура нижнего бейнита. Детальный анализ структуры деформированных сталей [3, 4] позволил выявить особые состояния материала, располагающиеся, как правило, вдоль внутрифазных границ раздела, а именно, границ раздела соседних пакетов или границ раздела пластин и пакетов – так называемые каналы локализованной деформации. Их структура подобна структуре каналов, наблюдавшихся при деформации волочением стали 08Г2С [2].

Как показано в [3], каналы деформации, выявленные при исследовании закаленной стали 38ХН3МФА (рис. 1), деформированной при одноосном сжатии, имеют форму вытянутой области, поперечные размеры которой  $\sim 0,5$  мкм. Канал деформации имеет слоистое строение, напоминая этим структуру пакета мартенсита. Слои сформированы кристаллитами, размеры которых изменяются в пределах (50-100) нм. Кольцевое строение микроэлектроннограммы, полученной с области локализации канала деформации (рис. 1, г), указывает на преимущественно большеугловую разориентацию кристаллитов, формирующих его. Важно отметить, что в прилегающих к каналу деформации областях материала структура стали по морфологическому признаку подобна структуре исходного состояния, т.е. выявляются кристаллы пакетного и пластинчатого мартенсита. Микроэлектроннограмма, полученная с прилегающей к каналу области фольги, является точечной, характерной для поликристаллического материала (рис. 1, в). С ростом степени деформации объем материала, занятый каналами деформации возрастает, достигая на момент разрушения стали нескольких десятков процентов.

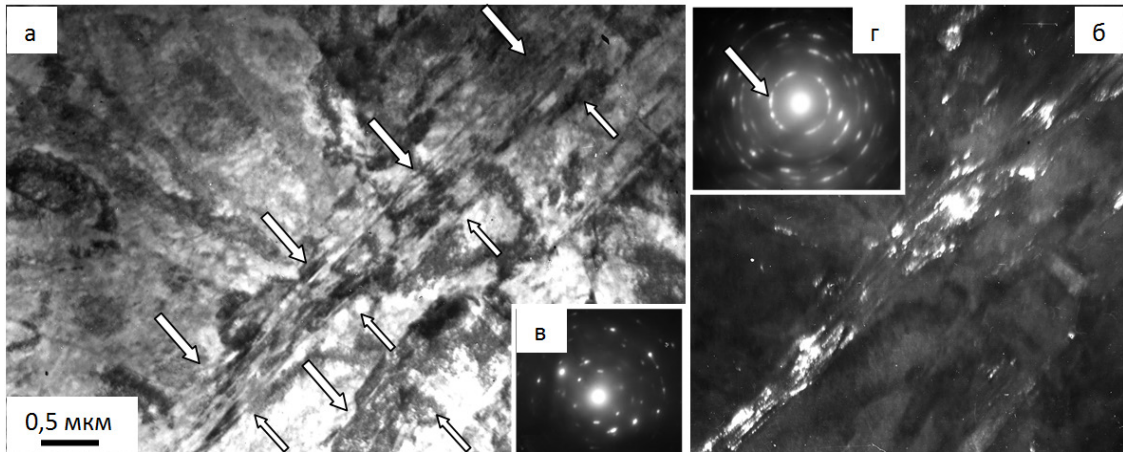


Рисунок 1- Каналы деформации, формирующиеся в закаленной стали 38ХН3МФА;  $\varepsilon = 18,6 \%$ ; а – светлое поле; б – темное поле, полученное в рефлексе  $[110]\alpha\text{-Fe}$ ; в, г – микроэлектронogramмы, (в) получена с области фольги, вдали от канала деформации, (г) – с области локализации канала деформации. На (а) стрелками обозначены каналы деформации; на (г) стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле.

Формирование каналов деформации наблюдается и в стали 30Х2Н2МФА с бейнитной структурой при деформации  $> 36\%$  (рис. 2). Их структура подобна структуре каналов, наблюдающихся при деформации волочением при комнатной температуре стали 08Г2С (феррито-перлитное состояние) [2] и закаленной стали 38ХН3МФА [3], что указывает на единую природу их формирования.

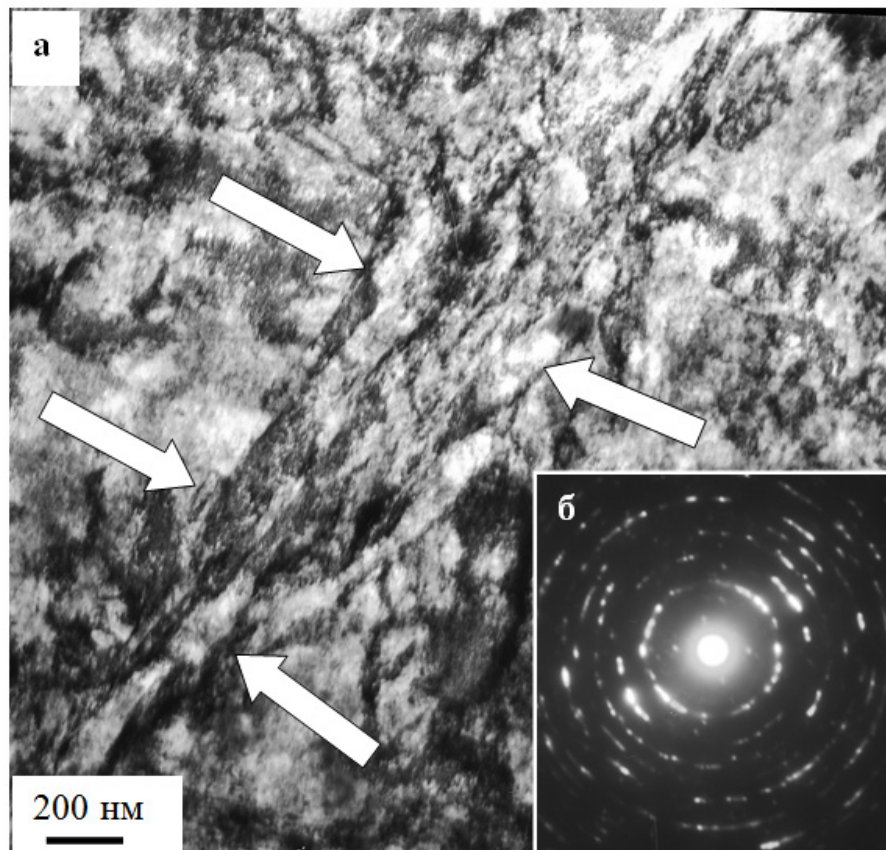


Рисунок 2- Каналы деформации, формирующиеся в стали 30Х2Н2МФА с бейнитной структурой;  $\varepsilon = 43 \%$ ; а – светлое поле; б – микроэлектронogramма. На (а) стрелками обозначены каналы деформации.

Судя по строению микроэлектронограммы, представленной на рис. 2, б, в объеме канала деформации присутствуют частицы второй фазы. Рефлексы от частицы второй фазы сильно искажены как в радиальном, так и азимутальном направлениях. Данное обстоятельство может быть обусловлено как искажением кристаллической решетки частиц, так и малыми их размерами. Микроэлектронограммы, полученные с прилегающих к каналу областей фольги, являются точечными, характерными для поликристаллического материала. С ростом степени деформации объем материала, занятый каналами деформации возрастает, достигая на момент разрушения стали нескольких процентов.

В канале деформации субструктура также является фрагментированной, однако размеры фрагментов намного меньше, чем в основном объеме материала. Кроме того, фрагменты в канале деформации изотропны по форме. Если судить по размеру фрагментов, то следует полагать, что в канале деформации локализован сдвиг, в несколько раз превосходящий средний. Различие формы фрагментов в матрице (высокоанизотропные фрагменты) и каналах (изотропные фрагменты) свидетельствует о различных механизмах их формирования. Изотропия формы фрагментов в канале позволяет предположить иные температурные условия их формирования. Если анизотропные фрагменты есть результат холодной деформации, то изотропные фрагменты – результат теплой деформации.

Таким образом, проведенные исследования на сталях с бейнитной и мартенситной структурами, подвергнутых пластической деформации одноосным сжатием, выполненные методами электронной дифракционной микроскопии тонких фольг, выявили формирование каналов локализованной деформации – особых структурных состояний материала, располагающихся вдоль границ раздела соседних пластин или границ зерен. Эти области достигают нескольких десятков микрометров в длину и имеют в поперечине до 0,5 мкм. Каналы деформации являются многофазными образованиями, имеют сложное строение, сформированное кристаллитами, размеры которых изменяются в пределах (50-100) нм. С ростом степени деформации объем материала, занятого каналами деформации, возрастает, достигая при разрушении нескольких процентов. Сравнительный анализ структуры каналов деформации бейнитной стали 30X2H2MФА и мартенситной стали 38XH3MФА указывает на единую природу их формирования.

*Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов (проект СП 1335.2016.1).*

### Список литературы

1. Лихачев В.А., Панин В.Е., Засимчук Е.Э. и др. Кооперативные деформационные процессы и локализация деформации. Киев: Наукова думка, 1989. 320 с.
2. Gromov V.E., Petrunin V.A. Localization of plastic deformation under conditions of electrostimulated drawing // *Physicactalus Solidi (a)*. 1993. V. 139. P. 77-81.
3. Иванов Ю.Ф., Корнет Е.В., Громов В.Е. Каналы локализованной деформации закаленной конструкционной стали // *Материаловедение*. 2010. №3. С. 62-64.
4. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Глезер А.М., Никитина Е.Н., Аксёнова К.В. Локализация пластической деформации стали с бейнитной структурой на наноуровне // *Деформация и разрушение материалов*. 2016. № 8. С. 18-21.